



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA

**MODELAGEM DE TURBINAS DE VENTO VERTICAIS PARA REGIÕES DE
VENTO DE BAIXA VELOCIDADE.**

DESEMPENHO E OPTIMIZAÇÃO

Autor:

Cossa, Tiago António

Supervisor:

Prof. Dr. Eng. °. Jorge Nhambiu

Co-Supervisor:

Eng.^a Isaura Tobela

Maputo, Agosto de 2025



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

CURSO DE LICENCIANTURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA

**MODELAGEM DE TURBINAS DE VENTO VERTICAIS PARA REGIÕES DE
VENTO DE BAIXA VELOCIDADE**

DESEMPENHO E OPTIMIZAÇÃO

Autor:

Cossa, Tiago António

Supervisor:

Prof. Dr. Eng. ^o. Jorge Nhambiu

Co-Supervisor:

Eng. ^a Isaura Tobela

Maputo, Agosto de 2025

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante Tiago António Cossa entregou no dia ____/____/2025 as três cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência: _____, intitulado: **MODELAGEM DE TURBINAS DE VENTO VERTICAIS PARA REGIÕES DE VENTO DE BAIXA VELOCIDADE. DESEMPENHO E OPTIMIZAÇÃO.**

Maputo, ____ de _____ de 2025

Chefe da secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Tiago António Cossa, declaro, sob palavra de honra, que o presente trabalho de licenciatura com o tema, **Modelagem de turbinas de vento verticais para regiões de vento de baixa velocidade: Desempenho e otimização**, que apresento para o cumprimento dos requisitos para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Mecânica, foi por mim realizado, com base nos recursos que no mesmo se faz referência

(Tiago António Cossa)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo desta jornada. Aos meus pais, António Machichimane Cossa e Hortência Alfredo Chunguane, meu mais profundo agradecimento. Pela base sólida que me deram, pelo amor incondicional, pelos sacrifícios silenciosos e pelo apoio constante em cada etapa da minha jornada. Sem a paciência, os conselhos e encorajamento de vocês, este trabalho e a minha formação não seriam possíveis. Obrigado por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidei. Este é mais um passo que também é de vocês. Aos meus irmãos, Virgílio, Gonçalves, Gaspar e Elizabeth e toda minha família, obrigado por estarem sempre ao meu lado. À minha namorada, obrigado pelo carinho, apoio e paciência em todos momentos.

Ao meu professor e supervisor, Jorge Olívio Penicela Nhambiu, expresso minha mais sincera gratidão. Mais do que um orientador académico, foi um verdadeiro mentor ao longo desta jornada. A sua dedicação, paciência, conselhos valiosos e constante disponibilidade foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento pessoal e académico. Obrigado por acreditar no meu potencial, mesmo nos momentos em que eu duvidei. O seu apoio foi além do esperado e ficará marcado para sempre na minha trajetória.

Agradeço igualmente à minha Co-supervisora, Isaura Tobela, pela orientação e pelo apoio prestado durante este trabalho. Agradeço pela disponibilidade, pelas sugestões e por fazer parte desta etapa importante na minha formação.

Aos meus colegas e amigos, especialmente Cândido Chaves, Casimiro Bimbe, Ednaldo Tembe e Shaad Muteto, meu sincero agradecimento. Cada conversa, incentivo, partilha de ideias e momentos de descontração fizeram toda diferença ao longo desta caminhada. A vossa companhia tornou os desafios mais leves e os bons momentos ainda mais significativos. Sou grato por termos partilhado não apenas conhecimento, mas também amizade e apoio mútuo. Levo comigo tudo o que vivemos juntos nesta etapa marcante.

À minha instituição, expresso a mais profunda gratidão por ter proporcionado as condições essenciais para a minha formação académica e pessoal.

Aos que não mencionei, meu sincero obrigado, cada gesto, apoio ou palavra fez a diferença.

DEDICATÓRIA

Este trabalho de licenciatura é dedicado aos meus pais e irmãos.

Índice geral

1. Introdução	1
1.1. Considerações preliminares	1
1.2. Estrutura do trabalho	2
1.3. Objectivos	3
1.3.1. Geral	3
1.3.2. Específicos.....	3
2. Revisão da literatura	4
2.1. Estado da arte	4
3. Materiais e métodos	7
3.1. Desenho da pesquisa	7
3.2. Materiais e Equipamentos	7
3.3. <i>Softwares</i> e ferramentas computacionais	7
3.4. Amostra.....	9
3.5. Procedimentos.....	10
3.5.1. Análise Ambiental e selecção da região crítica	10
3.5.2. Correção da velocidade com a altura.....	12
3.5.1.3. Potência disponível no vento e Potência extraída pela turbina	13
3.5.3. Selecção e caracterização de perfis aerodinâmicos:	14
3.5.4. Coeficiente de Sustentação (<i>CL</i>) e coeficiente de arrasto (<i>CD</i>).....	15
3.5.5. Força de sustentação (Lift Force).....	16
3.5.6. Força de arrasto (Drag Force).....	16
3.5.7. Modelagem do domínio e condições de contorno	18
3.5.8. Geração da malha	20
3.5.9. Extracção e processamento dos resultados.....	22
3.5.10. Optimização do perfil seleccionado	23
3.6. Procedimentos para a análise e dimensionamento da turbina Darrieus	23
3.6.1. Definição de parâmetro geométricos operacionais.....	23

3.6.2. Relação de velocidade na ponta da pá (coeficiente de avanço) λ	23
Razão de aspecto (Aspect Ratio – AR).....	24
3.6.3. Cálculo da corda da pá	24
3.6.4. Momento de inércia da pá isolada	25
3.6.5. Optimização do número de pás e ângulo de ataque.....	25
3.6.6. Avaliação do torque e da potência.....	25
3.7. Procedimentos para a análise e dimensionamento da turbina Savonius.....	26
3.7.1. Geometria adoptada e racional construtivo	26
3.7.2. Fundamento físico e geração de torque	27
3.7.3. Coeficientes de arrasto da turbina Savonius.....	27
3.7.4. Cálculo do torque gerado pela turbina Savonius	28
3.7.5. Verificação do auto arranque.....	29
3.8. Integração de ambas as turbinas (Savonius + Darrieus).....	29
3.8.1. Desenvolvimento do modelo computacional para configuração da turbina híbrida	30
3.9. Variáveis	31
3.10. Limitações de estudo	32
4. Resultados e discussões	33
4.1. Comparação dos perfis aerodinâmicos (NACA 0012, 63-415 e 4415) e selecção do perfil ideal	33
4.2. Optimização do perfil aerodinâmico seleccionado e determinação do ângulo óptimo	37
4.2.1. Determinação do ângulo de ataque óptimo para o perfil optimizado.....	41
4.2.2. Comparação da distribuição de pressão e velocidade: perfil optimizado VS não optimizado.	42
4.2.3. Resumo da escolha do perfil e do ângulo óptimo.....	46
4.3. Avaliação do número de pás, TSR e coeficiente de potência do rotor Darrieus	47
4.4. Análise dos resultados para o rotor Savonius.....	52
4.4.1. Resumo do dimensionamento da turbina híbrida	55
4.3. Discussão das limitações de estudo	59
5. Avaliação da viabilidade económica do projecto	54
5.1. Levantamento de custos estimados dos componentes da turbina.....	54
5.2. Custo de operação e manutenção	55

5.3. Amortização anual do investimento	55
6. Conclusões	57
7. Recomendações	58
8. Referências bibliográficas.....	59

Índice de figuras

Figura 1: a) Turbina de eixo horizontal; b) Turbina de eixo vertical (Fonte: Wahl, 2007).	4
Figura 2: a) Turbina H-Darrieus; b) Turbina Savonius; c) Turbina Híbrida (Savonius Darrieus). ..	5
Figura 3: Mapa do potencial eólico em Moçambique e profundidade do lençol freático.....	11
Figura 4: Velocidade média do vento em Tete (Fonte: Wind atlas energy)	12
Figura 5: Perfis do modelo NACA analisados (Fonte: Autor).....	15
Figura 6: Forças aerodinâmicas no perfil (Fonte: Batista, 2013).....	17
Figura 7: Domínio computacional das simulações (Fonte: Autor)	18
Figura 8: Malha gerada para o perfil Darrieus (Fonte: Autor).....	21
Figura 9: Malha gerada para o rotor Savonius (Fonte: Autor).....	21
Figura 10: Malha gerada para a turbina híbrida (Fonte: Autor).....	22
Figura 11: Perfis NACA analisados (Fonte: Autor).....	34
Figura 12: Perfil NACA 63-415, antes e depois da optimização (Fonte: Autor).....	38
Figura 13: Malha gerada para o rotor Darrieus (Fonte: Autor).....	43
Figura 14: Distribuição de pressão estática ao longo do perfil NACA não optimizado	44
Figura 15: Distribuição da velocidade ao longo do perfil não optimizado (Fonte: Autor).....	44
Figura 16: Distribuição de pressão estática ao longo do perfil NACA optimizado (Fonte: Autor)	45
Figura 17: Distribuição da velocidade ao longo do perfil optimizado (Fonte: Autor	45
Figura 18: Rotor Darrieus com 4 pás (Fonte: Autor).....	50
Figura 19: Distribuição de pressão ao longo da turbina Savonius (Fonte: Autor).....	52
Figura 20: Distribuição de velocidade no rotor Savonius (Ang. = 0°).....	53
Figura 21: Distribuição de velocidade no rotor Savonius (Ang. = 45°).....	53
Figura 22: Distribuição de velocidade no rotor Savonius (Ang. 75°)	53
Figura 23: Distribuição de velocidade no rotor Savonius (Ang. 110°)	53
Figura 24: Rotor Savonius (Fonte: Autor)	54

Figura 25: Gráfico do torque da turbina Savonius (Fonte: Autor)	56
Figura 26: Distribuição de pressão estática na turbina (Fonte: Autor)	57
Figura 27: Distribuição da velocidade na turbina (Fonte: Autor)	57

Índice de tabelas

Tabela 1: Valores do expoente de Hellman em função da rugosidade do terreno(Fonte: Cengel)	13
Tabela 2: Tabela das condições de contorno assumidas na simulação (Fonte: Autor)	20
Tabela 3: Comparação dos parâmetros aerodinâmicos simulados (Fonte: Autor).....	35
Tabela 4: Coeficientes de sustentação e arrasto do perfil otimizado (Fonte: Autor)	38
Tabela 5: Especificações técnicas do rotor Darrieus (Fonte: Autor)	51
Tabela 6: Parâmetros técnicos do rotor Savonius (Fonte: Autor)	54
Tabela 7: Levantamento de custos dos componentes da turbina	54
Tabela 8: Custo de operação e manutenção	55

Índice dos gráficos

Gráfico 1: Variação dos coeficientes C_L e C_D em função do ângulo de ataque (Fonte: Autor)	36
Gráfico 2: Coeficientes de arrasto dos perfis analisados (Fonte: Autor)	36
Gráfico 3: Coeficientes de sustentação e arrasto do perfil NACA otimizado (Fonte: Autor)	39
Gráfico 4: Comparação do coeficiente de sustentação do perfil NACA 63-415 (Fonte: Autor) ..	40
Gráfico 5: Comparação da relação C_L/C_D do perfil NACA 63-415 (Fonte: Autor)	40
Gráfico 6: Determinação do ângulo ótimo (Fonte: Autor).....	41
Gráfico 7: Análise do número de pás do rotor Darrieus (Fonte: Autor)	48
Gráfico 8: Análise do coeficiente de potência da turbina em função do TSR (Fonte: Autor)	49
Gráfico 9: Custo acumulado em função do tempo (Fonte: Autor).....	56

Lista de Símbolos

A	Área varrida pelo rotor da turbina
AR	Razão de aspecto
H	Altura da pá
α	Ângulo de ataque
C_D	Coeficiente de arrasto
C_m	Coeficiente do momento
C_P	Coeficiente de potência
$C_{p,máx}$	Coeficiente de potência máxima
C_L	Coeficiente de sustentação
C_t	Coeficiente de torque
C	Comprimento da corda
D	Diâmetro do rotor
F_D	Força de arrasto
F_L	Força de sustentação
ρ	Massa específica
I	Momento de inércia
M_{rot}	Momento rotacional
P	Potência
P_{disp}	Potência disponível
P_{Ext}	Potência extraída do vento
R	Raio do rotor
Re	Número de Reynolds
S	Sobreposição
T	Torque
TSR	Razão de velocidade na ponta da pá
V	Velocidade do vento
ρ	Massa específica
ν	Viscosidade cinemática
μ	Viscosidade dinâmica

Lista de abreviações

<i>ANSYS</i>	<i>Software</i> de simulação numérica por elemento finitos
<i>CAD</i>	Desenho assistido por computador
<i>CFD</i>	Dinâmica dos fluidos computacional
<i>HAWT</i>	Turbina Eólica de eixo Horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine)
<i>NACA</i>	Comité Nacional Consultivo para aeronáutica
<i>SST</i>	Modelo de turbulência (Shear Stress Transport)
<i>TEEH</i>	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
<i>TEEV</i>	Turbina Eólica de Eixo Vertical
<i>VAWT</i>	Turbina Eólica de Eixo Vertical (Vertical Axis Wind Turbine)

RESUMO

A urgente transição global para fontes de energia renováveis, impulsionada por crescentes preocupações com as mudanças climáticas e a finitude dos combustíveis fósseis, posiciona a energia eólica como um pilar fundamental. Contudo, a aplicação de turbinas eólicas de eixo horizontal (HAWTs) tradicionais é frequentemente limitada em regiões caracterizadas por baixas velocidades e direcções de vento variáveis, cenários comuns em áreas urbanas e rurais, especialmente em países em desenvolvimento. Neste contexto, as turbinas de eixo vertical (VAWTs), e em particular as configurações híbridas Savonius-Darrieus, emergem como uma alternativa altamente promissora. Estas combinam a capacidade de auto arranque em ventos fracos, inerente ao rotor Savonius, com a superior eficiência aerodinâmica do rotor Darrieus em velocidades mais elevadas. Este trabalho de investigação teve como objectivo central desenvolver um modelo computacional para simular o desempenho e otimizar o *design* de turbinas de vento de eixo vertical destinadas a operar eficientemente em regiões com baixas velocidades de vento.

A metodologia empregou uma abordagem integrada, de carácter quantitativo, exploratório e computacional. Utilizou-se modelagem 3D avançada (Autodesk Fusion 360), análise aerodinâmica detalhada através da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) com ANSYS Fluent, e optimização de perfis aerodinâmicos (Qblade, XFOIL, Xoptfoil), além da utilização de Python para processamento de dados. O estudo focou-se na análise de perfis aerodinâmicos específicos, como o NACA 63-415, e na simulação da operação de diversas geometrias de pás e configurações de turbinas. A eficiência energética foi avaliada em função de variáveis como o ângulo de ataque e o número de pás.

Os resultados obtidos demonstraram que o perfil aerodinâmico NACA 63-415 optimizado apresentou uma eficiência significativamente superior, resultando em coeficientes de sustentação (C_L) mais elevados e um comportamento de fluxo de ar mais eficiente, com uma notável melhora na relação Coeficiente de sustentação (C_L) / Coeficiente de arrasto (C_D). Para a turbina Darrieus, a configuração com 4 pás e uma Razão de Velocidade na Ponta (TSR) de aproximadamente 2 revelou o melhor desempenho aerodinâmico, optimizando a geração de potência e a estabilidade. As simulações CFD, confirmadas por contornos de pressão e velocidade, validaram visualmente o comportamento esperado da configuração híbrida: o rotor Savonius proporciona o torque inicial necessário para o auto arranque em baixas velocidades de vento, enquanto o rotor Darrieus assume a principal função de conversão de energia eólica em potência útil uma vez em rotação.

Este estudo valida um modelo de turbina híbrida inovador, especificamente projectado e optimizado para condições de vento de baixa intensidade, prevalentes em regiões como a província de Tete, (Moçambique). A metodologia desenvolvida e as ideias geradas representam uma contribuição significativa para o avanço do conhecimento em energia eólica e oferecem uma base técnica sólida para o desenvolvimento de projectos de turbinas para abastecimento de pequenas comunidades rurais e urbanas, especialmente onde a velocidade média do vento não é compatível com HAWTs. Ao promover soluções energéticas sustentáveis, de baixo custo e acessíveis, este trabalho visa impulsionar a inclusão energética e o desenvolvimento socioeconómico local.

Palavras-chaves:

Turbina Híbrida; Perfil NACA 63-415; baixa velocidade de vento; Modelagem Computacional; Bombeamento de água; energia renovável.

ABSTRACT

The urgent global transition to renewable energy sources, driven by growing concerns about climate change and the finite nature of fossil fuels, positions wind energy as a fundamental pillar. However, the application of traditional horizontal axis wind turbines (HAWTs) is often limited in regions characterized by low and variable wind speeds, common scenarios in urban and rural areas, especially in developing countries. In this context, vertical axis wind turbines (VAWTs), and particularly hybrid Savonius-Darrieus configurations, emerge as a highly promising alternative. These combine the self-starting capability in weak winds, inherent to the Savonius rotor, with the superior aerodynamic efficiency of the Darrieus rotor at higher speeds. This research aimed to develop a computational model to simulate the performance and optimize the design of vertical axis wind turbines intended to operate efficiently in regions with low wind speeds.

The methodology employed an integrated, quantitative, exploratory, and computational approach. Advanced 3D modeling (Autodesk Fusion 360), detailed aerodynamic analysis through

Computational Fluid Dynamics (CFD) with ANSYS Fluent, and optimization of aerodynamic profiles (Qblade, XFOIL, Xoptfoil), in addition to the use of Python for data processing, were utilized. The study focused on the analysis of specific aerodynamic profiles, such as NACA 63-415, and the simulation of the operation of various blade geometries and turbine configurations. Energy efficiency was evaluated as a function of variables such as angle of attack and number of blades. The results obtained demonstrated that the optimized NACA 63-415 airfoil showed significantly higher efficiency, resulting in higher lift coefficients (C_L) and more efficient airflow behavior, with a notable improvement in the C_L/C_D ratio. For the Darrieus turbine, the configuration with 4 blades and a Tip Speed Ratio (TSR) of approximately 2 revealed the best aerodynamic performance, optimizing power generation and stability. CFD simulations, confirmed by pressure and velocity contours, visually validated the expected behavior of the hybrid configuration: the Savonius rotor provides the initial torque required for self-starting in low wind speeds, while the Darrieus rotor assumes the main function of converting wind energy into useful power once in rotation.

This study validates an innovative hybrid turbine model, specifically designed and optimized for low-intensity wind conditions, prevalent in regions such as Tete province, (Mozambique). The developed methodology and the ideas generated represent a significant contribution to the advancement of knowledge in wind energy and offer a solid technical basis for the development of turbine projects for supplying small rural and urban communities, especially where the average wind speed is not compatible with HAWTs. By promoting sustainable, low-cost, and accessible energy solutions, this work aims to boost energy inclusion and local socioeconomic development.

Keywords:

Hybrid Turbine; NACA 63-415 Profile; Low Wind Speed; Computational Modeling; Water Pumping; Renewable Energy.

CAPÍTULO I

1. Introdução

1.1. Considerações preliminares

A transição energética rumo a fontes renováveis tornou-se uma prioridade no cenário mundial, motivada pelas crescentes preocupações com as alterações climáticas, a escassez de combustíveis fósseis e a necessidade de promover o desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, a energia eólica vem ganhando destaque como uma das fontes mais promissoras, por ser limpa, abundante e com baixo impacto ambiental (GWEC, 2023).

Tradicionalmente, a conversão da energia do vento em electricidade é feita por meio de turbinas eólicas de eixo horizontal (HAWT – Horizontal Axis Wind Turbines), que apresentam alto rendimento em regiões com vento constantes e intensos. No entanto, essas turbinas enfrentam limitações técnicas e operacionais em locais com baixa velocidade do vento e com direcção variável, características comuns em áreas urbanas e rurais afastadas (Manwell et., 2010).

As turbinas de eixo vertical (VAWT – Vertical Axis Wind Turbines) surgem como uma alternativa eficiente nesse tipo de cenário. Elas operam bem sob vento de baixa intensidade e direcção instável, além de apresentarem vantagens em termos de manutenção, instalação em espaços limitados e integração com ambientes urbanos. Entre os tipos mais estudados estão as turbinas Darrieus, conhecidas por sua eficiência aerodinâmica, e as turbinas Savonius, reconhecidas por sua simplicidade construtiva e capacidade de auto arranque.

A combinação dos dois tipos formando turbinas híbridas Savonius-Darrieus tem despertado interesse por unir o melhor desempenho de ambos os sistemas: auto arranque da Savonius e a eficiência energética da Darrieus. Essa abordagem híbrida é particularmente útil em contextos onde o vento é fraco, mas a necessidade de energia renovável é urgente, como em diversas regiões de Moçambique (Islam et al., 2013).

Apesar dos avanços, ainda há uma lacuna significativa na modelagem e optimização dessas turbinas para condições reais de operação em regiões com baixa velocidade de vento. A compreensão do comportamento aerodinâmico, o estudo de diferentes perfis e geometrias de pás, e o desenvolvimento de simulações computacionais robustas são elementos essenciais para promover soluções energéticas descentralizadas, sustentáveis e acessíveis.

Este trabalho insere-se nesse esforço, buscando contribuir para o avanço do conhecimento sobre turbinas de eixo vertical, com foco especial em configurações híbridas capazes de operar de forma eficiente em regiões de vento crítico.

1.2. Estrutura do trabalho

No Capítulo 2, é realizada a revisão da literatura, abordando o estado da arte sobre turbinas eólicas de eixo vertical, com ênfase nos modelos Savonius, Darrieus e configurações híbridas. São apresentados os fundamentos teóricos, as pesquisas recentes na área e as principais lacunas técnicas que justificam o desenvolvimento do presente estudo.

No Capítulo 3, são descritos os materiais e métodos utilizados, incluindo os *Softwares* empregues, os critérios de selecção dos perfis aerodinâmicos, e as etapas de modelagem computacional. Explica-se ainda como foram conduzidos as simulações numéricas e o processo de optimização dos parâmetros da turbina híbrida.

No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados, com base nas simulações realizadas. Analisa-se o desempenho dos diferentes perfis, a influência do ângulo de ataque, o comportamento do escoamento e a eficiência aerodinâmica obtida. As observações são interpretadas de forma a validar a configuração proposta para a turbina híbrida.

No Capítulo 5, é feita a avaliação da viabilidade económica do projecto, considerando os custos envolvidos na construção e instalação da turbina, bem como a comparação com sistemas alternativos, como bombas a Gasóleo. A análise permite estimar a sustentabilidade financeira e os benefícios da solução proposta para comunidade em regiões de vento fraco.

Nos Capítulos 6 e 7, são apresentadas as conclusões e recomendações relativamente ao trabalho.

1.3. Objectivos

1.3.1. Geral

- Desenvolver um modelo computacional de turbinas eólicas de eixo vertical para bombeamento de água em regiões de vento de baixa velocidade.

1.3.2. Específicos

- Analisar os perfis aerodinâmicos mais adequados para turbinas de eixo vertical em baixas velocidades de vento;
- Analisar o potencial eólico e a profundidade do lençol freático em diversas províncias para a aplicação de turbinas no bombeamento de água;
- Simular a operação de diferentes geometrias de pás e configurações de turbinas;
- Avaliar a eficiência energética em função de variáveis como ângulo de ataque, número de pás e materiais.

CAPÍTULO II

2. Revisão da literatura

2.1. Estado da arte

A energia eólica é uma fonte renovável obtida a partir da conversão da energia cinética do vento em energia eléctrica ou mecânica, sendo considerada limpa, inesgotável e com grande potencial para contribuir na redução do uso de combustíveis fósseis e na mitigação das alterações climáticas. A conversão da energia do vento ocorre pela interacção entre o fluxo de ar e as pás de uma turbina, as quais, ao girarem, accionam um gerador eléctrico. Essa conversão, no entanto, possui um limite teórico de eficiência de 59,3%, conforme estabelecido pela Lei de Betz (Manwell, 2009)

Há dois tipos principais de turbinas eólicas: as de eixo horizontal (TEEH), comuns em grandes parques eólicos, e as de eixo vertical (TEEV), adequadas para áreas urbanas ou locais com vento irregular por não exigirem orientação quanto à direcção do vento (Hau, 2013).

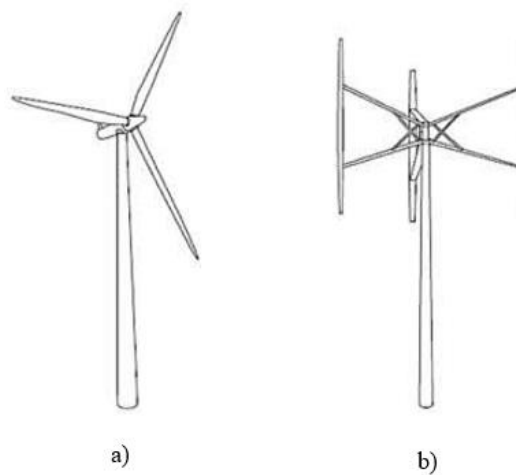


Figura 1: a) Turbina de eixo horizontal; b) Turbina de eixo vertical (Fonte: Wahl, 2007).

Entre os modelos de turbinas de eixo vertical, destacam-se as turbinas do tipo Darrieus, conhecidas por sua boa eficiência aerodinâmica, e as do tipo Savonius, que embora possuam menor eficiência, apresentam elevado torque de arranque, sendo ideais para regiões com vento de baixa intensidade. A combinação desses dois tipos origina as chamadas turbinas híbridas, que aliam a capacidade de auto arranque da Savonius com o desempenho aerodinâmico da Darrieus, tornando-se assim uma solução técnica promissora para contextos de vento fraco (El-Kasaby et al., 2020).

Apresentam-se em seguida ilustração dos principais tipos de turbinas de eixo vertical:

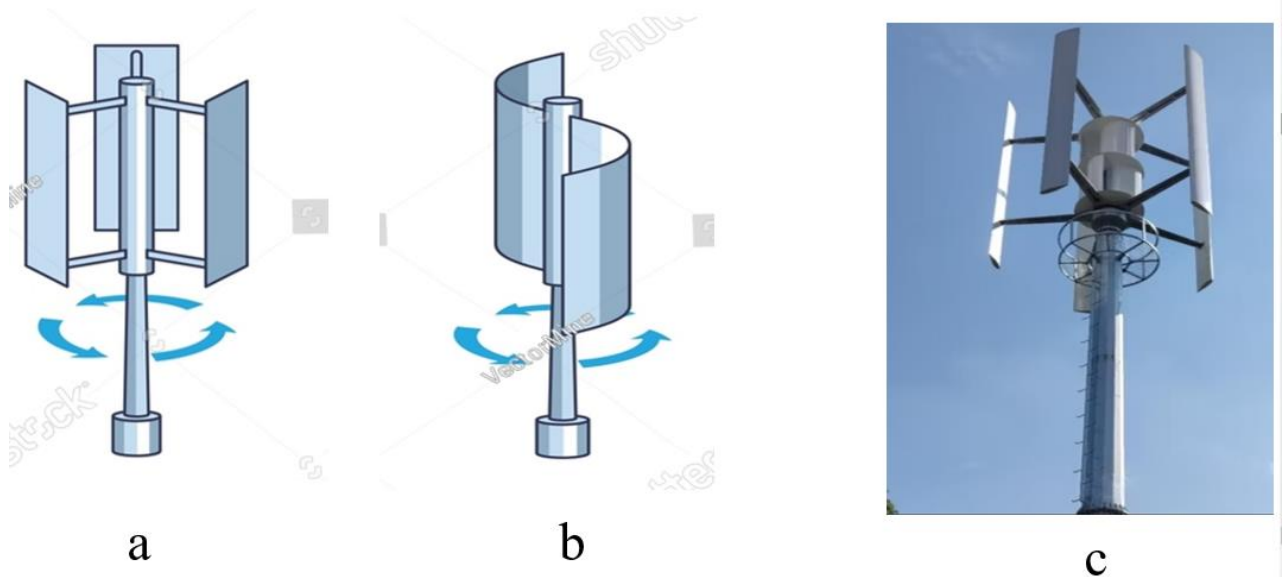


Figura 2: a) Turbina H-Darrieus; b) Turbina Savonius; c) Turbina Híbrida (Savonius + Darrieus)

Diversos estudos têm sido realizados com o objectivo de otimizar a geometria e o desempenho das turbinas híbridas de eixo vertical, sobretudo para ambientes com recursos limitados. Dos quais destacam-se os seguintes trabalhos, El-Kasaby et al. (2020) realizaram uma análise numérica do desempenho de uma turbina híbrida Darrieus-Savonius utilizando simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Os resultados indicaram que a combinação dos dois tipos de turbinas pode melhorar a eficiência geral do sistema, especialmente em condições de vento variável.

Em outro estudo, Chaudhary e Nayak (2015) realizaram uma análise CFD de perfis aerodinâmicos NACA 63-415 para aplicações em turbinas de eixo vertical de pequena escala. Os resultados mostraram que o perfil NACA 63-415 apresentou um bom desempenho em termos de coeficiente de sustentação e razão de sustentação para arrasto, especialmente em ângulos de ataque baixos, o que é benéfico para aplicações em regiões com vento de baixa velocidade.

Gutiérrez-Cuba e Cuba-Torre (2024) realizaram uma avaliação experimental do desempenho de turbinas de vento Savonius, Darrieus e híbridas. O estudo concluiu que a turbina híbrida apresentou

um desempenho intermediário entre as turbinas Savonius e Darrieus, combinando as vantagens de ambas em termos de torque de arranque e eficiência aerodinâmica.

Apesar dos avanços, a literatura ainda apresenta algumas lacunas. Muitos estudos concentram-se em simulações numéricas sem validação experimental em campo, o que levanta questões sobre a aplicabilidade prática dos resultados. Além disso, há uma escassez de pesquisas focadas em condições específicas de regiões tropicais, como Moçambique, onde os padrões de vento e os recursos disponíveis diferem significativamente dos países do hemisfério norte.

Outro aspecto relevante é a limitada aplicação de técnicas de inteligência artificial e algoritmos de otimização avançados, como algoritmos genéticos e redes neurais artificiais, na modelagem e aperfeiçoamento das turbinas híbridas. Essas ferramentas poderiam contribuir significativamente para uma otimização multidimensional automatizada, ajustando geometrias, perfis, ângulos e outros parâmetros de forma inteligente e eficiente.

Diante dessas limitações, justifica-se a presente investigação, que visa desenvolver um modelo de turbina híbrida Savonius-Darrieus otimizado para operação em regiões de vento críticos, como Moçambique, aliando métodos de simulação numérica, escolha criteriosa de perfis aerodinâmicos, análise de viabilidade prática e, futuramente, técnicas de inteligência artificial para aprimoramento dos resultados. Essa abordagem visa não apenas preencher lacunas técnicas e metodológicas, mas também contribuir com soluções energéticas acessíveis, eficientes e sustentáveis, promovendo a inclusão energética e o desenvolvimento local.

CAPÍTULO III

3. Materiais e métodos

3.1. Desenho da pesquisa

Esta secção apresenta com profundidade os procedimentos adoptados na modelagem, simulação numérica e planeamento da optimização de uma turbina eólica híbrida de eixo vertical, composta pelas configurações Savonius e H-Darrieus. O objectivo central foi propor uma geometria optimizada para operação eficiente em zonas de baixa velocidade de vento, como as observadas em diversas regiões de Moçambique. O método adoptado é quantitativo, exploratório e computacional, com base em modelagem tridimensional, análise por Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e planeamento de algoritmos de optimização para avaliação de múltiplas variáveis geométricas e operacionais.

3.2. Materiais e Equipamentos

A realização desta pesquisa exigiu a utilização de uma variedade de materiais, ferramentas computacionais com o objectivo de garantir a precisão na modelagem, simulação e análise do desempenho das turbinas eólicas de eixo vertical híbridas em regiões de vento de baixa velocidade. A escolha desses recursos foi fundamentada na natureza do estudo, que é predominantemente computacional e quantitativo, com foco na optimização de geometrias e avaliação da eficiência energética. Todos os materiais e ferramentas aqui descritos foram seleccionados para permitir a reprodutibilidade e validação futura dos resultados obtidos.

3.3. Softwares e ferramentas computacionais

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi fundamental a utilização de ferramentas computacionais avançadas, capazes de modelar com precisão os perfis aerodinâmicos das turbinas, simular o comportamento do escoamento do ar e analisar o desempenho energético das configurações propostas. A escolha das ferramentas baseou-se na sua capacidade de lidar com geometrias complexas, prever padrões de fluxo em baixas velocidades do vento e fornecer dados confiáveis para a tomada de decisões durante a fase de optimização.

Os programas seleccionados possibilitaram integração entre as etapas de desenho assistido por computador (CAD), simulação de dinâmica de fluidos computacional (CFD), análise de desempenho aerodinâmico e desenvolvimento de códigos personalizados em linguagem Python, facilitando a avaliação comparativa entre diferentes configurações de turbinas.

A seguir, são apresentados os principais *softwares* utilizados e suas respectivas funções no desenvolvimento do trabalho:

Qblade

Utilizado para a simulação e análise de turbinas eólicas de eixo horizontal assim como as de eixo vertical. Foi empregue para calcular o desempenho aerodinâmico de turbinas baseado em métodos de momento de quantidade (BEM) e simulações dinâmicas, permitindo a visualização do torque, potencia e comportamento rotacional em diferentes condições de vento e também para gerar coeficientes de sustentação (C_L) assim como os coeficientes de arrasto (C_D) para diferentes perfis do modelo NACA e com diferentes velocidades de vento e ângulo de ataque.

XFOIL

Ferramenta de código aberto amplamente utilizada para análises de perfis aerodinâmicos (airfoils). No contexto deste trabalho, o XFOIL foi empregue para gerar coeficientes de sustentação (C_L), arrasto (C_D) de diferentes perfis NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), fornecendo dados fundamentais para a análise de eficiência aerodinâmica das pás.

Xoptfoil

Uma extensão do XFOIL voltada para optimização de perfis aerodinâmicos. Foi utilizada para modificar e melhorar o desempenho de determinados perfis, ajustando parâmetros como curvatura, espessura e distribuição da linha média, com o objectivo de obter um melhor desempenho em baixas velocidades de vento.

Autodesk Fusion 360

Usado para a modelagem tridimensional (CAD) das geometrias das turbinas. A criação dos modelos das pás e da estrutura geral foi feita com base nas especificações dimensionais definidas durante o processo de projecto.

Autodesk CFD

Aplicado para análises de dinâmica de fluidos computacional (CFD) iniciais, principalmente para a visualização de escoamento ao redor das pás. Este *Software* foi útil na fase preliminar de validação qualitativa dos modelos desenvolvidos.

ANSYS Fluent

Utilizado para simulações CFD mais avançadas, com foco na análise do comportamento do escoamento em torno das pás da turbina sob diferentes ângulos de ataque e velocidades de vento. Permitiu a avaliação detalhada do campo de pressão, distribuição da velocidade do vento ao longo das pás dos rotores, linhas de corrente e forças aerodinâmicas actantes.

Python

Linguagem de programação aplicada no desenvolvimento de *Scripts* personalizados para análise de dados, automação de cálculos. Este *Software* foi também usado na criação de algoritmos simples de optimização baseados em condições regionais de vento.

Microsoft Excel

Este *Software* foi usado para o armazenamento, organização e análise estatística dos dados obtidos nas simulações e cálculos manuais. Também foi utilizado para gerar tabelas de desempenho e gráficos auxiliares para comparação de resultados.

3.4. Amostra

A amostra deste trabalho foi composta por diferentes configurações de turbinas eólicas de eixo vertical, com foco naquelas que apresentam potencial para operar de forma eficiente em regiões de vento de baixa velocidade, especificamente com velocidades médias inferiores a 5 m/s. Foram incluídas turbinas do tipo Savonius, Darrieus e tipo H e turbinas híbridas (Savonius + Darrieus), considerando-se parâmetros de desempenho aerodinâmico, simplicidade de construção e viabilidade de aplicação em comunidades remotas.

Os critérios de inclusão da amostra envolveram:

- Perfis aerodinâmicos documentados e adequados a baixos números de Reynolds (NACA 0018, NACA 4415 e NACA 63-415);
- Capacidade de operação autónoma e em baixa velocidade de vento (início do movimento com velocidade ≤ 3 m/s);
- Possibilidade de construção local com materiais disponíveis.

Foram excluídas:

- Turbinas projectadas para grandes potências ou com dimensões incompatíveis com o escopo do projecto;
- Geometria com alta complexidade de fabricação ou exigências de componentes importados.

3.5. Procedimentos

A colecta de dados para o presente estudo foi conduzida de forma sistemática e estruturada, com o objectivo de assegurar a precisão e a relevância das informações utilizadas na modelagem computacional e na simulação do desempenho de turbinas eólicas de eixo vertical híbridas (Darrieus +Savonius), voltadas para o bombeamento de água em regiões com baixos índices de velocidade de vento.

O processo foi dividido em etapas sistemáticas, conforme descrito a seguir:

3.5.1. Análise Ambiental e selecção da região crítica

O procedimento iniciou-se com uma análise comparativa das condições ambientais em todas as províncias de Moçambique, com enfoque em dois parâmetros fundamentais para o desenvolvimento do projecto: a velocidade média do vento e a profundidade do lençol freático. Esses dois factores são cruciais para a viabilidade técnica e energética do sistema proposto, sendo que a profundidade influencia directamente na potência necessária para o bombeamento assim como na carga hidráulica exigida para o bombeamento, enquanto a velocidade do vento define a quantidade de energia cinética disponível para a conversão.

As informações sobre as velocidades médias do vento foram obtidas por meio de relatórios técnicos, publicações institucionais e bancos de dados climáticos disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INAM) e outras fontes secundárias de confiança. Os dados relativos à profundidade do lençol freático foram extraídos de estudos hidrológicos publicados por instituições governamentais e académicas (Ministério das Obras Públicas, Habitação e Recursos Hídricos, 2022).

Abaixo está ilustrada uma figura referente ao potencial eólico em Moçambique e os respectivos valores da profundidade média do lençol freático em cada província:

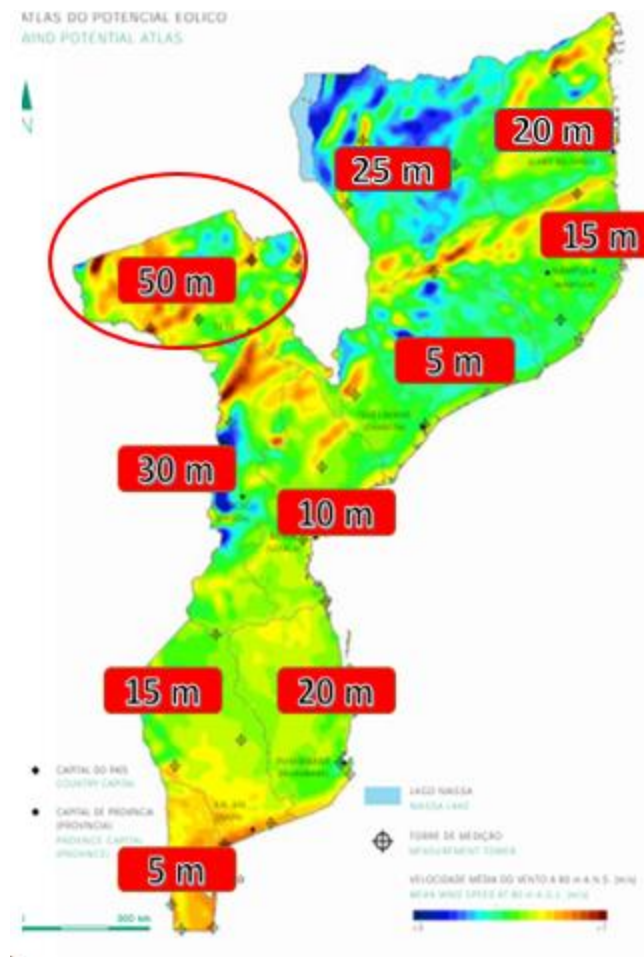


Figura 3: Mapa do potencial eólico em Moçambique e profundidade do lençol freático (Fonte: MOZAMBIQUE-RENEWABLE-ENERGY-ATLAS)

O objectivo desta análise foi identificar a província que apresentasse condições mais críticas para a operação de um sistema de bombeamento movido a energia eólica, o que permitiria validar a robustez e aplicabilidade do projecto mesmo em cenários desfavoráveis. Após a análise comparativa, constatou-se que a província de Tete, localizada na região centro do país, se destaca por apresentar:

- Uma profundidade média do lençol freático em torno de 50 metros, o que impõe um maior valor de potência e uma elevada carga hidráulica para o bombeamento de água;
- Uma velocidade média de vento ligeiramente superior à de outras províncias, oscilando entre 3 e 4,5 m/s, mas ainda considerada baixa para sistemas convencionais de geração eólica.

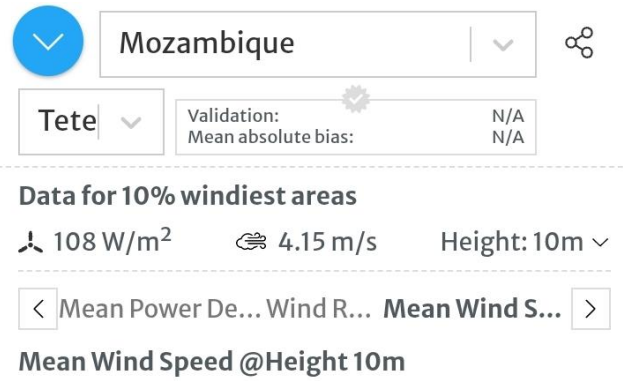


Figura 4: Velocidade média do vento em Tete (Fonte: Wind atlas energy)

3.5.2. Correção da velocidade com a altura

A velocidade do vento varia com a altura em função da rugosidade do terreno. Para se estimar a velocidade à altura de instalação da turbina, utilizou-se a lei de potencial do vento também conhecida como lei exponencial de Hellman, conforme apresentado por (Manwell, McGowan, & Rogers, 2009)

$$V(h) = V_1 \times \left(\frac{V_h}{H_1}\right)^\alpha \quad (1)$$

Onde:

- $V_{(h)}$ – é a velocidade do vento corrigida na altura h [m/s];
- V_1 – é a velocidade conhecida a uma altura de referência H_1 [m/s];
- α – é o expoente de rugosidade do terreno.

A densidade do ar também pode ser ajustada conforme a altitude e a temperatura do local. Em condições ideais ao nível do mar, assume-se $\rho \approx 1,225 \text{ kg/m}^3$, mas para maior precisão, pode-se usar a equação dos gases ideais:

$$\rho = \frac{P}{R \times T} \quad (2)$$

Onde:

- P – é a pressão atmosférica (Pa);
- R – é a constante específica dos gases para o seco ($R = 287 \left[\frac{J}{Kg} \cdot K\right]$);
- T – é a temperatura absoluta (em Kelvin). (Cengel & Boles, 2015)

A seguir é ilustrada a tabela dos valores referentes ao expoente de rugosidade α segundo o tipo de terreno:

Tabela 1: Valores do expoente de Hellman em função da rugosidade do terreno(Fonte: Cengel, 2019)

Lugares planos com gelo	$\alpha = 0,08$ a $0,12$
Terrenos poucos acidentados	$\alpha = 0,2$ a $0,26$
Zonas rusticas	$\alpha = 0,25$ a $0,4$
Florestas altas	$\alpha = 0,30$
Subúrbios arborizados e pequenas cidades	$\alpha = 0,45$
Zona urbana	$\alpha = 0,4$

3.5.1.3. Potência disponível no vento e Potência extraída pela turbina

A potência cinética disponível incidente sobre a área da turbina é calculada utilizando a seguinte expressão:

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (3)$$

Onde: $A = D \times H$ [m^2] (D - diâmetro do rotor e H - altura da pá); P_{vento} – é a potência disponível no vento [W] e ρ – é a massa específica do ar [Kg/m^3]; V – é a velocidade do vento [m/s].

A Equação 3 baseia-se na conservação da energia cinética do fluxo de ar (Heier, 2014). Foi aplicada esta equação da potência disponível no vento para se estimar a quantidade teórica de energia contida no escoamento do ar que atravessa a área varrida pela turbina. Essa relação mostra que a potência cresce com o cubo da velocidade do vento, o que destaca a importância de se conhecer com precisão esse parâmetro na região em estudo (Manwell et. al., 2009).

Entretanto, nem toda Potência contida no vento pode ser extraída por uma turbina. O limite teórico da fracção de energia que uma turbina pode extrair é conhecido como limite de Betz, que estabelece que, no máximo, 59,3% da energia cinética do vento pode ser convertida em energia útil. Esse limite é expresso por:

$$C_{pm\acute{a}x} = \frac{16}{27} \approx 0,593 \quad (4)$$

Esse coeficiente de Potência teórico foi estabelecido por Albert Betz em 1919, demonstrando que nenhuma turbina eólica, por mais eficiente que seja, pode capturar toda a energia do vento sem bloqueá-lo completamente, o que inviabilizaria a continuidade do fluxo (Betz, 1926).

Na prática, as turbinas possuem um coeficiente de Potência real, representado por C_p , que é definido como a razão entre a Potência efectivamente extraída pelo rotor e a Potência disponível no vento. A fórmula usada é ilustrada a seguir:

$$C_p = \frac{P_{Ext}}{P_{vento}} \quad (5)$$

Onde: P_{Ext} é a potência que a turbina extrai do vento e P_{vento} é a potencia total disponível no vento. A Potência efectivamente extraída do vento pela turbina, ou seja, a quantidade de energia cinética que é convertida em energia mecânica útil, é calculada com base no coeficiente de Potência C_p . Esta grandeza representa a eficiência da turbina em converter a energia contida no vento. E a equação usada para determinar essa potencia extraída é expressa por:

$$P_{Ext} = \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (6)$$

Onde: C_p é o coeficiente de Potência da turbina (adimensional).

A Equação 6 mostra que a potência extraída é directamente proporcional ao coeficiente de potência e à densidade do ar, e cresce com o cubo da velocidade. Portanto, mesmo pequenas variações na velocidade do vento resultam em alterações na energia gerada, sendo esse um factor crucial para a eficiência do sistema.

A segunda etapa da colecta de dados foi direccionada à obtenção de parâmetros técnicos destinados à modelagem da turbina híbrida, que serão abordados a seguir:

3.5.3. Selecção e caracterização de perfis aerodinâmicos:

Foram analisados três perfis aerodinâmicos da série NACA: 0018, 63-415 e o 4415. Esses perfis foram escolhidos com base em estudos prévios que indicam seu bom desempenho em vento com baixa velocidade, característica típica de turbinas de eixo vertical. As formas geométricas dos perfis analisados são apresentadas na Figura 5, cuja eficiência em condições de vento de baixa velocidade

já é discutida na literatura (White, 2016). Foram analisados estes 3 perfis afim de definir o perfil mais adequado para o projecto.

As simulações foram realizadas no *Software Qblade*, com velocidade de entrada de 3,66 m/s, ângulo de ataque variando de 0° a 10° , e número de Reynolds característico da região de estudo. A dimensão da corda foi padronizada em 0,7 metros, a fim de permitir a comparação directa entre os perfis.

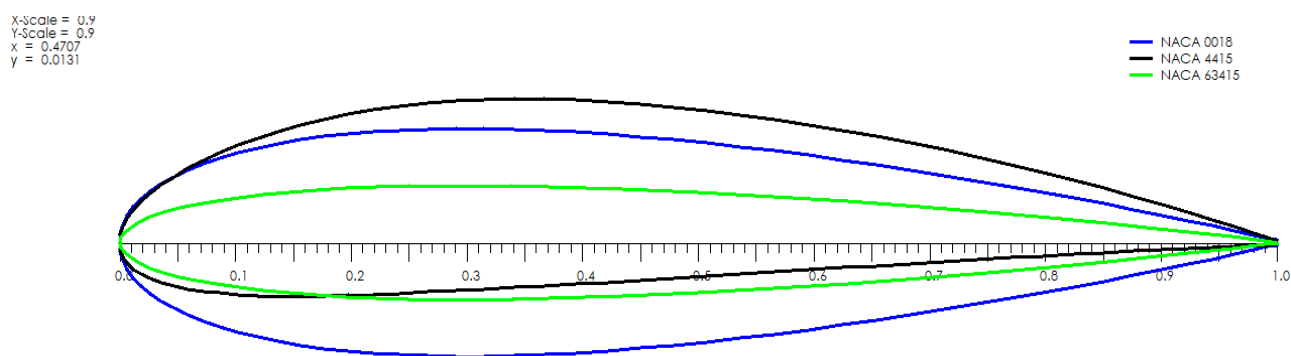


Figura 5: Perfis do modelo NACA analisados (Fonte: Autor)

O NACA 0018 é um perfil simétrico, utilizado frequentemente em análises comparativas. O NACA 4415, com o valor da corda e espessura moderados, é conhecido por sua boa estabilidade em ângulos de ataque variados. Já o NACA 63-415 pertence à série NACA 6, adequada para retardar a transição da camada limite, sendo mais eficiente em baixas velocidade de vento (baixo número de Reynolds), característica predominante em regiões rurais e urbanas de Moçambique.

As geometrias dos perfis foram geradas com base em coordenadas obtidas a partir do site Airfoil Tools e importadas para o Qblade de modo a serem simulados os perfis.

As informações sobre os coeficientes de sustentação (C_L) e arrasto (C_D) para a análise do perfil que apresenta as melhores condições para baixos números de Reynolds foram extraídas do *Software Qblade* e serão apresentados na secção dos resultados e discussões.

3.5.4. Coeficiente de Sustentação (C_L) e coeficiente de arrasto (C_D)

O coeficiente de sustentação foi calculado com base na força que actua perpendicularmente ao escoamento e o coeficiente de arrasto é a força que actua paralelamente ao escoamento e tende a reduzir o desempenho da turbina. Seus coeficientes são obtidos pelas fórmulas a seguir:

$$C_L = \frac{F_L}{0,5 \times \rho \times V^2 \times C} \quad (7) \quad \& \quad C_D = \frac{F_D}{0,5 \times \rho \times V^2 \times C} \quad (8)$$

Onde: C_L e C_D – São os coeficientes de sustentação e arrasto respectivamente (adimensionais); F_L e F_D – são as forças de sustentação e de arrasto respectivamente [N]; e C – é a corda do perfil [m].

Esse parâmetro representado pela Equação 7, expressa a capacidade do perfil em gerar sustentação, o que é essencial para a conversão eficiente da energia do vento em rotação das pás.

Um perfil ideal apresenta alto coeficiente de sustentação (C_L) e baixo coeficiente de arrasto (C_D), garantindo maior eficiência aerodinâmica.

3.5.5. Força de sustentação (Lift Force)

A força de sustentação é uma das principais forças aerodinâmicas que actuam sobre o perfil da pá de uma turbina eólica, especialmente nos rotores do tipo Darrieus. Essa força é gerada perpendicularmente à direcção do vento relativo e resulta da diferença de pressão entre as superfícies superior e inferior da pá, causada pelo formato aerodinâmico. A magnitude da força de sustentação depende da velocidade do vento, da densidade do ar, do coeficiente de sustentação e da área projectada da pá.

A equação que representa essa força é dada pela seguinte expressão:

$$F_L = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times C_L \times A \quad (9)$$

Onde: F_L – é a força de sustentação [N]; V – é a velocidade do vento relativo a pá [m/s]; C_L – é o coeficiente de sustentação (depende do ângulo de ataque e do perfil) e A – é a área projectada da pá [m²].

Essa força é essencial para a geração de torque em turbinas de eixo vertical do tipo Darrieus, sendo responsável pelo movimento de rotação continua quando bem orientada em relação ao vento. O desempenho ideal é alcançado quando o C_L é maximizado e a razão C_L/C_D é elevada.

3.5.6. Força de arrasto (Drag Force)

A força de arrasto actua na direcção do fluxo do vento relativo e representa a resistência que o ar exerce sobre a pá durante o seu movimento. Esta força é particularmente importante nas turbinas do tipo Savonius, que operam predominantemente com base em arrasto diferencial, aproveitando a diferença entre o lado côncavo e convexo das pás. Em turbinas Darrieus, embora o arrasto seja

indesejável por reduzir a eficiência, ele ainda deve ser considerado no cálculo do desempenho aerodinâmico total.

A fórmula que descreve a força de arrasto é:

$$F_D = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times C_D \times A \quad (10)$$

Onde: ρ – é a massa específica do ar [kg/m^3]; C_D – é o coeficiente de arrasto e A – é a área [m^2].

O controlo do arrasto é essencial para a eficiência da turbina, especialmente nos projectos híbridos, onde o equilíbrio entre as forças de arrasto (Savonius) e sustentação (Darrieus) determina o desempenho global.

A seguir serão ilustradas as forças actuantes ao longo do perfil da pá Darrieus:

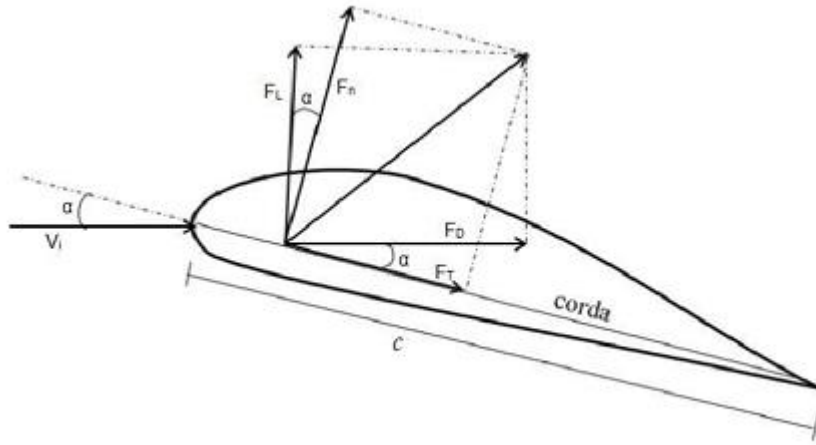


Figura 6: Forças aerodinâmicas no perfil (Fonte: Batista, 2013)

Observam-se as relações geométricas entre as forças e o ângulo de ataque α de acordo com a Figura 6. Obtêm-se as componentes das forças tangencial e normal dadas por:

$$F_T = F_L \times \text{Sen}(\alpha) + F_D \times \text{Cos}(\alpha) \quad (11)$$

$$F_N = F_L \times \text{Cos}(\alpha) + F_D \times \text{Sen}(\alpha) \quad (12)$$

Outro parâmetro importante na análise de desempenho é o número de Reynolds (Re), que define o regime de escoamento em torno do perfil, e é calculado com a fórmula a seguir:

$$Re = \frac{\rho \times V \times c}{\mu} \quad (13)$$

Onde: μ – é a viscosidade dinâmica do ar; V – é a velocidade do vento relativa a pá.

Em turbinas de pequeno porte operando com ventos de velocidade baixa, os números de Reynolds tendem a ser menores, exigindo perfis que mantenham desempenho satisfatório mesmo em escoamentos mais viscosos e instáveis (Seilig & McGranahan, 2004).

3.5.7. Modelagem do domínio e condições de contorno

O domínio computacional foi definido em ambiente bidimensional com formato rectangular, apresentando dimensões 15C na direcção do escoamento (comprimento) e 5C na direcção transversal (altura) segundo recomendações de Bozzi et al. (2014). Onde C representa o valor da corda do perfil. Essa configuração visa minimizar os efeitos de interferência de borda.

A seguir esta ilustrado o domínio computacional em ambiente bidimensional.

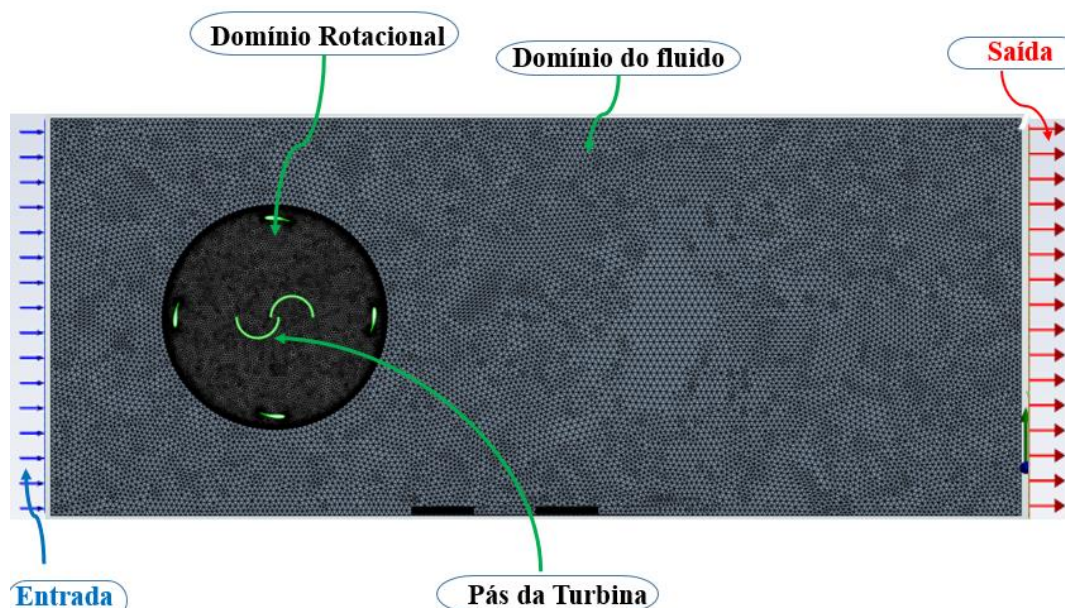


Figura 7: Domínio computacional das simulações (Fonte: Autor)

A Figura 7 mostra a modelagem do domínio usada na simulação, indicando a região de entrada e saída do fluxo, a posição das turbinas e o plano de observação. Também é apresentada a malha computacional, essencial para a representação numérica do domínio e para garantir a qualidade dos resultados obtidos.

Para descrever matematicamente o comportamento do ar, que é tratado como um fluido compressíveis e Newtoniano em baixas velocidades, emprega-se o conjunto de equações conhecidas como equações de Navier-Stokes, combinadas com equação da continuidade.

Para garantir a conservação da massa dentro do domínio, foi utilizada a equação da continuidade. Essa assegura que, ao longo do escoamento, não haja criação nem destruição de massa. Para fluidos incompressíveis, ela é expressa como:

$$\nabla \times \vec{v} = 0 \quad (14)$$

Nesta equação, $\vec{v}$ representa o vector velocidade do fluido em cada ponto do domínio. Essa condição é essencial para manter o equilíbrio de massa no volume de controle, sendo especialmente importante nas simulações em que o vento interage com obstáculos como pás ou suportes da turbina (Verteeg & Malalasekera, 2007)

Para representar a conservação da quantidade de movimento, foi utilizada a equação de Navier-Stokes para fluidos compressíveis. Essa equação permite calcular as forças que actuam sobre o fluido em função da velocidade do ar. A forma utilizada no modelo é:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{v} \times \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f} \quad (15)$$

Nesta equação, ρ é a densidade do ar [Kg/m^3], $\vec{v}$ é o vector velocidade, p é a pressão, μ é a viscosidade dinâmica do ar e $\vec{f}$ representa as forças externas, como a gravidade. A equação de Navier-Stokes foi essencial para prever como o vento se comporta ao passar pelas pás da turbina, permitindo visualizar zonas de baixa e alta pressão, formação de vórtices e regiões de separação de fluxo (Peric, 2002).

Para se definir a interacção entre o vento e o domínio simulado, foram impostas condições de contorno específicas. Na entrada do domínio (*inlet*) foi aplicada a condição de velocidade constante. Na saída do domínio (*outlet*), foi aplicada a condição de pressão estática nula ou de gradiente livre, permitindo que o vento escoasse sem obstruções. Nas pás da turbina foi aplicada a condição de parede com velocidade rotacional, garantido a simulação adequada do movimento da turbina. Já nas paredes, foi aplicada uma condição de parede rugosa, incorporando os efeitos da camada limite terrestre no perfil de vento.

Para representar adequadamente os efeitos da turbulência no escoamento ao redor das pás da turbina, foi utilizado o modelo $K-\omega$ SST (Shear Stress Transport). Esse modelo de turbulência é uma combinação dos modelos $K-\varepsilon$ e $K-\omega$, unindo a precisão do segundo em regiões próximas à parede com a robustez do primeiro em regiões afastadas. A escolha do modelo $K-\omega$ SST se deve à sua capacidade de prever corretamente regiões com separação de fluxo e estol dinâmico comuns nas turbinas de eixo vertical operando em vento de baixa velocidade (Menter, 1994).

As condições de contorno aplicadas estão ilustradas na tabela abaixo:

Tabela 2: Tabela das condições de contorno assumidas na simulação (Fonte: Autor)

Condição de contorno	Tipo/valor aplicado
Entrada (<i>inlet</i>)	3,66 m/s
Saída (<i>outlet</i>)	Pressão estática: 0 Pa
Paredes do perfil	Sem deslizamento
Paredes do domínio	Simetria
Modelo de turbulência	$K-\omega$ SST
Densidade do ar	1,255 Kg/m ³
Viscosidade do ar	1,81 x 10 ⁻⁵ Pa.s
Número de Reynolds (Re)	≈ 700 000
Ângulo de ataque	8°
Tipo de malha	Malha triangular refinada no contorno
Número de nos e elementos da malha	29 555 nos e 56 769 elementos

A simulação foi realizada em regime transiente, com fluxo incompressível, assumindo temperatura constante. As propriedades do fluido (ar) foram $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ e viscosidade dinâmica $\mu = 1,81 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$.

3.5.8. Geração da malha

A malha computacional foi gerada no ANSYS Meshing, onde foi realizada maior refinamento nas regiões próximas às pás (perfil), de modo a capturar adequadamente os gradientes de pressão e velocidade. A Figura 8 apresenta a malha gerada para o perfil Darrieus, enquanto a Figura 9 apresenta para o rotor Savonius. Em ambas as configurações, optou-se por uma malha estruturada, com camadas de refinamento junto às superfícies sólidas.

A seguir será ilustrado o plano de análise com a respectiva malha gerada:

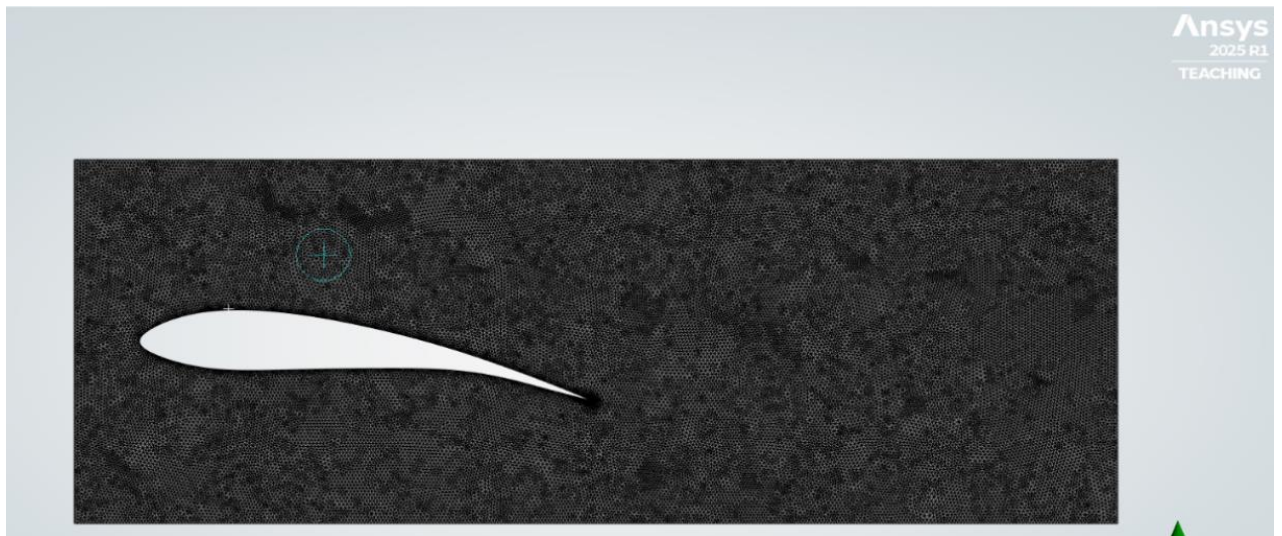


Figura 8: Malha gerada para o perfil Darrieus (Fonte: Autor)

A Figura 8 apresenta a malha gerada para o perfil da pá Darrieus. Essa malha é fundamental para a simulação do escoamento ao redor do perfil, permitindo analisar com precisão o comportamento aerodinâmico da pá e, diferentes condições de operação.

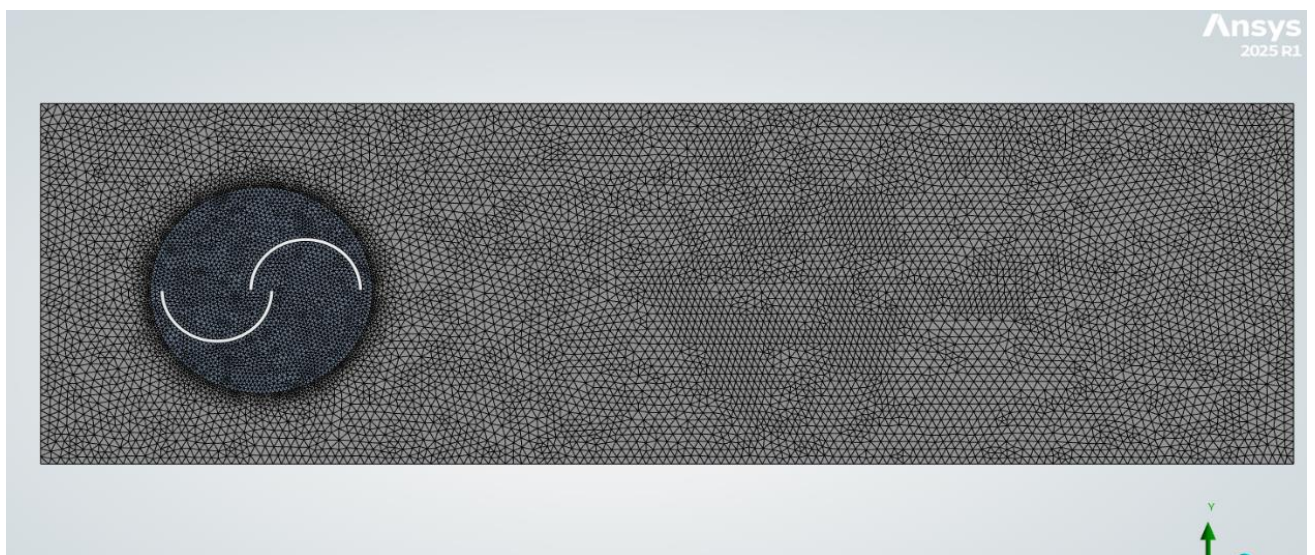


Figura 9: Malha gerada para o rotor Savonius (Fonte: Autor)

A Figura 9 exibe a malha computacional gerada para a turbina Savonius. Essa malha permite capturar os efeitos do escoamento ao redor das pás de geometria curva, sendo essencial para avaliar o desempenho aerodinâmico e a eficiência do rotor em condições de vento reais.

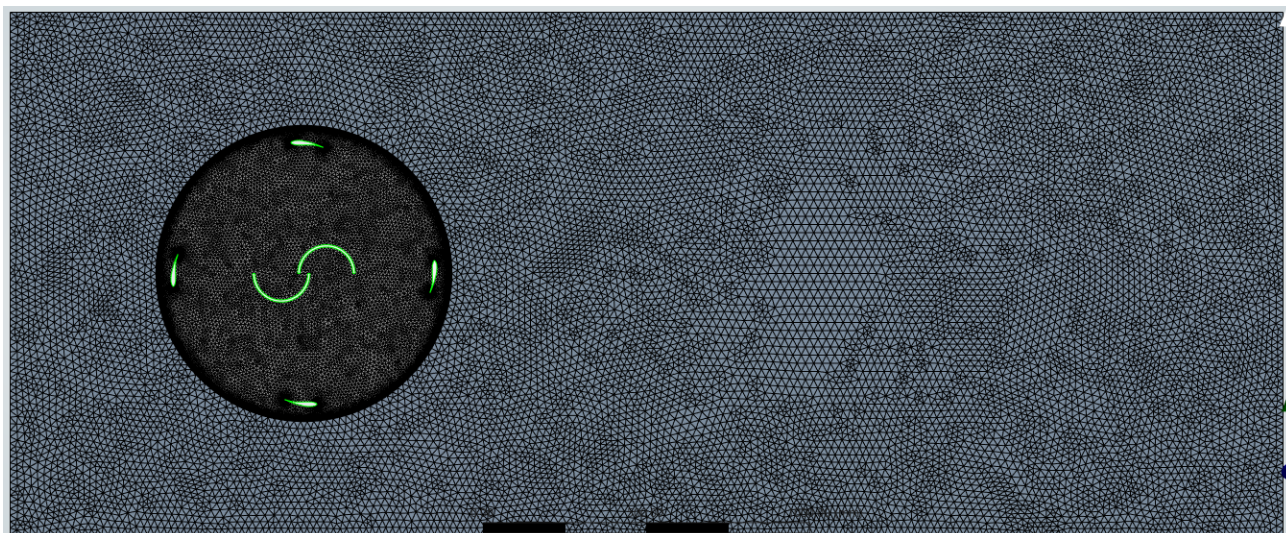


Figura 10: Malha gerada para a turbina híbrida (Fonte: Autor)

A Figura 10 apresenta a malha computacional gerada para o conjunto das turbinas Darrieus e Savonius posicionadas no mesmo plano. A malha foi desenvolvida de forma a garantir uma boa resolução nas regiões críticas, permitindo uma análise precisa da interacção do escoamento entre os dois tipos de rotores.

Foi implementado um refinamento progressivo em torno dos perfis, com inclusão de camada prismáticas (inflation layers) para melhor captura da camada limite, conforme orientações de Ferziger et al. (2020). As malhas computacionais geradas para ambos os casos apresentam aproximadamente 80 000 nos e 200 000 elementos, com refinamento nas zonas próximas às pás da turbina, visando maior precisão na resolução dos gradientes de pressão e velocidade.

3.5.9. Extracção e processamento dos resultados

Os coeficientes de sustentação (C_L) e arrasto (C_D) foram extraídos directamente a partir do pós-processamento do ANSYS Fluent e Qblade. A partir desses dados, foi calculada a razão C_L/C_D , usada como critério principal para selecção do perfil ideal (Manwell, McGowan, 2010). Os resultados foram organizados em gráficos e tabelas para facilitar a análise comparativamente aos outros perfis.

Também foram geradas visualizações de distribuição de pressão, velocidade e linhas de corrente, com o objectivo de identificar zonas de separação do escoamento, distribuição da velocidade ao longo das pás e variações nas superfícies dos perfis.

3.5.10. Optimização do perfil seleccionado

Após a selecção do perfil de melhor desempenho, foi realizada uma etapa de optimização baseada no ângulo de ataque (α). Simulações adicionais foram conduzidas para os ângulos de 0° a 10°, mantendo as demais condições constantes.

Cada variação angular foi simulada individualmente e os coeficientes C_L , C_D e C_L / C_D foram armazenados em tabelas. O ângulo correspondente à maior eficiência aerodinâmica (maior C_L / C_D) foi seleccionado como parâmetro ideal para a futura aplicação na turbina. Essa razão C_L / C_D expressa a eficiência aerodinâmica do perfil, ou seja, sua capacidade de gerar sustentação com o mínimo de resistência ao escoamento.

3.6. Procedimentos para a análise e dimensionamento da turbina Darrieus

A turbina Darrieus foi analisada com o intuito de definir a sua configuração geométrica óptima e aferir o seu desempenho aerodinâmico sob condições de vento com baixa intensidade. Este tipo de turbina é conhecido pela sua elevada eficiência, porém apresenta uma limitação notável: a incapacidade de auto arranque, por esta razão, o seu desempenho foi avaliado de forma rigorosa para garantir que: uma vez iniciado o movimento, o sistema híbrido possa manter a rotação com eficiência energética adequada.

3.6.1. Definição de parâmetro geométricos operacionais

Inicialmente, seleccionou-se o perfil aerodinâmico NACA 63-415, devido ao seu bom comportamento em baixos números de Reynolds e à sua eficiência na razão C_L / C_D . A turbina foi concebida com as seguintes dimensões:

- Altura das pás (H): 6,3 m;
- Diâmetro do rotor (D): 3,5 m;
- Número de pás avaliados: 2, 3 e 4;
- Perfil adoptado: NACA 63-415;
- Ângulo de ataque analisado: 0 a 15°.

3.6.2. Relação de velocidade na ponta da pá (coeficiente de avanço) λ

Um dos parâmetros mais relevantes no dimensionamento foi a razão de velocidade na ponta (TSR- Tip Speed Ratio), que é representado pela seguinte equação:

$$\lambda = \frac{R \times \omega}{v} \quad (16)$$

Onde: λ é a razão de velocidade na ponta; R – é o raio da turbina; ω é a velocidade angular da turbina (rad/s) e V – é a velocidade do vento (m/s).

Para turbinas Darrieus de pequeno porte, a literatura recomenda valores ótimos de TSR entre 1,5 e 2,5 (Mertens, 2006).

Razão de aspecto (Aspect Ratio – AR)

A razão de aspecto foi considerada como parâmetro adicional no dimensionamento, sendo definida como:

$$AR = \frac{H}{D} \quad (17)$$

Onde: H – é a altura das pás Darrieus; D – é diâmetro do rotor (m)

Neste trabalho, com $H = 6,3 \text{ m}$ e $D = 3,5 \text{ m}$, obteve-se $AR \approx 1,8$ e segundo Rezaeiha, Montazeri e Blocken (2017), turbinas Darrieus com razão de aspecto (AR) entre 1,5 e 2 podem apresentar bom desempenho aerodinâmico, especialmente quando são empregues perfis aerodinâmicos adequados e número de pás optimizadas.

3.6.3. Cálculo da corda da pá

A corda da pá é a distância entre o bordo de ataque e o bordo de fuga de um perfil aerodinâmico. No contexto de turbinas eólicas de eixo vertical do tipo Darrieus, a corda tem papel fundamental na geração de sustentação e no controlo do ângulo de ataque ao longo da rotação. Um dimensionamento adequado da corda influencia directamente o desempenho aerodinâmico da turbina, o valor do número de Reynolds e o factor de carga aplicado à pá.

A equação empírica para o cálculo da corda da pá Darrieus é:

$$C = \frac{R}{\lambda \times N_p \times \pi} \quad (18)$$

Onde: C – é a corda da pá [m]; R – é o raio da turbina [m]; λ – é a relação de velocidade na ponta (TSR); N_p – é o número de pás.

A Equação (18) é utilizada para garantir um bom espaçamento entre as pás e um funcionamento estável da turbina, considerando que a área total das pás deve estar em equilíbrio com a área de

varredura do rotor, pois valores muito elevados de corda podem causar sombreamento aerodinâmico entre as pás, enquanto valores muito baixos reduzem a força de sustentação gerada. Por isso, o equilíbrio entre C , R , N_p e λ é essencial para a eficiência do projecto.

3.6.4. Momento de inércia da pá isolada

O momento de inércia de uma pá representa a resistência que ela oferece à aceleração angular em torno de seu próprio centro de massa. Essa grandeza é essencial para avaliar a resposta dinâmica da pá às variações de torque, especialmente em simulações estruturais e de vibração. Quando a pá é modelada como uma placa rectangular fina e homogénea, o momento de inércia pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$I = \frac{1}{12} \times (L^2 + C^2) \times m \quad (19)$$

Onde: I – é a inércia da pá [kg.m^2]; L – é o comprimento da pá [m]; c – é a corda [m].

3.6.5. Optimização do número de pás e ângulo de ataque

A escolha do número de pás foi elaborada com base na análise da estabilidade do torque e do C_p . A configuração com 4 pás foi seleccionada, por oferecer:

- Menor flutuação no momento de rotação;
- Melhor aproveitamento do escoamento;
- Distribuição uniforme das forças sobre o eixo (Bertolini, 2014).

O ângulo de ataque óptimo identificado foi 8° , coincidindo com o ponto de máximo da razão C_L/C_D , que representa o melhor compromisso entre sustentação e arrasto para o perfil NACA adoptado.

3.6.6. Avaliação do torque e da potência

A potência extraída da turbina foi calculada por:

$$P_{Ext} = C_p \times \frac{1}{2} \times \rho \times A_p \times V^3 \quad (20)$$

Onde: P_{Ext} – é a potência extraída [W]; C_p – é o coeficiente de potência; A_p – é a área varrida pelo rotor [m^2] e V – é a velocidade média do vento [m/s].

E o torque médio gerado pela turbina foi obtido através de:

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (21)$$

A área varrida pela turbina foi considerada como $A_p = H \times D$, e as simulações CFD forneceram os valores de pressão, velocidades locais, formação de vórtices e zonas de separação do fluxo/escoamento. Estes dados permitiram validar que, uma vez iniciado o movimento, a turbina Darrieus mantém a rotação com bom desempenho e eficiência energética aceitável (Rezaeiha, 2017).

3.7. Procedimentos para a análise e dimensionamento da turbina Savonius

A turbina Savonius foi submetida a uma análise rigorosa com o intuito de comprovar a sua capacidade de gerar torque de arranque suficiente para iniciar a rotação do sistema híbrido em condições de vento de baixa velocidade.

Este tipo de turbina opera com base no princípio do arrasto diferencial, sendo reconhecida pela sua simplicidade construtiva e fiabilidade em regimes de vento fraco (Kamoji, 2009); (Islam, 2008).

3.7.1. Geometria adoptada e racional construtivo

A configuração seleccionada baseou-se no modelo tradicional de dois baldes semicirculares com uma sobreposição lateral de 20%, o que permite um reforço do diferencial de pressão e, por conseguinte, do torque de arranque (Gupta & Biswas, 2010).

Parâmetros definidos:

- Diâmetro do rotor (D): 0,7 m;
- Altura da pá (H): 2 m;
- Número de estágios: 2;
- Ângulo de fase entre os estágios: 180°
- Número de pás por estágio: 2

Razão de aspecto (AR)

Tal como na Darrieus, a razão de aspecto foi calculada para a Savonius:

$$AR = \frac{H}{D} = \frac{2}{0,7} \approx 2,86 \quad (22)$$

Conforme Gupta & Biswas (2010), razão de aspecto próximos de 3 são consideradas ótimas para turbinas Savonius de dois baldes, equilibrando desempenho e estabilidade mecânica.

3.7.2. Fundamento físico e geração de torque

A turbina Savonius capta o vento nas superfícies das pás de forma assimétrica: a pá côncava sofre maior força de arrasto do que a convexa, gerando uma força resultante que provoca o movimento rotacional.

3.7.3. Coeficientes de arrasto da turbina Savonius

O coeficiente de arrasto C_D representa a resistência que uma superfície oferece ao escoamento do ar. Na turbina Savonius, que opera principalmente com base na diferença de arrasto entre o lado côncavo e convexo da pá, esses coeficientes assumem papel fundamental no torque inicial e no desempenho geral da turbina. Diferentemente das turbinas baseadas em sustentação (como a Darrieus), a Savonius extrai energia da diferença entre essas duas forças de arrasto.

Para projectos preliminares ou simulações computacionais onde não há dados experimentais disponíveis, é pratica comum adoptar valores médios obtidos e em literatura especializada e em testes de túnel de vento. Os valores recomendados são:

- $C_{D1} \approx 1, 2$ (lado côncavo)
- $C_{D2} \approx 0,2$ (lado convexo)

Esses coeficientes são validos para pás com geometria semicilíndrica e orientação a 90° em relação ao vento incidente, o que corresponde ao modelo clássico da turbina Savonius. A diferença entre C_{D1} e C_{D2} assegura a geração de toque positivo, favorecendo o auto arranque do sistema.

Esses valores dos coeficientes de arrasto foram amplamente utilizados por pesquisadores como Savonius (1931), Manwell et al. (2002); e Sharma et al. (2017), sendo compatíveis com experimentos realizados para pequenos sistemas eólicos urbanos e rurais. Embora simples, essa abordagem fornece boa estimativa inicial.

A força de arrasto em cada pá foi estimada por:

$$F_d = \frac{1}{2} \times C_D \times \rho \times A_p \times V^2 \quad (23)$$

Onde: F_D – é a força de arrasto na pá [N]; C_D – é o coeficiente de arrasto; A_p – é a área varrida pela turbina [m²].

E o torque de arranque gerado pelo Sistema é expresso como:

$$T = (F_{D1} - F_{D2}) \times R \quad (24)$$

Onde: T – é o torque [N.m]; F_D – é a força de arrasto nas pás [N]; R é o Raio do rotor [m].

Este torque foi avaliado para velocidades de vento de 3,66 m/s, demonstrando capacidade efectiva de ultrapassar a resistência inicial do sistema (Sheldahl & Blackwell, 1977).

3.7.4. Cálculo do torque gerado pela turbina Savonius

O torque gerado por uma turbina eólica é a mediada da força de rotação aplicada ao eixo do roto, sendo uma das variáveis mecânicas mais relevantes para o dimensionamento e análise de desempenho. No caso da turbina Savonius, o torque resulta da diferença de arrasto entre os dois lados da pá (côncavo e convexo), aproveitando a pressão do vento em superfícies assimétricas. Essa característica torna Savonius particularmente eficiente no auto arranque e na operação em baixas velocidades de vento.

Quando a turbina é construída com múltiplos estágios dispostos verticalmente, o torque total gerado é a soma das contribuições individuais de cada estágio. Sob a hipótese de operação uniforme e condições aerodinâmicas semelhantes entre os estágios, o torque total pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$T_{total} = n \times \left[\frac{1}{2} \times \rho \times A_{estágio} \times R (C_{D1} - C_{D2}) \times V^2 \right] \quad (25)$$

Onde: T_{total} – é o torque total [N.m]; n – número de estágios da turbina; ρ – é a densidade do ar [kg/m³]; $A_{estágio}$ – é a área frontal por estágio [m²] - $A_{estágio} = H_{estágio} \times D$ [m²]; R – raio da turbina; C_{D1} - coeficiente de arrasto do lado côncavo; C_{D2} – coeficiente de arrasto do lado convexo e V – é a velocidade do vento [m/s].

Na Equação 25 multiplicação pelo número de estágios permite adaptar a turbina a aplicação que exigem maior potência mecânica, como o caso de accionamento de bombas de água ou geradores. Essa abordagem modular também facilita o dimensionamento escalonado conforme a altura disponível e o regime de ventos da região de instalação.

3.7.5. Verificação do auto arranque

Para garantir que o torque gerado seja suficiente para iniciar o movimento, foi calculado o momento de inércia do rotor híbrido, aplicando a fórmula a seguir:

$$I = \frac{1}{2} \times m \times R^2 \quad (26)$$

&

$$I_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n m_i \times R \quad (27)$$

Onde: I – é a inércia do sistema [Kg.m^2]; m – é a massa do sistema híbrido [Kg] e R – é o raio da turbina [m].

A aceleração angular resultante é calculada através da seguinte relação:

$$\alpha = \frac{T}{I} \quad (28)$$

Onde: α – é a aceleração angular do sistema híbrido [rad/s^2]; T – é o torque [N.m] e I – é a inércia do sistema híbrido [Kg.m^2].

As simulações mostraram que $\alpha > 0$ com valores praticáveis, comprovando que o sistema é capaz de iniciar a rotação espontaneamente sem auxílio externo.

Outras vantagens do modelo Savonius

- Operação omnidireccional, o que facilita a captação do vento em qualquer direcção;
- Alta robustez estrutural e fácil fabrico (Kumar & Saini, 2016);
- Torque elevado e estável mesmo em regimes de vento turbulento;
- Permite a acoplagem eficiente com a Darrieus, fornecendo arranque e suavidade no funcionando híbrido.

3.8. Integração de ambas as turbinas (Savonius + Darrieus)

Após toda a análise dos parâmetros de cada turbina, passou-se a secção de integrar ambas as turbinas no mesmo sistema, formando uma configuração híbrida vertical. A proposta foi combinar a capacidade de auto arranque da turbina Savonius com eficiência aerodinâmica da turbina Darrieus, garantindo melhor desempenho em regiões com vento com baixa velocidade.

A modelagem do sistema híbrido foi realizada no Autodesk Fusion 360, unificando as duas turbinas num único eixo vertical. A turbina Savonius foi instalada na parte interna da turbina Darrieus, com ambos os centros bem alinhados.

3.8.1. Desenvolvimento do modelo computacional para configuração da turbina híbrida

Como parte integrante da metodologia deste trabalho, propõe-se o desenvolvimento de um modelo computacional em linguagem Python com o objectivo de automatizar o processo de definição da configuração ideal da turbina híbrida Savonius + Darrieus. Esta ferramenta computacional visa tornar o projecto mais adaptável às condições ambientais específicas da região de instalação, optimizando o desempenho da turbina em locais com vento com baixa velocidade.

O modelo aceitará como dados de entrada variáveis como:

- A velocidade média do vento local [m/s];
- O nome da província;
- A Potência útil desejada.

A partir desses dados, o algoritmo utilizara os resultados das simulações numéricas realizadas no software Ansys, Qblade – que contêm informações sobre desempenho aerodinâmico e energético das diferentes configurações simuladas e aplicará regras de decisão pré-programadas para fornecer uma saída automática com os parâmetros geométricos e operacionais recomendados.

Entre os principais dados de saída gerados pelo modelo estão:

- O diâmetro dos rotores Darrieus e Savonius;
- Resultados técnicos;
- O número de estágios do rotor Savonius;
- Relatório do dimensionamento.

Este processo de automatização visa facilitar a aplicação prática do projecto em diferentes províncias de Moçambique, além de permitir adaptações rápidas sem necessidade de novas simulações extensas, promovendo eficiência, reprodutibilidade e maior viabilidade técnica. A escolha da linguagem Python justifica-se pela sua versatilidade, facilidade de integração com outras ferramentas e bibliotecas científicas, como Numpy, Pandas, Scipy e Matplotlib.

3.9. Variáveis

Durante o desenvolvimento e simulação da turbina eólica híbrida, foram consideradas diversas variáveis de natureza física, geométrica e operacional. As principais variáveis adotadas no estudo estão descritas a seguir:

Velocidade do vento (v): Variável independente fundamental, definida com base na média anual da província de Tete. Utilizou-se $3,66 \text{ m/s}$ como valor de referência, por representar uma condição crítica a uma altura de aproximadamente 10 [m] .

Massa específica do ar (ρ): assumiu-se constante e igual a $1,225 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$, correspondente ao nível do mar a $25 \text{ [}^\circ\text{C]}$.

Número de Reynolds: determinado em função da geometria do perfil e velocidade do vento. Teve papel importante na escolha do perfil aerodinâmico e no comportamento do escoamento.

Coefficiente de sustentação (C_L) e coeficiente de arrasto (C_D): obtidos por meio do *software* XFOIL e validados por simulação CFD. Esses coeficientes foram fundamentais para a avaliação do desempenho do perfil NACA analisados.

Razão C_L/C_D : utilizada como critério de selecção do ângulo de ataque óptimo.

Potência gerada (P): avaliada a partir da equação teórica de potência disponível no vento, relacionando a área varrida, a velocidade do vento e o coeficiente de potência.

Coefficiente de potência (C_p): derivado da simulação CFD e considerado como métrica final de desempenho da turbina.

Torque médio e torque de arranque: avaliados nas simulações para fins de validação da eficácia da configuração híbrida (Darrieus + Savonius).

Número de pás: foi uma variável avaliada para 2, 3 e 4 pás para o rotor Darrieus e 2 e 3 para o rotor Savonius. A escolha final (4 pás) para a Darrieus e (2 pás) para a Savonius foi justificada com base em simulações e literatura.

Essas variáveis foram interligadas para garantir que a modelagem numérica estivesse alinhada com a realidade física do sistema proposto e com os objectivos de eficiência energética para bombeamento de água em regiões de vento de baixa velocidade.

3.10. Limitações de estudo

Apesar do rigor metodológico, o presente estudo apresenta algumas limitações que devem ser consideradas na análise dos resultados e nas futuras aplicações do projecto:

- ✓ **Simplicidade do modelo numérico (2D):** as simulações CFD foram realizadas em duas dimensões por restrições computacionais, o que pode não capturar completamente os efeitos tridimensionais, como vórtices de ponta e interferências entre pás.
- ✓ **Modelagem isolada dos rotores:** as análises foram feitas separadamente para as turbinas Darrieus e, futuramente, Savonius. A interacção dinâmica entre os dois sistemas é abordada em etapas posteriores;
- ✓ **Ausência de testes experimentais:** O estudo foi limitado a simulações computacionais. A validação prática por meio de protótipos em campo não foi realizada, o que limita a aplicabilidade directa dos dados simulados;
- ✓ **Assunção de vento constante e laminar:** nas simulações foi utilizada uma condição de vento estável e com padrão uniforme, o que difere da natureza turbulenta e variável do vento real em campo;
- ✓ **Desconsideração de aspectos económicos:** A viabilidade técnica foi o foco do estudo, não sendo abordadas as questões relacionadas a custos de fabricação, manutenção ou retorno financeiro do sistema.

CAPÍTULO IV

4. Resultados e discussões

Nesta secção são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do projecto da turbina eólica de eixo vertical híbrida, com foco em seu desempenho aerodinâmico em condições de vento com baixa velocidade. Os resultados foram organizados de forma a reflectir a sequência lógica das etapas metodológicas, desde a análise do perfil aerodinâmico escolhido, passando pela determinação do ângulo de ataque óptimo, até os dados obtidos por simulação numérica (CFD) para as configurações geométricas propostas.

A análise inicial concentrou-se no comportamento do perfil NACA 63-415, seleccionado com base em sua *performance* em baixos números de Reynolds. Em seguida, foi realizado um processo de optimização do perfil para maximizar a eficiência aerodinâmica, seguido da definição do ângulo de ataque mais adequado para operação da turbina. Posteriormente, foram analisados os efeitos da variação no número de pás da turbina Darrieus, bem como os impactos da geometria (altura e diâmetro) sobre o desempenho energético.

Os resultados obtidos por meio de simulações CFD forneceram informações relevantes sobre o comportamento do escoamento ao redor das pás, incluindo os contornos de pressão, velocidade e geração de vórtices. Além disso, os coeficientes de potência calculados serviram de base para validar a viabilidade da configuração adoptada.

Todos os dados são comparados com dados disponíveis na literatura, de modo a reforçar a coerência técnica e a aplicabilidade do modelo proposto para cenários reais. As implicações práticas dos resultados também são discutidas, especialmente em relação à utilização da turbina híbrida para o processo de bombeamento de água subterrânea em regiões com vento de baixa intensidade.

4.1. Comparação dos perfis aerodinâmicos (NACA 0012, 63-415 e 4415) e selecção do perfil ideal

A escolha adequada do perfil aerodinâmico é um factor determinante para o desempenho de turbinas eólicas de eixo vertical, especialmente em regiões caracterizadas por baixos regimes de velocidade de vento, como é o caso da província de Tete, em Moçambique. Com o objectivo de seleccionar o perfil

mais eficiente para operação em condições críticas, foi realizada uma análise comparativa entre três perfis amplamente utilizados em aplicações eólicas: NACA 0012, NACA 4415 e NACA 63-415.

A seguir, serão ilustrados os perfis NACA analisados:

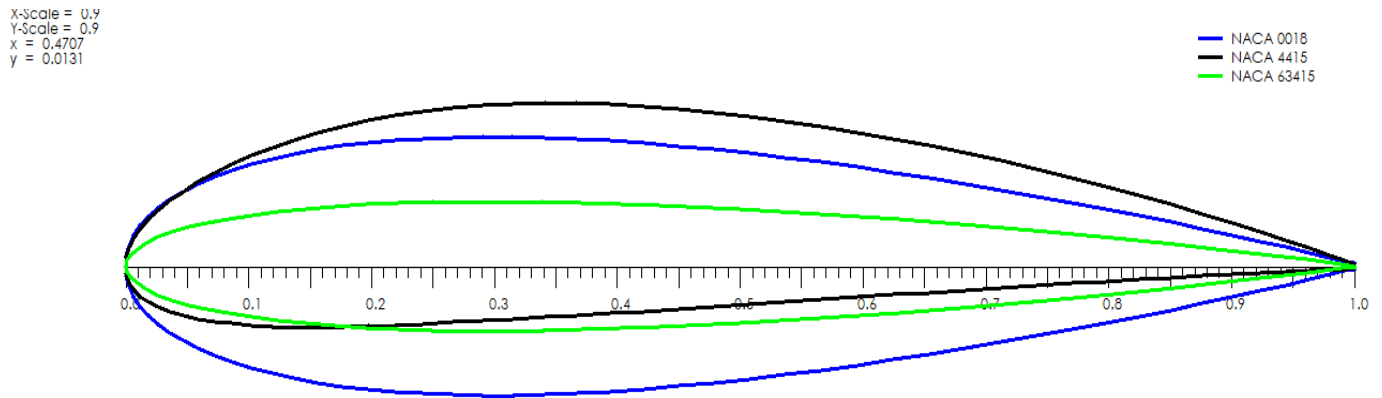


Figura 11: Perfis NACA analisados (Fonte: Autor)

A Figura 11 mostra os três perfis aerodinâmicos analisados no estudo: NACA 0018, NACA 4415 e NACA 63-415. A comparação entre esses perfis permitiu avaliar o impacto da geometria na *performance* da pá e identificar aquele com melhor comportamento aerodinâmico em condições de vento de baixa velocidade.

Os critérios de comparação basearam-se em parâmetros como coeficiente de sustentação (C_L), o coeficiente de arrasto (C_D), a relação C_L/C_D e a estabilidade do escoamento em baixos números de Reynolds, considerando velocidades de vento abaixo de 5 m/s.

As simulações foram realizadas em *softwares* Autodesk CFD, Qblade e o ANSYS, adoptando um modelo de turbulência $K-\omega$ SST, com malha refinada próxima ao perfil e condições de contorno adequadas para simular a actuação da pá em regime estacionário e transiente.

A seguir, apresenta-se a Tabela 3, que resume os principais resultados numéricos obtidos para cada perfil avaliado.

Tabela 3: Comparação dos parâmetros aerodinâmicos simulados (Fonte: Autor).

Modelo do perfil Nº de Reynolds	NACA 0018			NACA 4415			NACA 63-415		
	Âng. de ataque (°)	*C _L	*C _D	Âng. de ataque (°)	*C _L	*C _D	Âng. de ataque (°)	*C _L	*C _D
100 000	0	0	0,012	0	0	0,013	0	0	0
	1	0,106	0,012	1	0,020	0,013	1	0,208	0,019
	2	0,211	0,013	2	0,282	0,013	2	0,388	0,018
	3	0,324	0,014	3	0,444	0,012	3	0,532	0,018
	4	0455	0,015	4	0,516	0,014	4	0,610	0,018
	5	0612	0,016	5	0,580	0,019	5	-	-
	6	0761	0,017	6	0,669	0,024	6	0,755	0,020
	7	0916	0,018	7	0,750	0,032	7	0,819	0,022
	8	0965	0,020	8	0,794	0,044	8	0,882	0,025
	9	0997	0,021	9	0,727	0,088	9	0,945	0,029
	10	1019	0,023	10	0,654	0,102	10	1,010	0,034
300 000	0	0	0	0	0	0,011	0	0	0,008
	1	0,104	0,010	1	0,102	0,011	1	0,204	0,008
	2	0,209	0,010	2	0,204	0,011	2	0,366	0,008
	3	0,313	0,011	3	0,306	0,012	3	0,448	0,009
	4	0,418	0,012	4	0,406	0,012	4	0,523	0,011
	5	0,532	0,013	5	0,505	0,013	5	0,604	0,013
	6	0,681	0,014	6	0,603	0,104	6	0,684	0,016
	7	0,831	0,016	7	0,731	0,016	7	0,765	0,019
	8	0,981	0,017	8	0,801	0,017	8	0,892	0,020
	9	1,024	0,019	9	0,901	0,019	9	1,024	0,022
	10	1,038	0,020	10	0,968	0,021	10	1,069	0,021

Conforme ilustrado na Tabela 3, o perfil NACA 63-415 destacou-se por apresentar os maiores valores do coeficiente de sustentação com baixo coeficiente de arrasto e uma boa relação C_L/C_D , o que indica um excelente desempenho aerodinâmico, sobretudo em condições de baixo número de Reynolds. Este resultado está de acordo com os estudos como o de Hansen (2015), que demonstram a eficiência de perfis laminares com leve curvatura para turbinas de pequena escala.

Para ilustrar de forma gráfica o comportamento dos perfis simulados, apresentam-se a seguir os gráficos das curvas de variação dos coeficientes de sustentação e arrasto em função do ângulo de ataque.

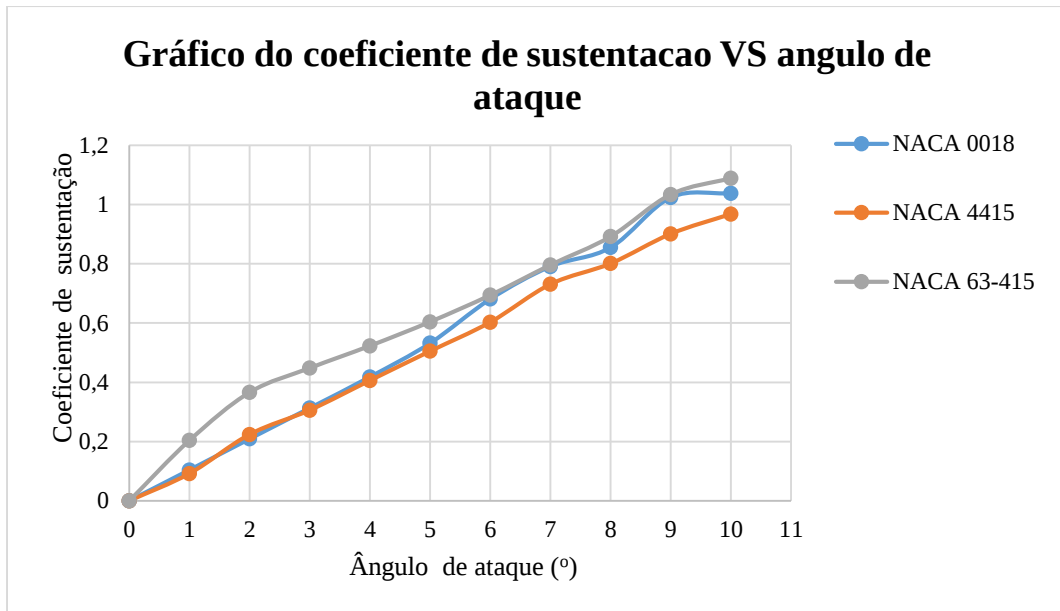


Gráfico 1: Variação dos coeficientes C_L e C_D em função do ângulo de ataque (Fonte: Autor)

O Gráfico 1 apresenta a variação do Coeficiente de sustentação (C_L) em função do ângulo de ataque para os três perfis analisados. A comparação permite observar o comportamento de cada perfil sob diferentes condições de ângulo de ataque.

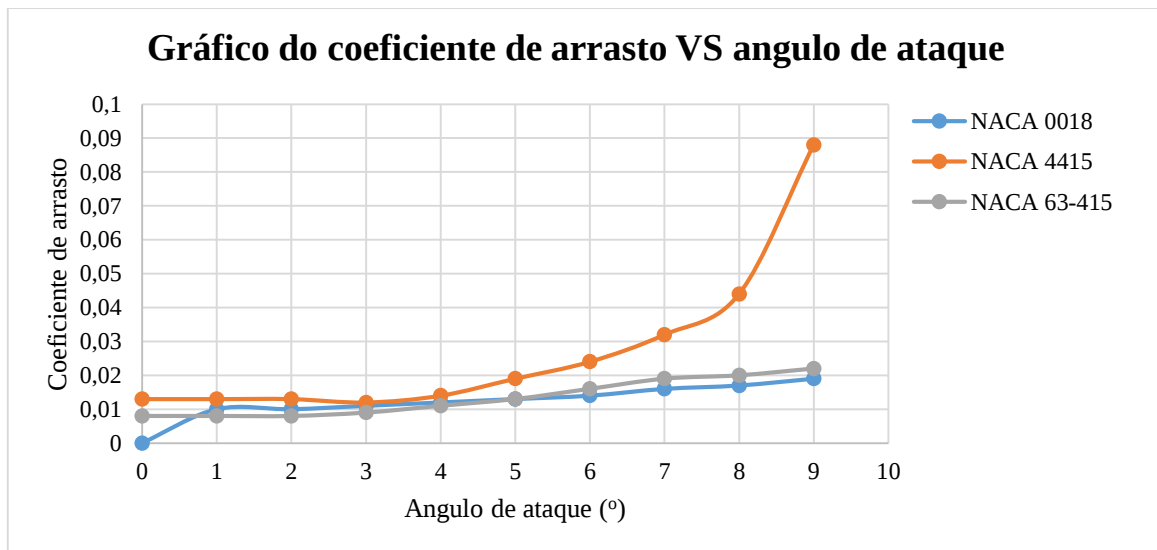


Gráfico 2: Coeficientes de arrasto dos perfis analisados (Fonte: Autor)

O Gráfico 2 mostra o Coeficiente de arrasto (C_D) em função do angulo de ataque para os três perfis.

Com base na análise dos coeficientes aerodinâmicos C_L e C_D para os três perfis considerados (NACA 0018, NACA 4415 e NACA 63-415), constatou-se que o perfil NACA 63-415 apresentou o melhor desempenho aerodinâmico dentro da faixa de ângulos de ataque analisados. Este perfil obteve os maiores valores de sustentação, o que indica uma maior eficiência na conversão de energia do vento em força útil. Além disso, o NACA 63-415 apresentou um comportamento estável com baixo arrasto, característica desejável para melhorar a eficiência da turbina Darrieus.

O perfil NACA 4415, apesar de apresentar valores também elevados para o coeficiente de sustentação, possui também um coeficiente de arrasto mais elevado, o que compromete sua eficiência global. Já o NACA 0018, por ser simétrico, apresenta menor sustentação e, portanto, menor eficiência para a aplicação em questão.

Considerando os resultados obtidos e os objectivos do presente estudo, o perfil NACA 63-415 foi seleccionado como o mais adequado para compor as pás da parte Darrieus da turbina híbrida.

4.2. Optimização do perfil aerodinâmico seleccionado (NACA 63-415) e determinação do ângulo óptimo

Após a selecção do perfil NACA 63-415 como o mais adequado para a aplicação na parte Darrieus da turbina híbrida, conforme discutido na secção anterior, procedeu-se à sua optimização aerodinâmica com base no ângulo de ataque, tendo em conta as condições reais de operação da turbina em regiões de vento de baixa velocidade.

O objectivo desta etapa foi maximizar a eficiência aerodinâmica do perfil, representada principalmente pela razão C_L/C_D garantindo ao mesmo tempo escoamento estável, sem estol precoce, e desempenho satisfatório em velocidades de vento entre 3 e 5 m/s.

A seguir, é ilustrada o perfil NACA 63-415, antes e depois da optimização.

x-scale = 1.0
y-scale = 1.0
x = 0.3972
y = 0.0312

— NACA 63 415 - Optimizado
— NACA 63415

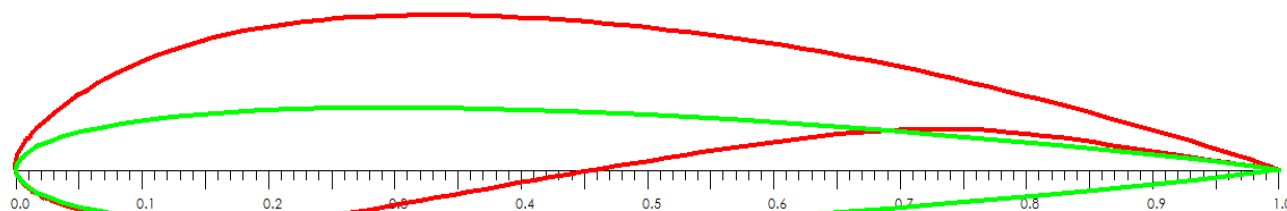


Figura 12: Perfil NACA 63-415, antes e depois da otimização (Fonte: Autor)

A Figura 12, apresenta o perfil NACA 63-415, antes e depois da otimização, evidenciando as melhorias na geometria que contribuem para o aumento da eficiência da turbina.

A seguir apresenta-se a Tabela 4, que resume os valores obtidos do coeficiente de sustentação e coeficientes de arrasto para o perfil já otimizado, considerando as diferentes inclinações testadas da pá em relação ao fluxo incidente:

Tabela 4: Coeficientes de sustentação e arrasto do perfil otimizado (Fonte: Autor)

Ângulo de ataque	Coef_ Sustentação	Coef_ arrasto
0	0,695	0,009
1	0,779	0,009
2	0,904	0,01
4	1,11	0,011
5	1,21	0,011
6	1,306	0,012
7	1,397	0,013
8	1,481	0,014
9	1,556	0,015
10	1,621	0,017
11	1,672	0,02
12	1,648	0,028
13	1,656	0,036

A Tabela 4 apresenta os coeficientes de sustentação (C_L) e de arrasto (C_D) do perfil otimizado em diferentes ângulos de ataque. Os dados confirmam o bom desempenho aerodinâmico do perfil seleccionado, com elevada sustentação e baixa resistência, sendo o mais adequado para aplicação na turbina em regiões de ventos de baixa velocidade.

Nos gráficos a seguir, são apresentados os valores obtidos dos coeficientes de sustentação e arrasto para o perfil otimizado.

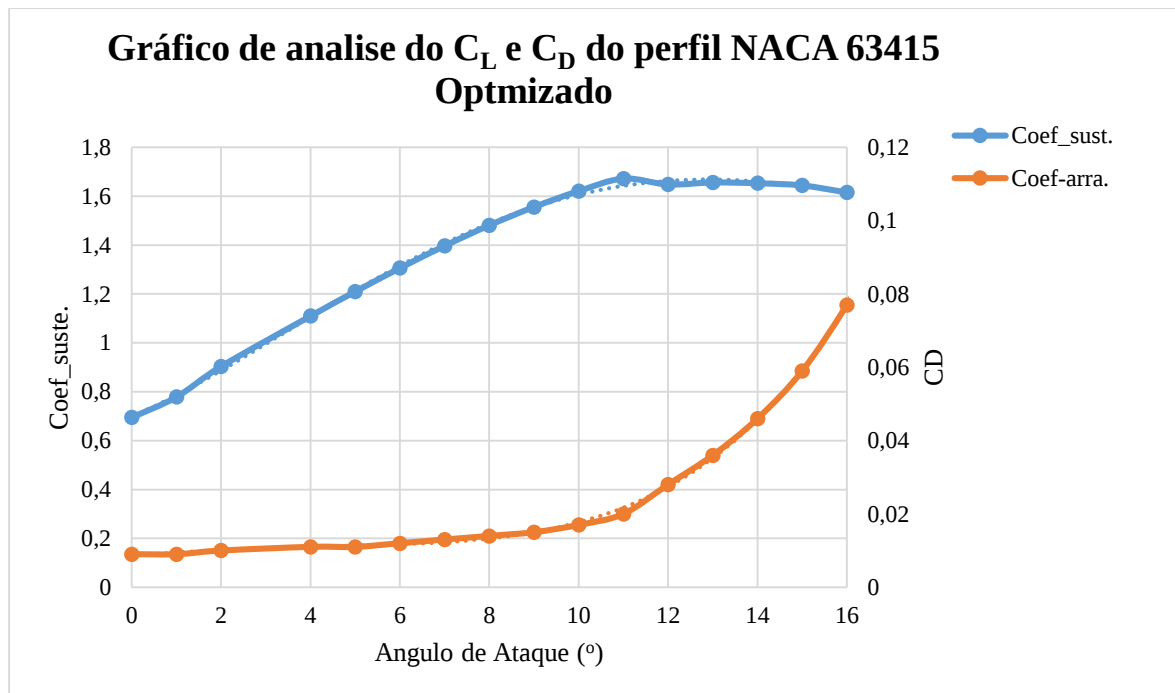


Gráfico 3: Coeficientes de sustentação e arrasto do perfil NACA otimizado (Fonte: Autor)

O Gráfico 3 mostra os Coeficientes de Sustentação (C_L) e arrasto (C_D) do perfil otimizado em diferentes ângulos de ataque. Nota-se que o perfil apresenta boa sustentação e baixo arrasto em certos ângulos, indicando um bom desempenho aerodinâmico.

A otimização do perfil NACA 63-415 trouxe melhorias significativas no desempenho aerodinâmico da turbina. Antes da otimização, o perfil apresentava coeficientes de sustentação (C_L) baixos, especialmente em ângulos pequenos, o que limitava sua eficiência em condições de vento fraco, típicas das regiões alvo deste estudo.

Após ser ajustado para as condições reais de funcionamento (como baixo número de Reynolds e velocidades de vento em torno de 3 m/s) o perfil passou a gerar valores de C_L consideravelmente mais altos. Para um ângulo de ataque de 5°, o C_L aumentou de cerca de 0,604 para 1,21, e em 10° chegou a 1,621, mantendo estabilidade no escoamento e evitando o estol.

A seguir serão ilustrados os gráficos comparativos do perfil NACA 63-415, antes e depois da sua otimização.

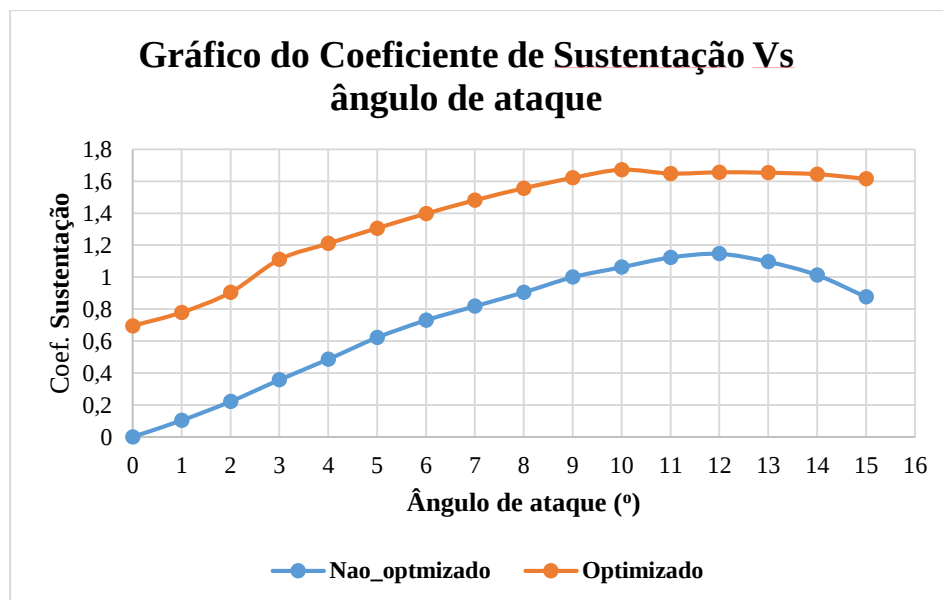


Gráfico 4: Comparação do coeficiente de sustentação do perfil NACA 63-415 (Fonte: Autor)

Do Gráfico 4 observa-se que o perfil otimizado apresenta valores mais elevados e estáveis ao longo do intervalo de ângulo de ataque analisado, o que indica uma maior capacidade de gerar força de sustentação, essencial para a eficiência da turbina. Em contrapartida, o perfil não otimizado apresenta um comportamento mais instável, com variações bruscas e um pico de C_L inferior ao do perfil otimizado. Isso reflecte uma menor eficiência aerodinâmica e maior susceptibilidade a estol.

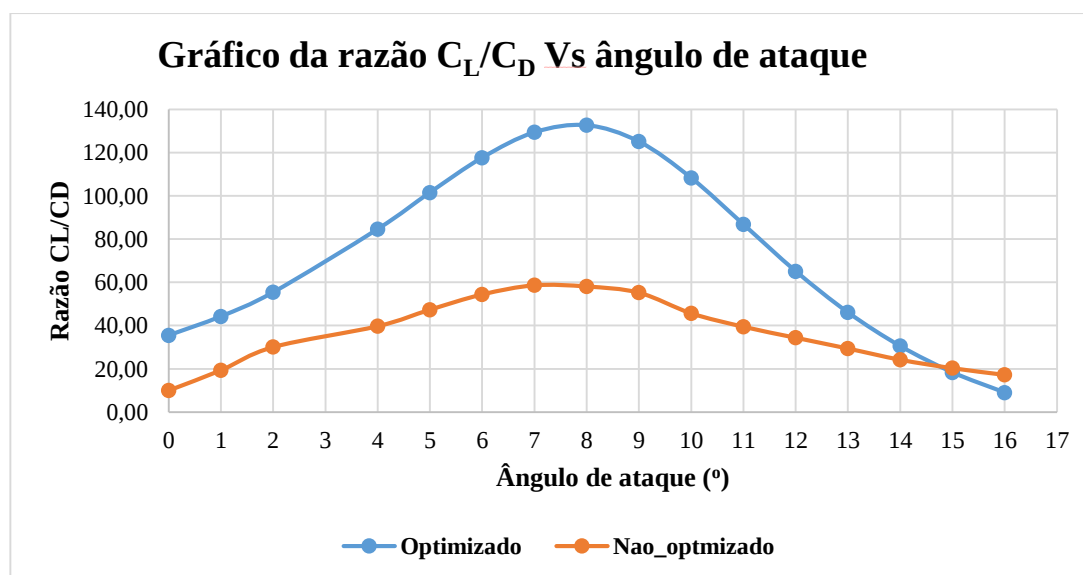


Gráfico 5: Comparação da relação C_L/C_D do perfil NACA 63-415 (Fonte: Autor)

A análise do Gráfico 5 evidencia diferenças significativas entre o desempenho aerodinâmico do perfil otimizado e do não otimizado.

Na análise da razão C_L/C_D , que representa a eficiência global do perfil (sustentação em relação a resistência avanço), o perfil otimizado também se destaca, alcançando valores máximos mais altos e mantendo uma *performance* superior em quase toda a faixa de ângulos. Essa razão elevada sugere que o perfil otimizado consegue gerar mais sustentação com menos arrasto, sendo, portanto, mais eficiente em converter a energia do vento em movimento rotacional útil.

Esses resultados confirmam a importância da otimização dos perfis aerodinâmicos, especialmente em turbinas de eixo vertical operando em regiões de vento de baixa velocidade.

4.2.1. Determinação do ângulo de ataque ótimo para o perfil otimizado

Após a obtenção dos coeficientes de sustentação (C_L) e arrasto (C_D) para o perfil NACA otimizado sob diferentes ângulos de ataque, procedeu-se à análise da razão C_L/C_D , parâmetro que representa diretamente a eficiência aerodinâmica do perfil. Essa razão permite identificar o ponto de operação no qual a pá gera máxima sustentação com menor arrasto possível, sendo, portanto, o melhor indicador para a escolha do ângulo de ataque ótimo.

A seguir, apresenta-se o gráfico da razão C_L/C_D em função do ângulo de ataque, o qual permite visualizar de forma clara o ponto de máximo desempenho do perfil otimizado:

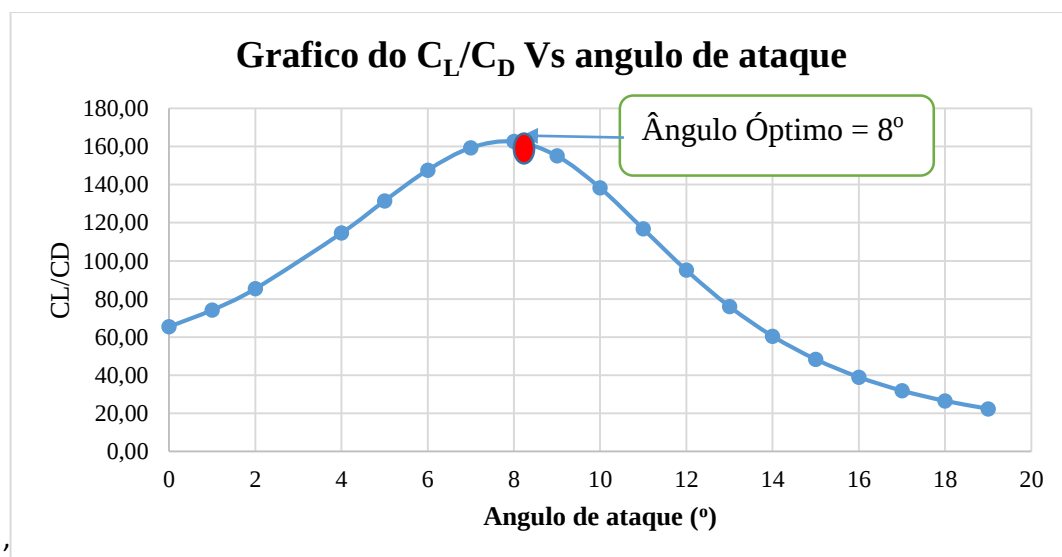


Gráfico 6: Determinação do ângulo ótimo (Fonte: Autor)

O Gráfico 6, apresenta o comportamento da razão C_L/C_D em função do ângulo de ataque, que é um parâmetro principal na escolha do ângulo de ataque ótimo.

A escolha do ângulo de ataque ótimo foi fundamentada por meio de uma análise Matemática da equação de regressão de 6ª ordem ajustada aos dados obtidos nas simulações. A equação da curva foi definida como: $y = -0,0003x^6 + 0,0143x^5 - 0,2336x^4 + 1,3181x^3 - 1,2218x^2 + 7,8593x + 66,005$.

Onde: Y – representa a eficiência e X – o ângulo de ataque ótimo.

Utilizou-se um processo de otimização numérica no intervalo $[0^\circ, 18^\circ]$, correspondente à faixa analisada, para encontrar o ponto de máximo da função. O resultado da otimização indicou que o valor ótimo ocorre em: $X \approx 7,65$ e $Y \approx 159,22$, ponto ótimo $\approx (7,65; 159,22)$.

Esse ponto representa o melhor desempenho aerodinâmico da pá, justificando a selecção do ângulo de ataque de aproximadamente 7,65 graus como o mais eficiente para a configuração analisada.

Sendo assim, o ângulo de ataque ótimo determinado neste estudo é de 8° , o qual será adoptado nas etapas finais de modelagem tridimensional e análise global da turbina híbrida Savonius-Darrieus.

4.2.2. Comparação da distribuição de pressão e velocidade: perfil otimizado VS não otimizado.

Com o objectivo de validar os ganhos obtidos no processo de otimização do perfil aerodinâmico NACA 63-415, realizou-se uma análise comparativa entre os resultados de escoamento para o perfil em sua forma original (não otimizado) e para o perfil após otimização. A comparação foi feita com base em dois parâmetros fundamentais: distribuição de pressão e campo de velocidades ao redor da pá, ambos obtidos por meio de simulação CFD sob condições idênticas (vento à 3 m/s , e $\alpha = 8^\circ$, modelo de turbulência: K- ω SST).

Essa análise permite visualizar, de forma qualitativa e quantitativa, como a optimização influencia a geração de sustentação, a estabilidade do escoamento e a eficiência geral da pá.

Antes da apresentação dos resultados aerodinâmicos, são ilustradas as malhas geradas para os rotores simulados, com o objectivo de evidenciar a qualidade e a resolução espacial adoptada nas simulações.

A seguir, apresenta-se a malha para o rotor Darrieus.

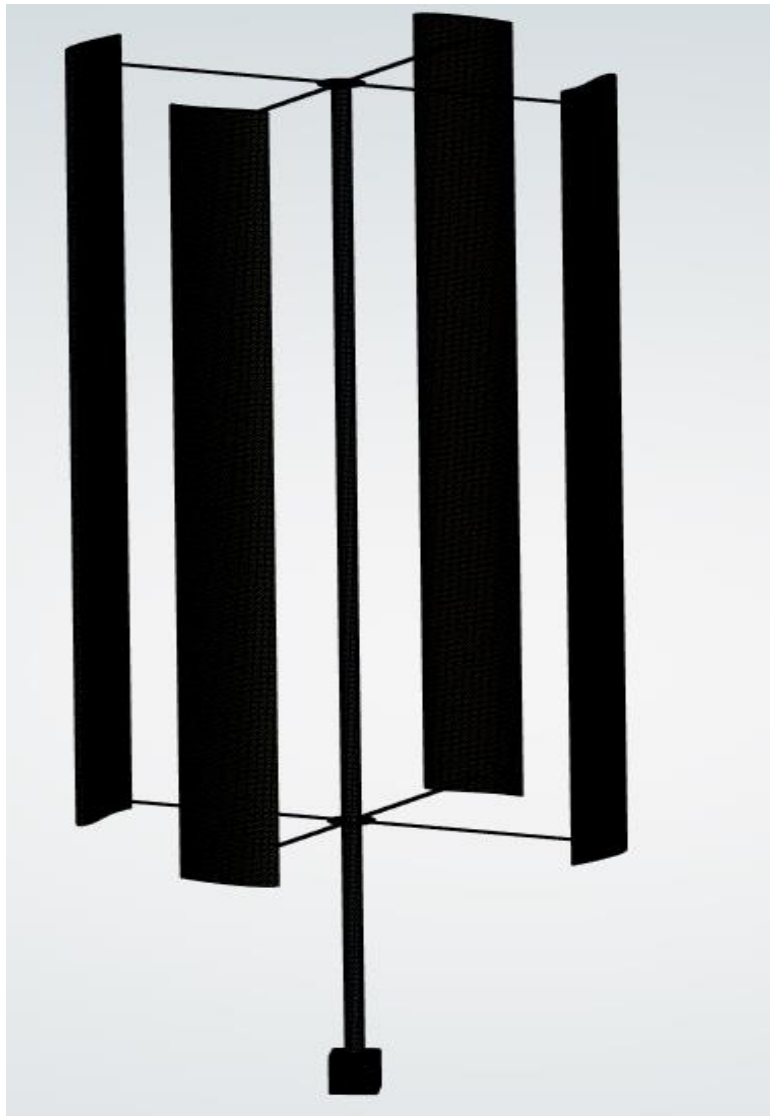


Figura 13: Malha gerada para o rotor Darrieus (Fonte: Autor)

A Figura 13 apresenta a malha computacional gerada ao longo de toda a turbina Darrieus. A malha foi construída de forma a capturar com precisão o comportamento do escoamento em torno das pás, permitindo simulações mais realistas do desempenho aerodinâmico da turbina.

A seguir, são ilustradas as distribuições de pressão estática e distribuição de velocidade sobre o perfil NACA 63-415, comparando-se os casos não otimizado e otimizado, ambos simulados para um ângulo de ataque de 8° . As Figuras 14 e 15 mostram a distribuição de pressão ao longo do perfil antes da otimização e as Figuras 16 e 17 mostram a distribuição de pressão ao longo do perfil otimizado.

I. Perfil não otimizado

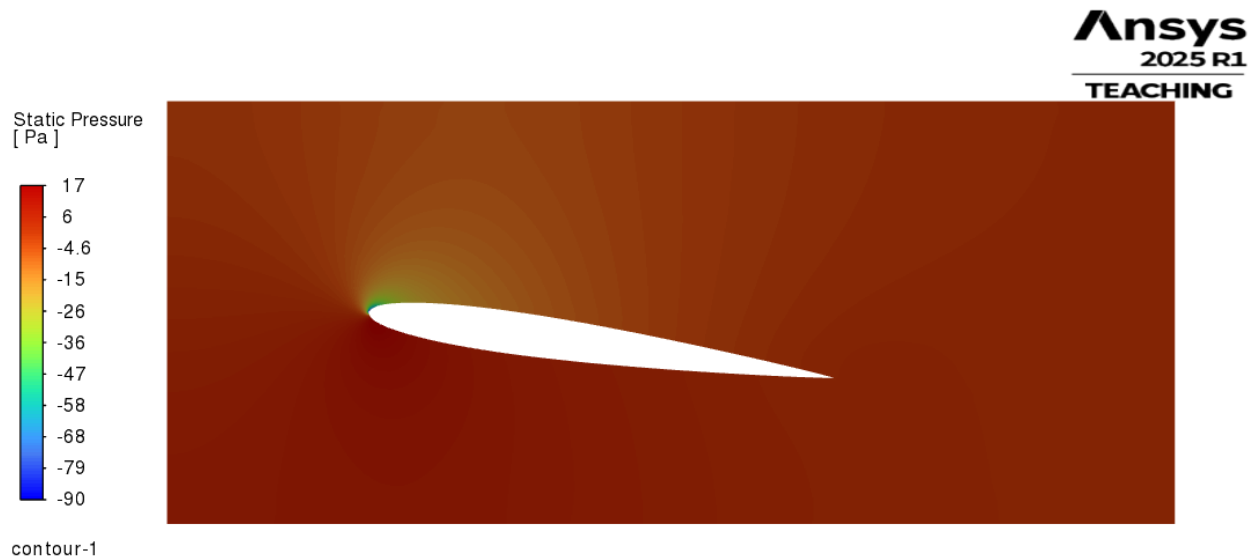


Figura 14: Distribuição de pressão estática ao longo do perfil NACA não otimizado (Fonte: Autor)

A Figura 14 mostra a distribuição de pressão estática ao longo do perfil não otimizado. Observa-se uma variação significativa da pressão entre as superfícies do perfil, indicando menor eficiência aerodinâmica.

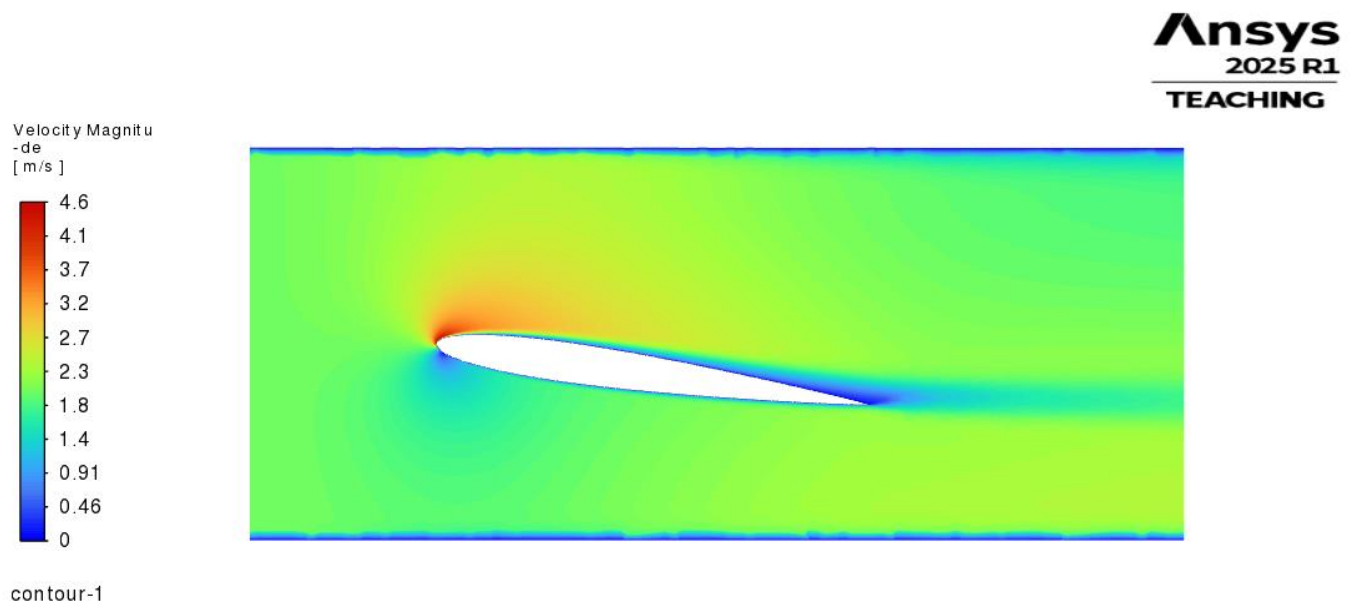


Figura 15: Distribuição da velocidade ao longo do perfil não otimizado (Fonte: Autor)

A Figura 15 apresenta a distribuição de velocidade ao longo do perfil não otimizado. É possível observar regiões de aceleração e desaceleração do fluxo, evidenciando perdas aerodinâmicas que afetam o desempenho.

I. Perfil otimizado (Distribuição de pressão e Velocidade)

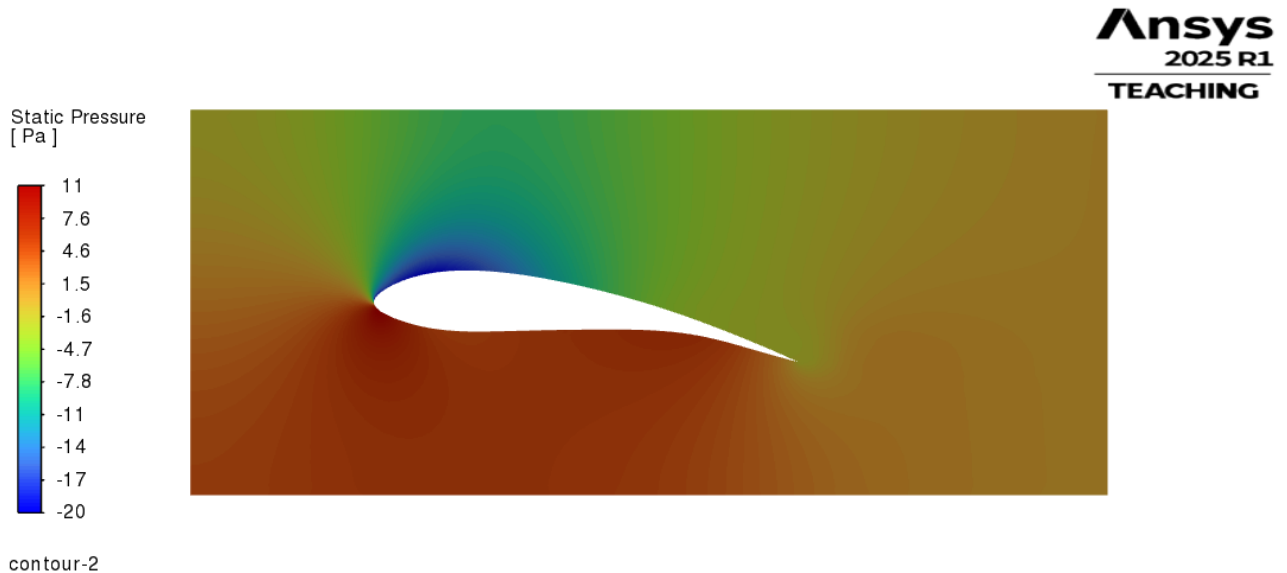


Figura 16: Distribuição de pressão estática ao longo do perfil NACA otimizado (Fonte: Autor)

A Figura 16 mostra a distribuição de pressão estática ao longo do perfil otimizado. Nota-se uma distribuição mais equilibrada em comparação ao perfil não otimizado, indicando melhor desempenho aerodinâmico e maior eficiência na geração de sustentação.

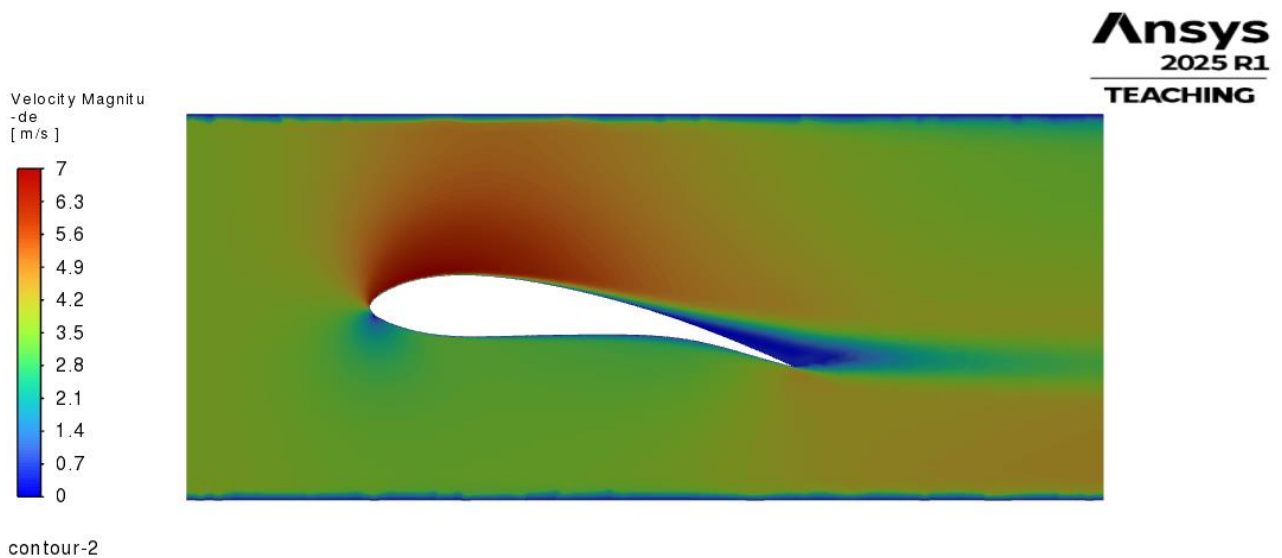


Figura 17: Distribuição da velocidade ao longo do perfil otimizado (Fonte: Autor)

A Figura 17 apresenta a distribuição de velocidade ao longo do perfil otimizado. Observa-se um escoamento mais uniforme e acelerado sobre a superfície superior, o que contribui para maior sustentação e melhor desempenho aerodinâmico em relação ao perfil não otimizado.

A comparação das distribuições de pressão e velocidade entre o perfil NACA 63-415 não otimizado e o otimizado evidencia claramente os ganhos aerodinâmicos alcançados com o processo de ajustes às condições reais de operação da turbina híbrida.

No caso do perfil não otimizado, observa-se uma distribuição de pressão pouco eficiente, com diferença modesta entre a face superior e inferior, resultando em baixa geração de sustentação. A distribuição de velocidade também indica fluxo com baixa aceleração sobre a face superior e tendência à separação do escoamento, factores que comprometem a eficiência da pá e aumentam o risco de estol em operação real.

Em contraste, o perfil otimizado demonstra um escoamento muito mais eficiente: a região de baixa pressão sobre a face superior está bem definida e distribuída, maximizando a sustentação gerada. Além disso, a velocidade do escoamento sobre essa mesma face é significativamente maior, indicando uma aceleração suave e aderente do fluxo, sem recirculação ou zonas de separação. Isso contribui directamente para o aumento da razão C_L/C_D , melhora a estabilidade da turbina e reduz perdas de energia.

Esses resultados confirmam que o perfil otimizado apresenta maior eficiência aerodinâmica, melhor aproveitamento do vento disponível e maior confiabilidade operacional, contribuindo directamente para o desempenho da parte Darrieus da turbina híbrida projectada.

4.2.3. Resumo da escolha do perfil e do ângulo óptimo

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que a optimização do perfil NACA 63-415 resultou em melhorias significativas no desempenho aerodinâmico, especialmente em condições de vento de baixa velocidade. O perfil otimizado apresentou valores mais elevados de sustentação, melhor razão C_L/C_D , além de escoamento mais uniforme e estável,

A determinação do ângulo de ataque óptimo, realizada com base na razão C_L/C_D , indicou que o ângulo de 8° proporciona o melhor equilíbrio entre sustentação e arrasto, maximizando a eficiência aerodinâmica. Este valor está em conformidade com a literatura.

Segundo Islam et al., (2008), para perfis do tipo NACA aplicados em turbinas Darrieus de pequena escala, os melhores desempenhos são alcançados, geralmente em ângulos entre 7° e 12°, variando conforme o número de Reynolds. Da mesma forma, Paraschivoiu (2002) também aponta que o desempenho óptimo de turbinas Darrieus ocorre dentro dessa faixa, especialmente em aplicações de baixa velocidade.

Estudos como o de Ferreira et al. (2010) indicam que perfis otimizados para condições reais de operação são capazes de adiar o estol, aumentar a sustentação e reduzir o arrasto, o que foi possível ser observado neste trabalho com o perfil otimizado.

Os resultados obtidos aqui não apenas validam as escolhas realizadas, como também estão coerentes com o comportamento documentado na literatura especializada. O uso do NACA 63-415 otimizado com ângulo de ataque de 8° estabelece uma base sólida para as etapas seguintes do projecto, garantindo desempenho confiável e eficiente da parte Darrieus da turbina híbrida, mesmo sob condições críticas de vento.

4.3. Avaliação do número de pás, TSR e coeficiente de potência do rotor Darrieus

Após a selecção do perfil aerodinâmico otimizado e do ângulo de ataque ideal, prosseguiu-se com a análise dos parâmetros operacionais fundamentais que influenciam directamente o desempenho da parte Darrieus da turbina híbrida: o número de pás, a relação de velocidade da ponta da (TSR) e o coeficiente de potência.

A análise foi conduzida com base em simulações CFD utilizando o perfil NACA 63-415 otimizado, já definido na secção anterior, fixando-se o ângulo de ataque em 8°. Os testes foram realizados com configurações de 2, 3 e 4 pás, variando o TSR entre 0,01 e 2,5, sob velocidade de vento constante de 3,66 m/s. o modelo de turbulência $K - \omega$ SST foi mantido em todas as simulações para garantir consistência na avaliação do escoamento.

A escolha do número de pás influencia directamente o torque de arranque, a suavidade da rotação e o desempenho aerodinâmico geral. Menor número de pás tende a favorecer velocidade mais altas e melhor eficiência (maior C_p), porém com menor torque inicial. Já a relação de velocidade na ponta (TSR) é um dos principais parâmetros operacionais de turbinas de eixo vertical

A seguir, apresentam-se os gráficos gerados nas simulações, que mostram a variação do coeficiente de potência em função da TSR para diferentes números de pás.

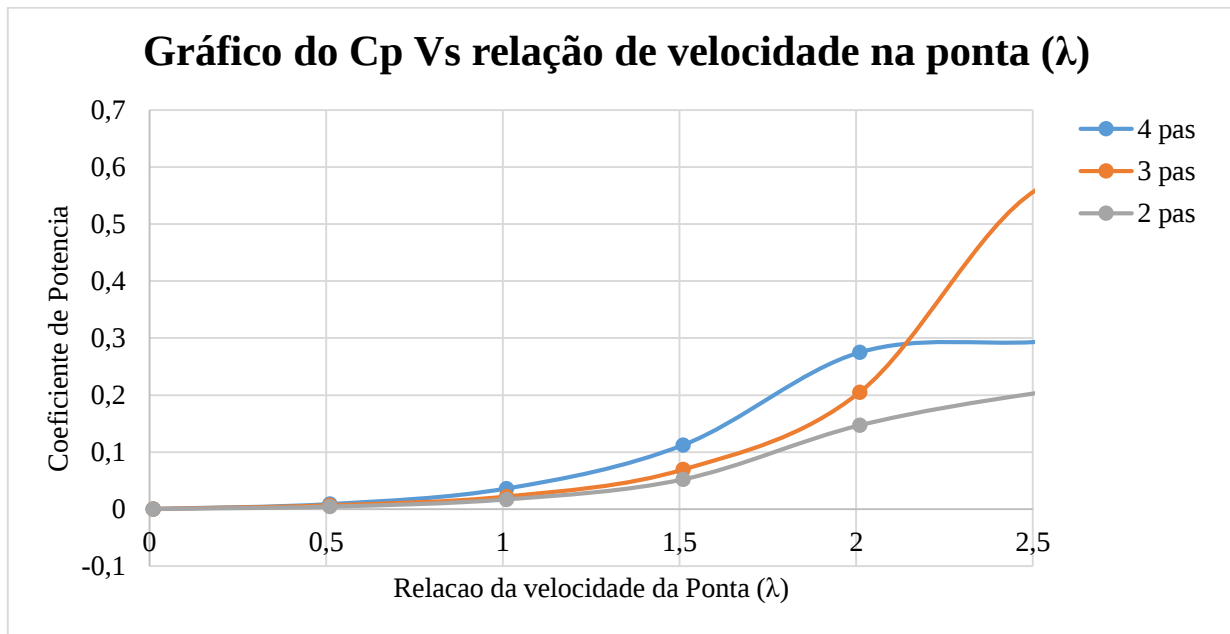


Gráfico 7: Análise do número de pás do rotor Darrieus (Fonte: Autor)

A partir da análise dos resultados numéricos do Gráfico 7, observou-se que a configuração com 4 pás apresentou os maiores valores de coeficiente de potência C_p , principalmente em faixas de relação de velocidade na ponta (TSR) mais baixas.

Isso indica que, embora a adição de pás possa aumentar o arrasto aerodinâmico, o ganho em torque e estabilidade do escoamento foi mais significativo, contribuindo para maior extracção de energia do vento nas condições simuladas.

Em configurações com 2 e 3 pás, notou-se um desempenho aerodinâmico inferior, sobretudo em baixas TSR, o que é coerente com o esperado para perfis com menor área de captação inicial. No entanto, essas configurações tendem a apresentar maior eficiência apenas em altas velocidades de ponta, o que não é o foco do presente trabalho.

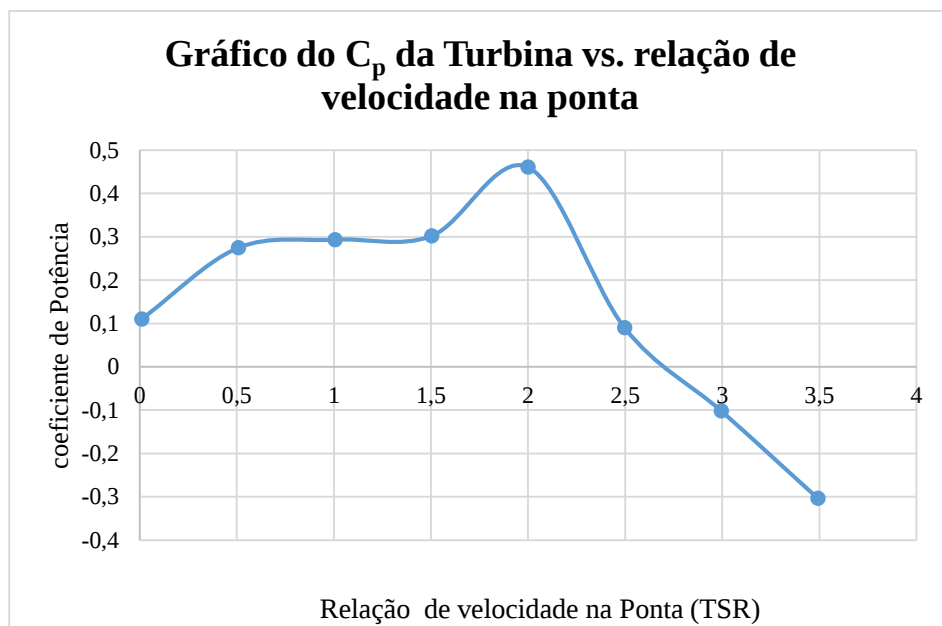


Gráfico 8: Análise do coeficiente de potência da turbina em função do TSR (Fonte: Autor)

No Gráfico 8 que relaciona C_p e TSR, verificou-se que o valor máximo de C_p ocorreu para $TSR \approx 2$, sendo este o ponto ótimo de operação da turbina. Valores abaixo dessa faixa indicaram menor conversão de energia (embora com alto torque), enquanto valores acima de 2 resultaram em aumento do arrasto e queda de desempenho.

Com base nos resultados obtidos, a configuração com 4 pás e $TSR = 2$ apresentou o melhor desempenho aerodinâmico, com coeficiente de potência superior às demais opções testadas.

Estes resultados estão em conformidade com a literatura. Segundo Paraschivoiu (2002), o aumento do número de pás em turbinas Darrieus tende a favorecer o torque inicial e a suavidade de rotação, sendo recomendado para aplicações de baixa velocidade de vento. Da mesma forma, Islam et al., (2008) destacam que valores ótimos de TSR para turbinas de eixo vertical variam geralmente entre 1,8 e 2,2, sendo a faixa mais eficiente para maximizar C_p sem comprometer a estabilidade do escoamento.

A seguir, apresenta-se a configuração geométrica da turbina Darrieus com 4 pás, definida com base na análise dos parâmetros de desempenho.

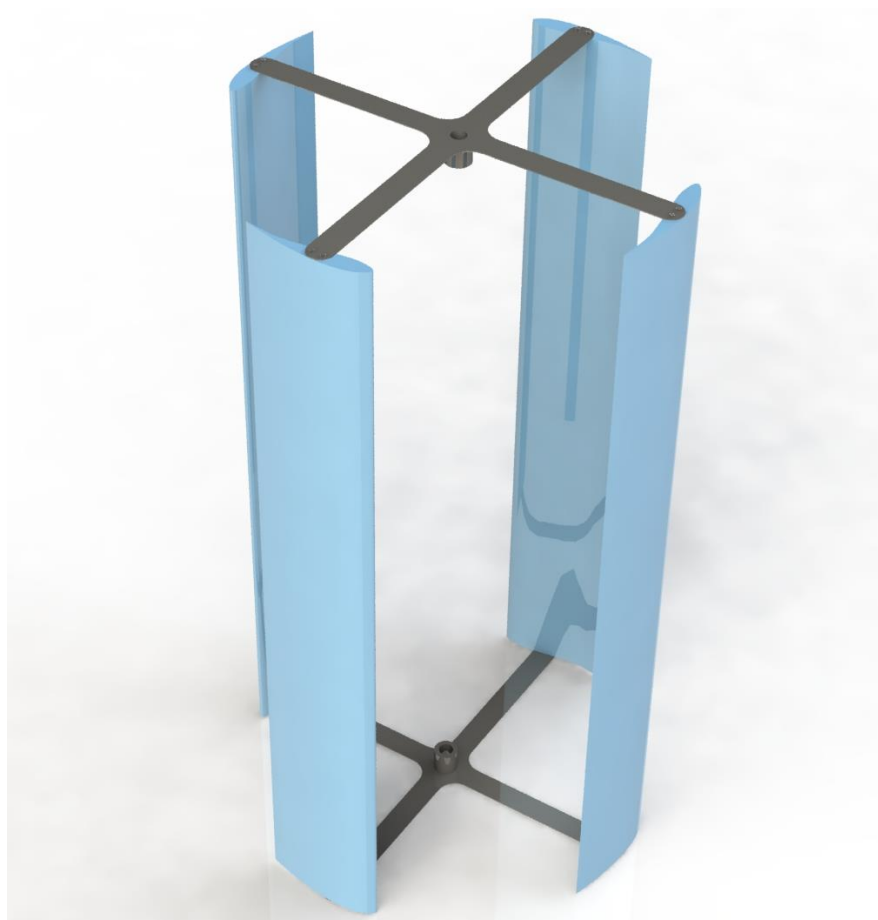


Figura 18: Rotor Darrieus com 4 pás (Fonte: Autor)

A Figura 18 apresenta o desenho da turbina Darrieus com quatro pás. Essa configuração visa melhorar a captação de energia e garantir maior estabilidade no funcionamento, especialmente em zonas com ventos de baixa velocidade.

A seguir, apresenta-se a tabela técnica com os principais parâmetros da parte Darrieus da turbina híbrida, definidos com base em simulações, aplicação de fórmulas anteriormente mostradas, critérios de projecto e referencias da literatura. A tabela contempla geometria, desempenho aerodinâmico e condições operacionais ideais para a turbina.

Tabela 5: Especificações técnicas do rotor Darrieus (Fonte: Autor)

Parâmetro	Valor	Unidade
Perfil aerodinâmico	NACA 63-415 (otimizado)	-
Número de pás	4	-
Diâmetro do rotor	3,5	<i>m</i>
Altura das pás	6,3	<i>m</i>
Altura de colocação	3,7	<i>m</i>
Área varrida	23,31	<i>m</i> ²
Tip Speed Ratio (TSR)	2	-
Ângulo de ataque	8	<i>Graus (°)</i>
Coeficiente de potência	0,45	-
Velocidade de vento	3,66	<i>m/s</i>
Velocidade de partida	≈ 2 – 3	<i>m/s</i>
Velocidade nominal	≈ 3 – 6	<i>m/s</i>
Rotação nominal	≈ 40	<i>rpm</i>
Eficiência mecânica	0,85	
Potência útil	≈ 290	<i>W</i>
Potência extraída	≈ 390	<i>W</i>
Potência disponível no vento	≈ 660	<i>W</i>
Velocidade angular	≈ 4,19	<i>rad/s</i>
Torque gerado	≈ 100	<i>N.m</i>

Os dados apresentados na Tabela 5, delineiam de forma clara o dimensionamento do rotor Darrieus, evidenciando que a configuração adoptada (4 pás, TSR = 2, perfil NACA 63-415 a 8°) possibilita um desempenho eficiente em regimes de vento de baixa velocidade.

4.4. Análise dos resultados para o rotor Savonius

Nesta subsecção apresentam-se os resultados da simulação do rotor Savonius, com foco principal na análise do torque de arranque e do comportamento aerodinâmico em baixa velocidade de vento. O objectivo é validar sua contribuição na fase inicial de operação da turbina híbrida.

A seguir, são apresentados os contornos de pressão e velocidades ao redor das pás do rotor Savonius, considerando um escoamento com velocidade de 3 m/s. estas figuras permitem observar o padrão de escoamento e a distribuição de forças responsáveis pela geração de torque.

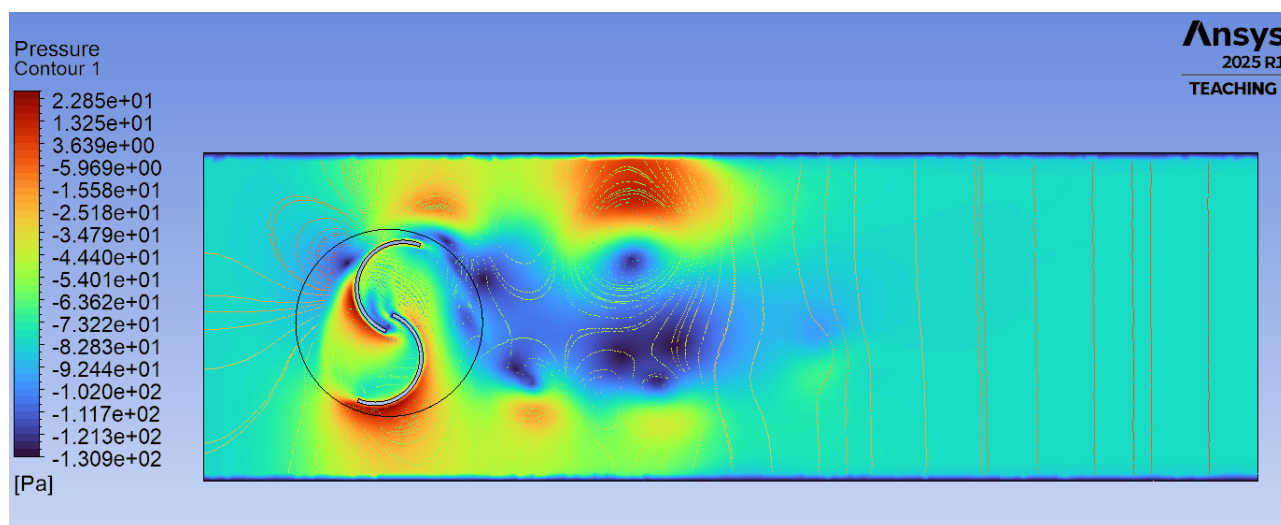


Figura 19: Distribuição de pressão ao longo da turbina Savonius (Fonte: Autor)

A Figura 19 apresenta a distribuição de pressão estática ao longo da turbina Savonius. Nota-se um diferencial de pressão entre as faces côncava e convexa das pás, o que evidencia o princípio de funcionamento baseado na força de arrasto.

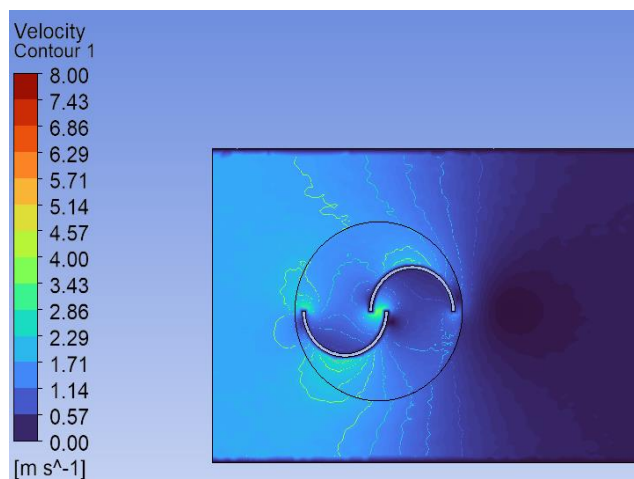


Figura 20: Distribuição de velocidade no rotor Savonius (Ang. = 0°)

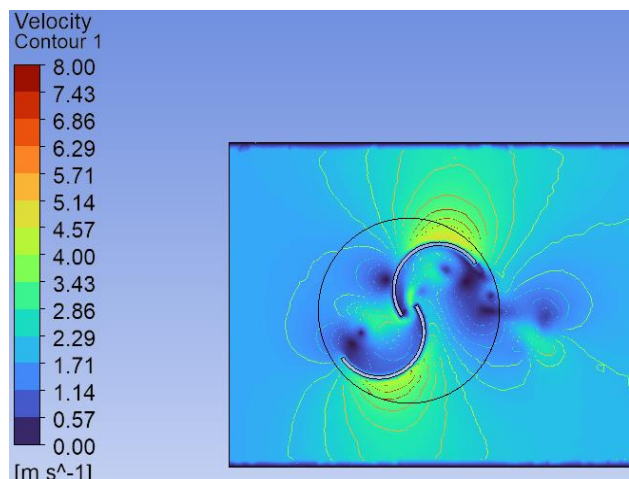


Figura 21: Distribuição de velocidade no rotor Savonius (Ang. = 45°)

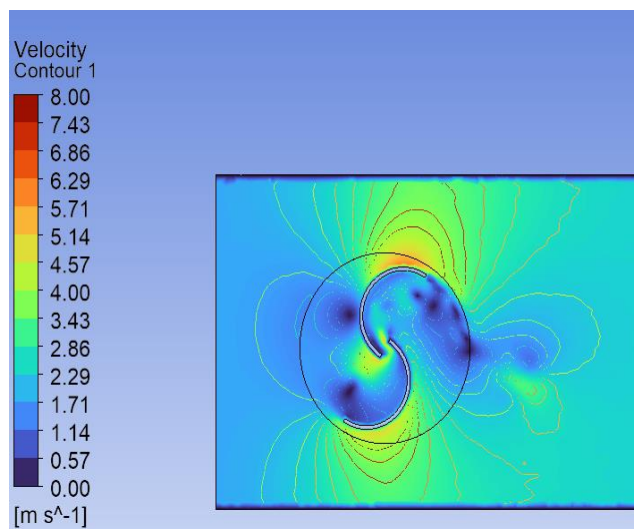


Figura 22: Distribuição de velocidade no rotor Savonius (Ang. 75°)

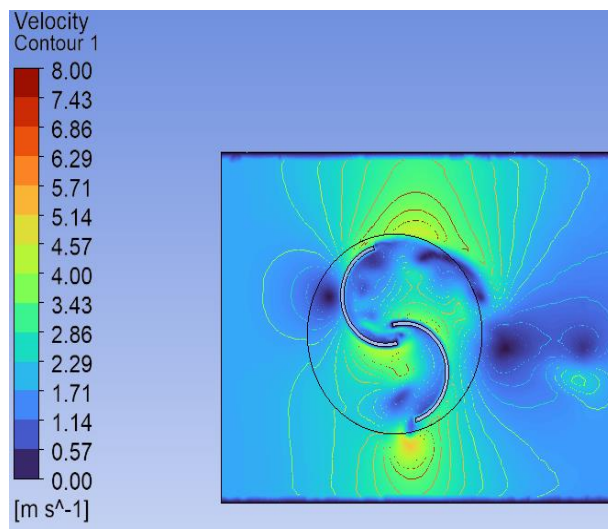


Figura 23: Distribuição de velocidade no rotor Savonius (Ang. 110°)

Nota-se na Figura 19 a presença de uma diferença de pressão significativa entre as regiões côncava e convexa das pás, o que resulta em torque positivo desde os instantes iniciais da rotação. Essa diferença de pressão é a principal pela geração de força desequilibrada nas pás, promovendo o movimento rotativo e, conseqüentemente, a geração de torque. Nas Figuras 20, 21, 22 e 23, a distribuição de velocidade mostra regiões de maior velocidade ao redor da pá que avança, indicando o desvio do fluxo e a aceleração local do vento, o que contribui para o aumento da força resultante na direção de rotação. A combinação dessas distribuições confirma a eficácia do perfil da Savonius em converter energia do vento em torque útil, especialmente em baixa velocidade de vento

A seguir, apresenta-se a geometria do rotor Savonius modelado, utilizada nas simulações para a análise do torque de arranque e comportamento aerodinâmico em baixas velocidades de vento.

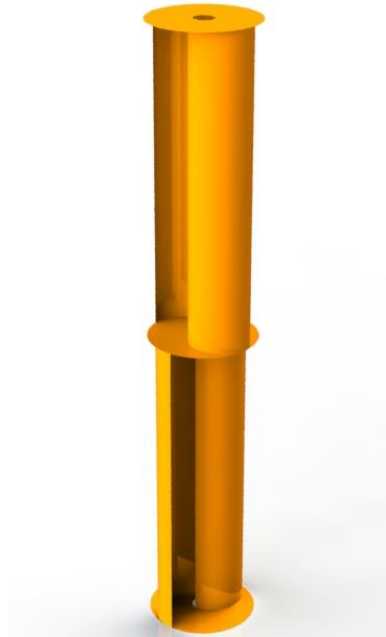


Figura 24: Rotor Savonius (Fonte: Autor)

A Figura 24 apresenta o rotor Savonius com dois estágios. Essa configuração em múltiplos níveis permite melhor aproveitamento do vento ao longo da altura da turbina, aumentando o torque gerado e melhorando o desempenho em ventos de baixa velocidade.

A seguir, apresenta-se a tabela técnica com os principais parâmetros da parte Savonius da turbina híbrida, definidos com base em simulações, aplicação de fórmulas anteriormente apresentadas, critérios de projecto e referências.

Tabela 6: Parâmetros técnicos do rotor Savonius (Fonte: Autor)

Parâmetro	Valor	Unidade
Tipo de rotor	Savonius clássico	-
Número de pás por estágio	2	-
Número de estágios	2	
Altura por estágio	2	<i>m</i>
Diâmetro do rotor	0,7	<i>m</i>
Rotação nominal	40	<i>rpm</i>

Sobreposição das pás	20%	-
Torque de arranque	≈ 100	<i>N.m</i>
Velocidade angular	4,19	<i>rad/s</i>

4.4.1. Resumo do dimensionamento da turbina híbrida

O dimensionamento dos rotores Darrieus e Savonius foi conduzida com base nas condições operacionais definidas para a região alvo, caracterizado por velocidade de vento reduzido (3 m/s). Os parâmetros geométricos e operacionais adoptados demostram-se adequados para garantir o desempenho pretendido de 250 W.

Para o rotor Darrieus, a adopção de quatro pás, um TSR igual 2 e um perfil aerodinâmico optimizado (NACA 63-415) permitiram alcançar um coeficiente de potência eficiente, conforme observado em trabalhos como o de Paraschivoiu (2002). A rotação nominal de 40 *rpm*, associada à velocidade angular de 4,19 *rad/s*, levou a um torque útil de aproximadamente 100 *N.m*, coerente com a potência desejada.

No caso da Savonius, o modelo de duas pás por estágio com sobreposição de 20% e dimensões de 0,7 m de diâmetro e 2 m de altura apresentou torque de arranque suficiente para vencer a inércia do sistema. A actuação inicial da Savonius é coerente com os estudos de Saha et al., (2008), que destacam sua função de auto arranque, mesmo com eficiências aerodinâmicas baixas.

Assim, os dados obtidos validam o dimensionamento de ambos os rotores, com base técnica e bibliográfica sólida.

Para reforçar avaliação do desempenho inicial, apresenta-se o gráfico do torque gerado ao longo do tempo de simulação, o comportamento do torque evidencia a capacidade da Savonius de iniciar a rotação em regime de vento fraco.

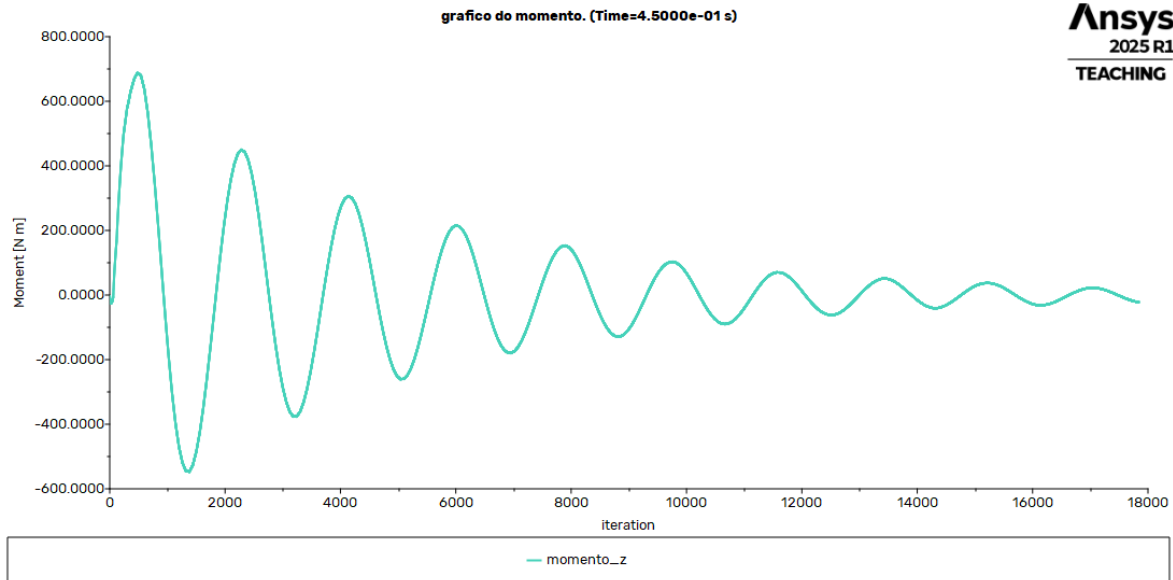


Figura 25: Gráfico do torque da turbina Savonius (Fonte: Autor)

O Gráfico 25 mostra que o torque gerado pelo rotor Savonius apresenta inicialmente picos mais elevados e oscilatórios, o que é característico durante os primeiros instantes de rotação, quando o rotor ainda está a vencer a inércia do sistema. Esses picos de torque são essenciais para garantir o auto arranque da turbina híbrida, especialmente em velocidades de vento reduzidas.

À medida que o tempo avança, observa-se uma redução progressiva na amplitude das oscilações de torque, indicando que o rotor já superou a fase crítica do arranque. Essa estabilização do torque demonstra que, após colocar o sistema em movimento, a contribuição da Savonius se torna secundária, permitindo que o rotor Darrieus, mais eficiente, assuma a geração principal da potência.

Este comportamento reforça a escolha da configuração híbrida, que combina o torque inicial confiável da Savonius com o desempenho aerodinâmico superior da Darrieus em regime estacionário.

A seguir, são apresentadas as figuras de contorno de pressão e velocidade e do toque gerado pelos rotores durante o arranque da turbina híbrida composta pelos rotores Darrieus e Savonius. Estas visualizações têm como objectivo demonstrar, de forma geral, o comportamento do escoamento ao redor do conjunto completo, evidenciando as interações aerodinâmicas entre os dois rotores na fase inicial de análise.

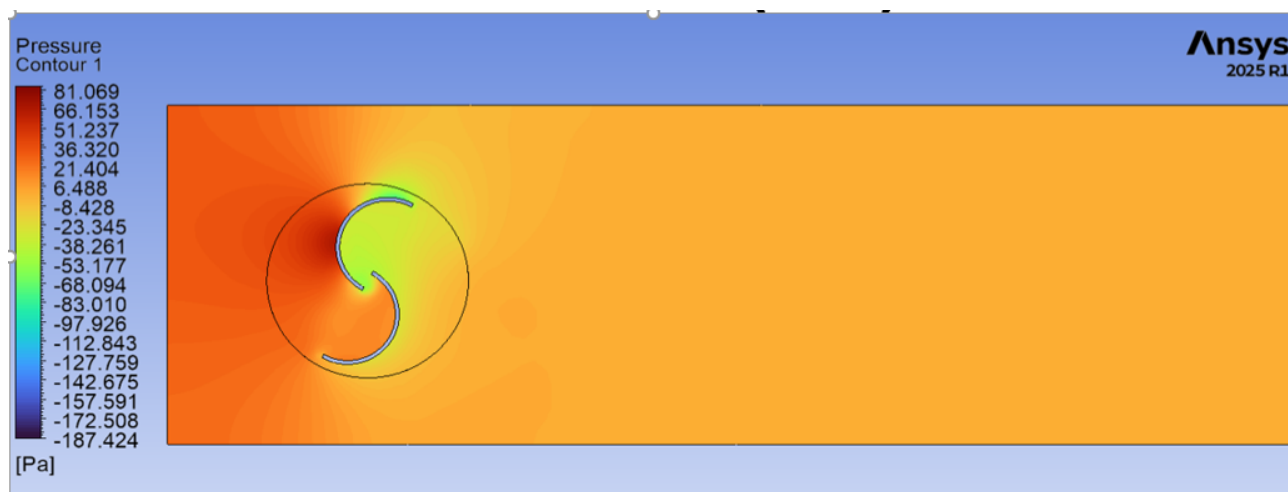


Figura 26: Distribuição de pressão estática na turbina (Fonte: Autor)

A Figura 26 mostra a distribuição de pressão ao longo das turbinas Darrieus e Savonius. Observa-se o comportamento do escoamento em cada rotor, destacando a interacção entre os dois perfis no sistema híbrido.

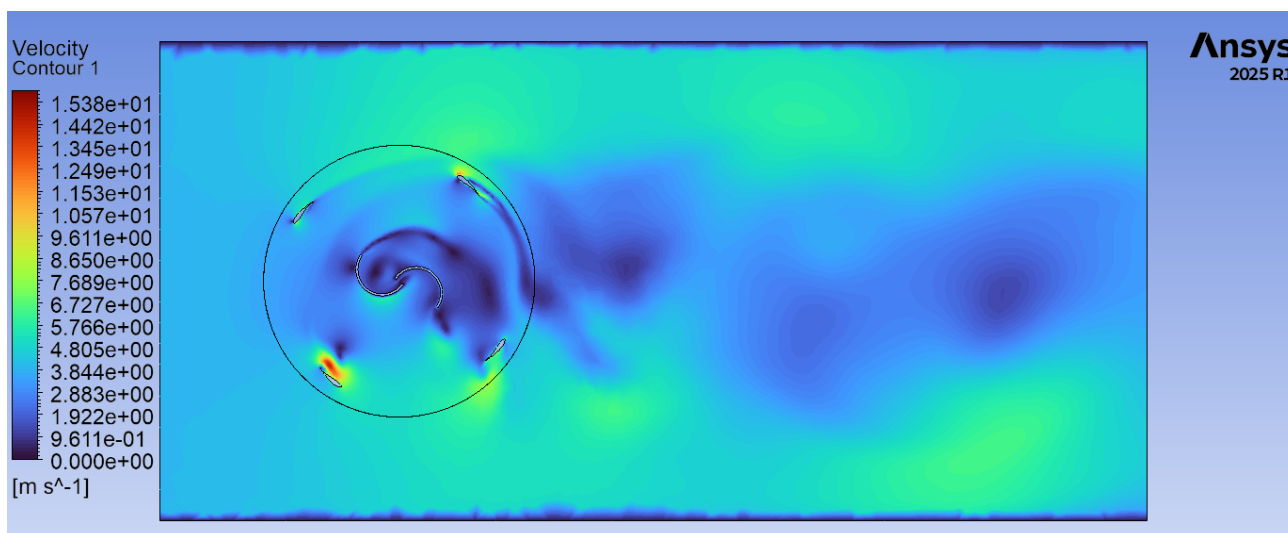


Figura 27: Distribuição da velocidade na turbina (Fonte: Autor)

A Figura 27 apresenta a distribuição de velocidade ao longo das turbinas Darrieus e Savonius. É possível observar o padrão de escoamento e a interacção do fluxo entre os dois rotores no sistema híbrido.

As Figuras 26 e 27 apresentadas, permitem observar com clareza a actuação combinada dos rotores Savonius e Darrieus no campo de escoamento ao redor da turbina híbrida. Nota-se que o rotor

Savonius, posicionado estrategicamente, gera uma região de baixa pressão localizada, que favorece o início da rotação do sistema, enquanto o rotor Darrieus começa a desenvolver zonas de aceleração mais expressivas à medida que a velocidade angular aumenta.

A distribuição de velocidades mostra que, após o arranque promovido pela Savonius, o escoamento se reorganiza e passa a actuar de forma mais eficiente sobre as pás da Darrieus. Essa transição progressiva é coerente com os achados de Paraschivoiu (2002) e Saha et al. (2008), que apontam que o rotor Savonius é essencial em baixos regimes de vento para gerar torque inicial, mas que o desempenho energético total depende principalmente do funcionamento aerodinâmico da Darrieus

Assim, os contornos de pressão e velocidade confirmam visualmente o comportamento esperado: a Savonius garante o auto arranque da turbina, e a Darrieus, uma vez em rotação, assume a conversão predominante da energia do vento em potência útil.

4.3.1. Resultados gerados pelo modelo Python desenvolvido

Nesta secção, apresentam-se os resultados obtidos a partir da execução do código desenvolvido em Python. As saídas demonstram a aplicação pratica dos conceitos abordados e permitem a análise do desempenho do modelo sob diferentes condições. Os exemplos a seguir ilustram os principais resultados gerados, evidenciando a eficácia do método implementado.

Entradas	Saídas																		
 DIMENSIONAMENTO DE TURBINA HÍBRIDA DARRIEUS-SAVONIUS -----  Digite a província (em MAIÚSCULAS): TETE  Digite a velocidade média do vento (m/s): 3.66  Digite a potência útil desejada (W): 250 =====	===== A seguir, são ilustrados os dados da turbina híbrida dimensionada para a província de Tete. ===== <table> <tr> <td>Velocidade do vento (m/s)</td><td> 3.66</td></tr> <tr> <td>Potência útil desejada (W)</td><td> 250.0</td></tr> <tr> <td>Área Darrieus (m²)</td><td> 22.05</td></tr> <tr> <td>Potência gerada estimada (W)</td><td> 284.73</td></tr> <tr> <td>Diâmetro Darrieus (m)</td><td> 3.5</td></tr> <tr> <td>Altura Darrieus (m)</td><td> 6.3</td></tr> <tr> <td>Diâmetro Savonius (m)</td><td> 0.7</td></tr> <tr> <td>Altura Savonius (m)</td><td> 2.0</td></tr> <tr> <td>Estágios Savonius</td><td> 2</td></tr> </table> → Sistema híbrido com 2 estágios Savonius aplicável à província de Tete.  O perfil aerodinâmico adotado será o NACA 63-415, com quatro pás Darrieus e duas pás Savonius.	Velocidade do vento (m/s)	3.66	Potência útil desejada (W)	250.0	Área Darrieus (m²)	22.05	Potência gerada estimada (W)	284.73	Diâmetro Darrieus (m)	3.5	Altura Darrieus (m)	6.3	Diâmetro Savonius (m)	0.7	Altura Savonius (m)	2.0	Estágios Savonius	2
Velocidade do vento (m/s)	3.66																		
Potência útil desejada (W)	250.0																		
Área Darrieus (m²)	22.05																		
Potência gerada estimada (W)	284.73																		
Diâmetro Darrieus (m)	3.5																		
Altura Darrieus (m)	6.3																		
Diâmetro Savonius (m)	0.7																		
Altura Savonius (m)	2.0																		
Estágios Savonius	2																		



DIMENSIONAMENTO DE TURBINA HÍBRIDA DARRIEUS-SAVONIUS

- 🌐 Digite a província (em MAIÚSCULAS): MAPUTO
- 👤 Digite a velocidade média do vento (m/s): 3.68
- ⚡ Digite a potência útil desejada (W): 100



=====	
A seguir, são ilustrados os dados da turbina híbrida dimensionada para a província de Maputo.	
=====	
Velocidade do vento (m/s)	3.68
Potência útil desejada (W)	100.0
Área mínima necessária (m²)	7.62
Área Darrieus (m²)	7.8
Potência gerada estimada (W)	102.38
Diâmetro Darrieus (m)	3.9
Altura Darrieus (m)	2.0
Diâmetro Savonius (m)	0.78
Altura Savonius (m)	1.0
Estágios Savonius	1

→ Sistema híbrido com 1 estágio Savonius aplicável à província de Maputo.

📌 O perfil aerodinâmico adotado será o NACA 63-415, com quatro pás Darrieus e duas pás Savonius.

Esses resultados obtidos no modelo computacional desenvolvido demonstram a funcionalidade do código e sua aplicação no contexto do estudo.

4.3. Discussão das limitações de estudo

Este estudo apresentou importantes avanços na modelagem simulação de turbinas eólicas de eixo vertical híbridas, voltadas para regiões de vento de baixa velocidade. No entanto, algumas limitações devem ser reconhecidas. As simulações foram realizadas em duas dimensões (2D), o que representa uma simplificação do comportamento tridimensional real da turbina. Além disso, não foram considerados efeitos dinâmicos transientes do escoamento, como rajadas de vento e flutuações naturais no ambiente, o que poderia impactar o desempenho aerodinâmico. A ausência da validação experimental também limita a generalização dos resultados obtidos.

Apesar dessas limitações, os resultados obtidos possuem implicações práticas significativas. A metodologia desenvolvida pode ser aplicada em projectos de turbinas para abastecimento de pequenas comunidades rurais, urbanas, sobretudo em regiões onde a velocidade média do vento é baixa e não compatível com turbinas de eixo horizontal. O estudo também pode ser utilizado como base técnica para desenvolvimento de sistemas de bombeamento de água accionados por energia eólica, promovendo soluções sustentáveis e de baixo custo.

CAPÍTULO V

5. Avaliação da viabilidade económica do projecto

A presente avaliação económica tem como objectivo analisar a viabilidade da implementação do sistema de bombeamento de água baseado em turbinas eólicas de eixo vertical do tipo híbrido (Darrieus + Savonius), acopladas mecanicamente ao eixo da bomba. A análise busca estimar os custos de construção, instalação e manutenção do sistema, bem como compará-los com alternativas convencionais de bombeamento (como bombas eléctricas ou a Gasóleo), tendo como foco regiões urbanas e rurais de Moçambique.

Considerando que se trata de uma tecnologia voltada para comunidades com recursos financeiros limitados, a viabilidade económica torna-se um factor crucial para a adopção e sustentabilidade do projecto. Assim, esta avaliação servirá de base para julgar se o investimento no sistema é justificável frente ao seu custo-benefício e potencial impacto social.

5.1. Levantamento de custos estimados dos componentes da turbina

A seguir apresenta-se uma tabela com os principais componentes necessários para a construção do sistema:

Tabela 7: Levantamento de custos dos componentes da turbina

Componente	Custo Estimado (MT)
Pás (8 m ² de chapa, cortes e montagem)	≈ 33 400
Veio (aço - 10 m de altura)	≈ 4000
Parafusos DIN 933 M20 (16 unidades)	≈ 1300
Cubo de mastro rotativo	≈ 30 000
Conector de aerofólios (2 unidades)	≈ 4000
Bomba mecânica (Taifu 4SWN205-0.8N)	≈ 20 000
Custo Total	92 700

5.2. Custo de operação e manutenção

Tabela 8: Custo de operação e manutenção

Item de manutenção	Frequência	Estimativa (MT)
Inspecção geral da turbina	1 vez ao ano	≈ 1500
Lubrificação do eixo e mancais	2 vezes ao ano	≈ 1000
Substituição preventiva de parafusos	A cada 2 anos	≈ 400
Manutenção da bomba mecânica	1 vez ao ano	≈ 2500
Total	-	5400

O valor total estimado para a fabricação e montagem do sistema, incluindo as pás, estrutura metálica, veio, parafusos cubo de mastro, conectores de aerofólios e bomba mecânica, é de aproximadamente **98 100 MT**.

5.3. Amortização anual do investimento

O custo total do sistema é de 98 100 e a vida útil do sistema é de 10 anos.

$$\text{Amortização anual} = \frac{\text{Custo Total}}{\text{Tempo de vida útil}} = \frac{98\,100}{10} = 9\,810 \text{ MT/ano}$$

Custo total anual do sistema:

O custo total anual do sistema é calculado somando o valor da amortização com o valor de operação/manutenção anual que é de aproximadamente igual a 15 210 MT.

Análise comparativa de custo entre a Turbina híbrida e a bomba a Gasóleo.

Para avaliar a viabilidade económica do sistema híbrido proposto, foi feita uma comparação com uma bomba convencional a gasóleo, considerando o custo total ao longo de 15 anos de uso.

O sistema híbrido tem um custo inicial de 92 700 MT, com manutenção anual estimada em 5400 MT. Já a bomba a gasóleo tem um custo inicial de 30 000 MT, mas apresenta elevados custos operacionais, consumindo cerca de 2 litros de gasóleo por dia (~ 90 MT por litro), além de uma manutenção média de 10 000 MT por ano.

Para ilustrar a diferença no custo acumulado entre o sistema híbrido proposto e a bomba a gásóleo, apresenta-se a seguir um gráfico que mostra a evolução dos custos ao longo de 15 anos de uso.

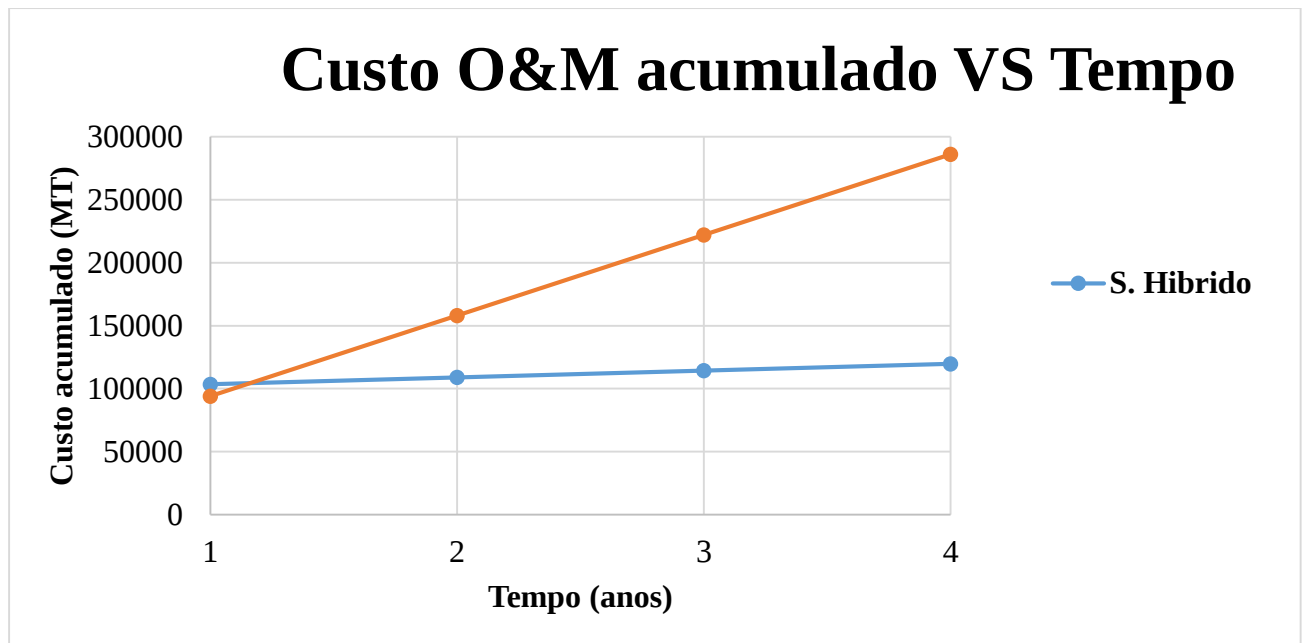


Gráfico 9: Custo acumulado em função do tempo (Fonte: Autor)

Como mostrado no Gráfico 9, apesar do sistema híbrido ter um custo inicial mais elevado, ele se torna significativamente mais vantajoso após o segundo ano de operação. A bomba a gásóleo, por sua vez, continua a acumular custos (custos de operação e manutenção) elevados devido à necessidade de combustível e manutenção constante. Assim, o sistema híbrido não apenas oferece uma solução ambientalmente sustentável, mas também é mais económico a longo prazo.

CAPÍTULO VI

6. Conclusões

O presente trabalho teve como objectivo principal desenvolver um modelo computacional de turbinas eólicas de eixo vertical para aplicação no bombeamento de água em regiões de vento de baixa velocidade. Com base nos resultados obtidos nas análises, simulações e interpretações realizadas ao longo do estudo, conclui-se que os objectivos propostos foram plenamente atingidos.

Inicialmente, foi possível analisar os perfis aerodinâmicos mais adequados para turbinas eólicas de eixo vertical em condições de ventos fracos. A comparação entre diferentes perfis, como o NACA 0018 e o NACA 63-415, permitiu identificar suas vantagens em termos de estabilidade e desempenho aerodinâmico, servindo de base para o desenvolvimento e optimização de turbinas mais eficientes.

A análise do potencial eólico e da profundidade do lençol freático em diferentes províncias revelou-se fundamental para compreender a viabilidade técnica da implementação das turbinas. Os dados colectados e analisados demonstraram que existem regiões com condições adequadas para o aproveitamento da energia eólica no fornecimento de água, contribuindo para a integração entre o projecto técnico e a realidade local.

As simulações realizadas com diferentes geometrias de pás e configurações estruturais permitiram observar o comportamento das turbinas sob diversas condições de operação. Com isso, foi possível verificar quais geometrias oferecem melhor desempenho aerodinâmico e torque inicial suficiente para iniciar a rotação mesmo com velocidades de vento reduzidas.

A eficiência energética foi analisada com base em variáveis como ângulo de ataque, número de pás e tipos de materiais utilizados. Os resultados indicam que essas variáveis influenciam significativamente o rendimento global das turbinas, reforçando a importância de uma modelagem bem ajustada e da escolha criteriosa dos parâmetros construtivos.

Diante disso, conclui-se que o modelo computacional proposto é adequado para a simulação e optimização de turbinas eólicas de eixo vertical, especialmente em contextos de ventos de baixa velocidade. Além disso, o estudo contribui para o desenvolvimento de soluções sustentáveis para o abastecimento de água, com potencial de impacto positivo em comunidades que enfrentam limitações no acesso a fontes de energia e recursos hídricos.

7. Recomendações

Para trabalhos futuros são propostas as seguintes recomendações:

- Implementar um sistema mecânico ou electrónico para desacoplamento automático do rotor Savonius quando a turbina atingir o TSR ideal, de forma a reduzir perdas por arrasto e maximizar a eficiência do rotor Darrieus.
- Desenvolver um controle automático de passo (*pitch control*) para ajustar dinamicamente o ângulo das pás em função da velocidade do vento, optimizando a *performance* aerodinâmica em diferentes regimes de operação.
- Realizar ensaios experimentais em protótipos físicos da turbina híbrida projectada, a fim de validar os resultados numéricos e ajustar os parâmetros do modelo com base em medições reais.

8. Referências bibliográficas

- [1] Abdalrahman, A. A., Hassan, Y. A., & Attia, N. M. (2019). Aerodynamic performance analysis of different airfoils for vertical axis wind turbines. *Energy*.
- [2] Albuquerque, M. (2023). Modelação e optimização de sistemas híbridos para a geração de energia em Moçambique (Trabalho de licenciatura). Universidade Eduardo Mondlane.
- [3] Akwa, J. V., Vielmo, H. A., & Petry, A. P. (2012). A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [4] Batista, N. C., Silva, R. M., & Rodrigues, J. P. (2020). Aplicações de simulação CFD no desenvolvimento de turbinas eólicas de eixo vertical.
- [5] Betz, A. (1926). *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen*. Vandenhoeck & Ruprecht.
- [6] Bianchini, A., Balduzzi, F., Ferrara, G., & Ferrari, L. (2015). Effect of the number of blades on the performance of Darrieus wind turbines.
- [7] Bouzidi, M. A., Bouharkat, M., & Abidat, M. (2016). CFD based performance optimization of a vertical axis wind turbine.
- [8] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2011). *Wind energy handbook* (2^a Ed.). Wiley.
- [9] Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An engineering approach* (8^a Ed.). McGraw-Hill Education.
- [10] Cengel, Y. A., Turner, R. H., & Cimbala, J. M. (2019). *Fundamentals of thermal-fluid sciences* (6^a Ed.). McGraw-Hill Education.
- [11] Chaudhary, U., & Nayak, R. (2015). Aerodynamic performance of NACA 63-415 airfoil for small-scale vertical axis wind turbines. *Renewable Energy*.
- [12] Chaudhary, U., & Nayak, S. K. (2015). Micro and small-scale HAWT blades airfoils study through CFD for low wind applications. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*.
- [13] El-Kasaby, H., El-Baz, A., & El-Sayed, A. (2020). Numerical investigation of hybrid Darrieus–Savonius wind turbine performance. *Energy Conversion and Management*.
- [14] El-Kasaby, S., Farmani, M., & Sadek, M. (2020). Numerical analysis of a Darrieus–Savonius vertical axis wind turbine hybrid system using CFD. *Energy Conversion and Management*.
- [15] Ferreira, C., dos Reis, A. M., Rocha, E. R., & dos Reis, M. O. (2010). Optimization of wind turbine airfoils for low Reynolds numbers. *Journal of Mechanical Science and Technology*.

- [16] Ferziger, J. H., Perić, M., & Street, R. L. (2019). Computational methods for fluid dynamics (4^a Ed.). Springer.
- [17] Gutiérrez-Cuba, C., & Cuba-Torre, H. R. (2024). Evaluación del desempeño de las turbinas de viento Savonius, Darrieus e Híbrido. *Revista de Energias Renováveis*.
- [18] Gutiérrez-Cuba, A., & Cuba-Torre, A. (2024). Experimental evaluation of Savonius, Darrieus and combined wind turbine systems. *Energy Reports*.
- [19] Hansen, M. O. L. (2008). Aerodynamics of wind turbines (2^a Ed.). Earthscan.
- [20] Hau, E. (2013). Wind turbines: Fundamentals, technologies, application, economics (3^a Ed.). Springer.
- [21] Heier, S. (2014). Grid integration of wind energy: Onshore and offshore conversion systems (3^a Ed.). John Wiley & Sons.
- [22] Islam, M. R., Ting, D. S.-K., & Fartaj, A. (2008). Vertical axis wind turbines: Current technologies and future trends. *International Journal of Green Energy*.
- [23] Islam, M. R., Ting, D. S.-K., & Fartaj, A. (2013). Vertical axis wind turbine: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [24] Khan, A. (2018). Uma abordagem matemática aplicada ao projecto de turbinas hidrocínéticas e eólicas com difusor utilizando a teoria do elemento de pá.
- [25] Khan, A., et al. (2022). Vertical axis wind turbines: A review on historical evolution, status and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [26] Kumar, A., & Reddy, P. R. (2022). Performance analysis of hybrid vertical axis wind turbines under low wind conditions.
- [27] Kumar, R., & Saini, R. P. (2016). Computational fluid dynamics analysis of a three-stage Savonius wind rotor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*.
- [28] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). Wind energy explained: Theory, design and application (2^a Ed.). John Wiley & Sons.
- [29] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). Wind energy explained: Theory, design and application (2^a Ed.). John Wiley & Sons.
- [30] Mohamed, M. H. (2011). Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes. *Energy*, 36(10), 6651–6665.
- [31] Paraschivoiu, I. (2002). Wind turbine design: With emphasis on Darrieus concept. Polytechnic International Press.

- [32] Saha, U. K., Thotla, S., & Maity, D. (2008). On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades. *Renewable Energy*, 33(9), 1974–1981.
- [33] Sánchez, A., Rodríguez, C., & Ramírez, J. (2019). Hybrid vertical axis wind turbine performance optimization.
- [34] Sharma, S., Yadav, A., & Kumar, R. (2020). Optimization of vertical axis wind turbine using artificial intelligence.
- [35] Vaz, J. R., & Silva, M. A. (2021). Desempenho aerodinâmico de turbinas eólicas de eixo vertical sob condições de vento reduzido. *Revista Brasileira de Energia Renovável*

ANEXOS

ANEXO I: Bombas de agua

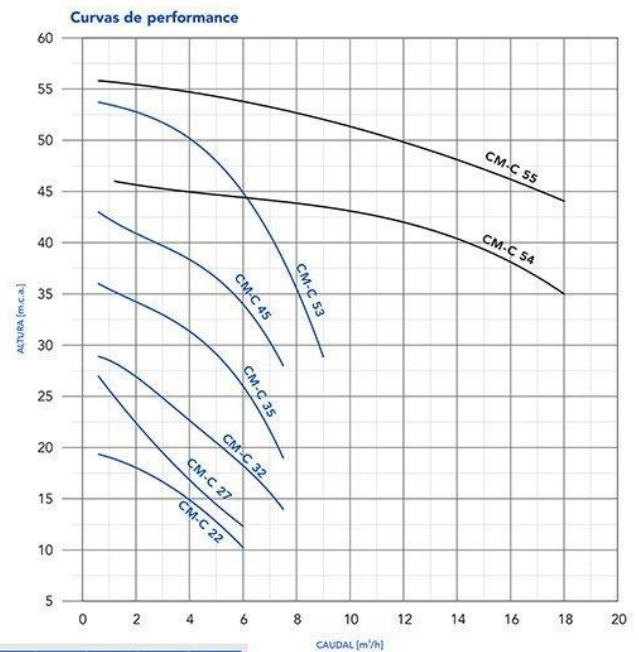
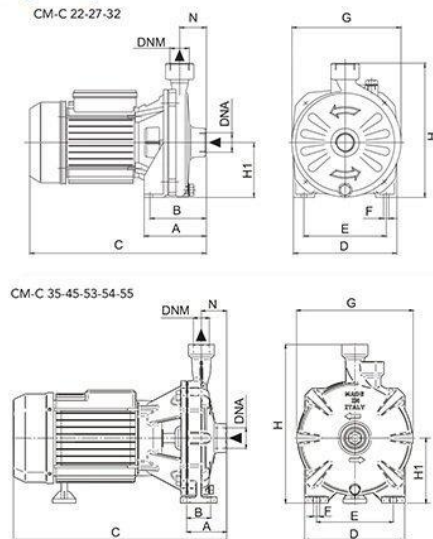
Electrobombas centrífugas de una sola etapa.

Serie CM



Modelo de bomba		Potencia Motor		l/min m³/h	Q = Caudal												Ø Salida
Monofase	Trifase	Kw	HP		10	20	45	60	90	100	125	150	200	300			
					0,6	1,2	2,7	3,6	5,4	6	7,5	9	12	18			
CM 22	C 22	0.37	0.5	H = Altura en m	20	18	17	16	12	10					1"		
CM 27	C 27	0.55	0.75		27	25	20	18	14	12					1"		
CM 32	C 32	0.75	1		29	28	26	23	20	18	14				1"		
CM 35	C 35	1.1	1.5		36	35.5	34.5	33.5	28	26	19				1"		
CM 45	C 45	1.5	2		43	42	41.5	40.5	36.5	34	28				1"		
CM 53	C 53	2.2	3		54	53	52	51	47	45	38	29			1"		
CM 54	C 54	3	4		46.5	46	45.5	45.3	44.7	44.5	44	43.5	42	35	1½"		
CM 55	C 55	4	5.5		56	55.5	55	54.5	54	53.5	53	52	50	44	1½"		

Diagramas y tabla de dimensiones



Modelo de bomba		A	B	C	D	E	F	G	H	H1	N	DNA	DNM	Peso (Kg)
Monofase	Trifase													
CM 22	C 22	100	90	260	162	126	9	164	205	83	47	1"	1"	8
CM 27	C 27	108	98	300	176	140	9	186	229	94	50	1"	1"	9.2
CM 32	C 32	108	98	300	176	140	9	186	229	94	50	1"	1"	11.8
CM 35	C 35	76.5	45	355	220	147.5	12	224	305	125	48.5	1¼"	1"	23
CM 45	C 45	76.5	45	410	220	147.5	12	224	305	125	48.5	1¼"	1"	24
CM 53	C 53	76.5	45	410	220	147.5	12	224	305	125	48.5	1¼"	1"	27
CM 54	C 54	88.5	60	485	245	190	14	256	323	132	58.5	2"	1½"	40
CM 55	C 55	88.5	60	475	245	190	14	256	323	132	58.5	2"	1½"	42

BALAGUER
PERFORACIONES

ANEXO II: Bombas de agua



Electrobombas centrífugas

Agua limpia

Utilizo doméstico

Utilizo civil



CAMPO DE PRESTACIONES

- Caudal hasta 160 l/min (8.5 m³/h)
- Altura manométrica hasta 56 m

LIMITES DE UTILIZO

- Altura de aspiración manométrica hasta 7 m
- Temperatura del líquido de -10 °C hasta +90 °C
- Temperatura ambiente hasta +40 °C
- Presión máxima en el cuerpo de la bomba:
 - 6 bar para CP 100-130-132-150-158
 - 10 bar para CP 170-190-200
- Funcionamiento continuo S1

EJECUCION Y NORMAS DE SEGURIDAD

EN 60335-1 EN 60034-1 

IEC 60335-1 IEC 60034-1

CEI 2-3

REGLAMENTO (UE) N. 547/2012

CERTIFICACIONES

Empresa con sistema de gestión certificado DNV
ISO 9001: CALIDAD
ISO 14001: AMBIENTE Y SEGURIDAD

UTILIZOS E INSTALACIONES

Son recomendadas para bombear agua limpia, sin particular abrasivos y líquidos químicamente no agresivos con los materiales que constituyen la bomba.

Por su confiabilidad y simplicidad encuentran un amplio uso en el sector doméstico y civil, particularmente para la distribución del agua acopladas a pequeños o medianos tanques autoclaves, para el vaciado o para la irrigación de huertos o jardines.

La instalación se debe realizar en lugares cerrados o protegidos de la intemperie.

PATENTES - MARCAS - MODELOS

- Marca registrada nº 000154350 CPm158
- Modelo comunitario registrado nº 002098434

EJECUCION BAJO PEDIDO

- Sello mecánico especial
- Otros voltajes o frecuencia 60 Hz
- Protección IP X5 para CP 170, CP 170M

GARANTIA

2 años según nuestras condiciones generales de venta

ELECTROBOMBAS SUPERFICIE MARCA PEDROLLO SERIE CP								
CODIGO	Modelo	HP	VOLTAJE	AMP.	DIAMETRO (Q)	PRECIO NETO SIN IVA	DESCTO. OFERTA	PRECIO OFERTA FINAL SIN IVA
100363	CPm 100	0,33	220V	1,9	1"X1"	\$135.570	15%	\$115.235
100364	CPm 130	0,5	220V	3,2	1"X1"	\$138.320	15%	\$117.572
100378	CP 130	0,5	380V	1,2	1"X1"	\$150.120	15%	\$127.602
100367	CPm 150	1,0	220V	5,7	1"X1"	\$181.400	15%	\$154.190
104369	CPm 158	1,0	220V	6,0	1"X1"	\$139.900	20%	\$111.920
100379	CP 158	1,0	380V	2,5	1"X1"	\$193.910	15%	\$164.824
100371	CPm 170	1,5	220V	7,8	1 1/4"X1"	\$297.860	15%	\$253.181
100380	CP 170	1,5	380V	3,0	1 1/4"X1"	\$325.260	15%	\$276.471
100372	CPm 170M	1,5	220V	7,8	1 1/4"X1"	\$325.260	15%	\$276.471
102726	CP 170M	1,5	380V	3,2	1 1/4"X1"	\$337.780	15%	\$287.113
100373	CPm 190	2,0	220V	11,0	1 1/4"X1"	\$352.500	15%	\$299.625
100381	CP 190	2,0	380V	4,3	1 1/4"X1"	\$362.800	15%	\$308.380
100382	CP 200	3,0	380V	5,2	1 1/4"X1"	\$388.130	15%	\$329.911

MODELO		POTENCIA (P ₂)		Q m³/m l/min	H metros																		
Monofásica	Trifásica	kW	HP		▲	0	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0	6.6	7.2	7.8	8.4	9.0	9.6	
					0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160		
CPm 100	CP 100	0.25	0.33	IE2	16	15	14	12.5	11	9	7												
CPm 130	CP 130	0.37	0.50		23	22	21	20	19	18	17	15.5	14										
CPm 132	CP 132	0.55	0.75		23	-	22.5	22	21.5	21	20.5	19.5	18.5	17.5	16	14	12						
CPm 150	CP 150	0.75	1		29.5	-	29	28.5	28	27.5	26.5	26	24.5	23	21	18	15						
CPm 158	CP 158	0.75	1	IE3	36	34	33.5	33	32.5	31.5	30	28.5	27	25									
CPm 170	CP 170	1.1	1.5		41	-	-	38	37	36	35	33.5	32	30	27.5	25	22						
CPm 170M	CP 170M	1.1	1.5		36	-	-	35	34.5	33.5	33	32	31	30	29	28	26.5	25	23	21	19		
CPm 190	CP 190	1.5	2		48	-	-	46	44.5	43	41.5	40	38	36	34.5	32.5	30.5	28	26				
-	CP 200	2.2	3	56	-	-	55	54.5	53.5	52	51	49.5	48	46	44.5	42.5	40.5	38.5	36				

Q = Caudal
H = Altura manométrica total
HS = Altura de aspiración

Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO9906 Grado 3B.

▲ Clase de rendimiento del motor trifásico (IEC 60034-30)

ANEXO III: Tabela da potência em função da profundidade.

Vazão (m^3/h)	Profundidade (m)	Potência (kW)
1	20	0,078
1	30	0,117
1	40	0,156
1	50	0,195
1	60	0,234
1	70	0,273
1	80	0,311
1	90	0,350
1	100	0,389
1	110	0,428
1	120	0,467
1	130	0,506
1	140	0,545

ANEXO IV: Modelo de dimensionamento e optimização da turbina (Código em Python)

```
import math
import sys
import datetime

# --- CONSTANTES ---
RHO = 1.225 # Densidade do ar fixa (kg/m³)
# Dados fixos para turbina
D_DARRIEUS_TETE = 3.5
H_DARRIEUS_TETE = 6.3
A_DARRIEUS_TETE = round(D_DARRIEUS_TETE * H_DARRIEUS_TETE, 2)

D_SAVONIUS_TETE = 0.7
H_SAVONIUS_TETE = 2.0
ESTAGIOS_SAVONIUS_TETE = 2

PROVINCIAS_VALIDAS = [
    "MAPUTO", "GAZA", "INHAMBANE", "SOFALA", "MANICA",
    "TETE", "ZAMBEZIA", "NAMPULA", "NIASSA", "CABO DELGADO"
]

def frange(start, stop, step):
    current = start
    while current < stop:
        yield round(current, 2)
        current += step

def calcular_cp_por_tsr(tsr):
    if tsr <= 0 or tsr >= 4:
        return 0.0
```

```
a = 0.1075
```

```
cp = -a * (tsr - 2)**2 + 0.43
```

```
return max(0.0, cp)
```

```
def calcular_densidade_do_ar():
```

```
    return RHO
```

```
def calcular_potencia_eolica(densidade_ar, area_varredura, velocidade_vento, cp):
```

```
    return 0.5 * densidade_ar * area_varredura * (velocidade_vento**3) * cp
```

```
def gerar_base_dados():
```

```
    diametros = [d for d in frange(1.0, 4.1, 0.1)]
```

```
    alturas = [h for h in frange(1.0, 6.6, 0.1)]
```

```
    base_dados = [{"D": d, "H": h, "A": round(d * h, 2)} for d in diametros for h in alturas]
```

```
    return base_dados
```

```
def obter_entrada_provincia():
```

```
    while True:
```

```
        provincia = input("📍 Digite a província (em MAIÚSCULAS): ").strip()
```

```
        if not provincia.isupper():
```

```
            print("❌ O nome da província deve estar em MAIÚSCULAS. Ex: MAPUTO, TETE, etc.")
```

```
            continue
```

```
        if provincia not in PROVINCIAS_VALIDAS:
```

```
            print("\n❌ Província não reconhecida. As válidas são:")
```

```
            for prov in PROVINCIAS_VALIDAS:
```

```
                print(f" - {prov}")
```

```
            print("🔄 Por favor, tente novamente.\n")
```

```

        continue

    return provincia

def obter_entradas_numericas():
    while True:
        try:
            velocidade = float(input("⚡ Digite a velocidade média do vento (m/s): "))

            if velocidade <= 0:
                print("⚠ A velocidade do vento deve ser positiva.")
                continue

            potencia = float(input("⚡ Digite a potência útil desejada (W): "))

            if potencia <= 0:
                print("⚠ A potência desejada deve ser positiva.")
                continue

            return velocidade, potencia
        except ValueError:
            print("⚠ Insira números válidos para velocidade e potência.")

def formatar_linha_relatorio(label, value, unit="", indent=0):
    indent_str = " " * indent
    return f"{indent_str}{label:<35} | {value}{unit}"

def gerar_texto_relatorio(dados):
    lines = []

```

```

lines.append("--- Relatório de Dimensionamento de Turbina Híbrida ---")

lines.append(f"Data e Hora: {datetime.datetime.now().strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')}\n")


lines.append("--- Dados de Entrada ---")

lines.append(formatar_linha_relatorio("Província", dados['provincia']))

lines.append(formatar_linha_relatorio("Velocidade do Vento", f"{dados['velocidade_vento']:.2f}",
    " m/s"))

lines.append(formatar_linha_relatorio("Potência Útil Desejada",
    f"{dados['potencia_desejada']:.2f}", " W"))

lines.append(formatar_linha_relatorio("Coeficiente de Potência (Cp) Usado",
    f"{dados['cp_usado']:.3f}"))

lines.append(formatar_linha_relatorio("TSR Alvo para Cp", f"{dados['tsr_alvo']:.1f}"))

lines.append(formatar_linha_relatorio("Densidade do Ar", f"{dados['densidade_ar']:.3f}", "
    kg/m³"))


lines.append("\n--- Dimensionamento ---")

lines.append(f"\n■ Os valores correspondentes ao dimensionamento da turbina para a província
    {dados['provincia']} são os seguintes:\n")

if dados['provincia'] == "TETE":

    lines.append(formatar_linha_relatorio("Área Darrieus", f"{dados['area_darrieus']:.2f}", " m²"))

    lines.append(formatar_linha_relatorio("Potência Gerada Estimada",
        f"{dados['potencia_gerada_watts']:.2f}", " W"))

    lines.append(formatar_linha_relatorio("Diâmetro Darrieus", f"{dados['d_darrieus']:.2f}", " m"))

    lines.append(formatar_linha_relatorio("Altura Darrieus", f"{dados['h_darrieus']:.2f}", " m"))

    lines.append(formatar_linha_relatorio("Diâmetro Savonius", f"{dados['d_savonius']:.2f}", "
        m"))

    lines.append(formatar_linha_relatorio("Altura Savonius", f"{dados['h_savonius']:.2f}", " m"))

    lines.append(formatar_linha_relatorio("Estágios Savonius", dados['estagios_savonius']))

    lines.append(f"→ Sistema híbrido com {dados['estagios_savonius']} estágio(s) Savonius para
        Tete.")

else:

```

```

lines.append(formatar_linha_relatorio("Área                Mínima                Necessária",
f"{dados['area_minima_necessaria']:.2f}", " m²"))

if not dados['sugestoes_compativeis']:

    lines.append("\nNenhuma configuração da base de dados atende a potência desejada.")

    lines.append("Considere aumentar a velocidade do vento ou reduzir a potência desejada.")

else:

    melhor          =          max(dados['sugestoes_compativeis'],          key=lambda          x:
x['potencia_gerada_watts']/x['A'])

    lines.append("\n** Melhor Opção por Potência Específica (W/m²): **")

    lines.append(formatar_linha_relatorio("Potência                Específica",
f"{melhor['potencia_gerada_watts']/melhor['A']:.2f}", " W/m²", indent=1))

    lines.append(formatar_linha_relatorio("Diâmetro  Darrieus", f"{melhor['D']:.2f}", " m",
indent=1))

    lines.append(formatar_linha_relatorio("Altura  Darrieus", f"{melhor['H']:.2f}", " m",
indent=1))

    lines.append(formatar_linha_relatorio("Área  Darrieus", f"{melhor['A']:.2f}", " m²",
indent=1))

    lines.append(formatar_linha_relatorio("Potência                Estimada",
f"{melhor['potencia_gerada_watts']:.2f}", " W", indent=1))

    lines.append(formatar_linha_relatorio("Diâmetro  Savonius", f"{round(0.2 * melhor['D'],
2):.2f}", " m", indent=1))

    lines.append(formatar_linha_relatorio("Altura  Savonius", f"{round(0.5 * melhor['H'],
2):.2f}", " m", indent=1))

    lines.append(formatar_linha_relatorio("Estágios  Savonius", dados['estagios_savonius'],
indent=1))

lines.append("\n--- Informação Final ---")

lines.append("✦ Perfil aerodinâmico: NACA 63-415, 4 pás Darrieus + 2 pás Savonius.")

lines.append(f"✦ Foi sugerido {dados['estagios_savonius']} estágio(s) Savonius com base na
potência desejada.")

lines.append("-----")

return "\n".join(lines)

def calcular_e gerar_relatorio(provincia, velocidade_vento, potencia_desejada, base_dados):

```

```

densidade_ar = calcular_densidade_do_ar()
TSR_ALVO_DIMENSIONAMENTO = 2.0
cp_usado = calcular_cp_por_tsr(TSR_ALVO_DIMENSIONAMENTO)
resultados = {
    "provincia": provincia,
    "velocidade_vento": velocidade_vento,
    "potencia_desejada": potencia_desejada,
    "cp_usado": cp_usado,
    "tsr_alvo": TSR_ALVO_DIMENSIONAMENTO,
    "densidade_ar": densidade_ar
}

if provincia == "TETE":
    resultados["area_darrieus"] = A_DARRIEUS_TETE

    potencia_gerada = calcular_potencia_eolica(densidade_ar, A_DARRIEUS_TETE,
    velocidade_vento, cp_usado)

    resultados["potencia_gerada_watts"] = round(potencia_gerada, 2)

    resultados["d_darrieus"] = D_DARRIEUS_TETE
    resultados["h_darrieus"] = H_DARRIEUS_TETE
    resultados["d_savonius"] = D_SAVONIUS_TETE
    resultados["h_savonius"] = H_SAVONIUS_TETE
    resultados["estagios_savonius"] = ESTAGIOS_SAVONIUS_TETE
    resultados["sugestoes_compativeis"] = []
else:
    if velocidade_vento <= 0 or cp_usado <= 0:
        print("✗ Velocidade do vento ou Cp inválidos para cálculo.")
        sys.exit()

    area_min = potencia_desejada / (0.5 * densidade_ar * cp_usado * velocidade_vento**3)
    resultados["area_minima_necessaria"] = round(area_min, 2)

```

```

sugestoes = []

for item in base_dados:

    potencia_gerada = calcular_potencia_eolica(densidade_ar, item["A"], velocidade_vento,
cp_usado)

    if potencia_gerada >= potencia_desejada:

        item_copy = item.copy()

        item_copy['potencia_gerada_watts'] = round(potencia_gerada, 2)

        sugestoes.append(item_copy)

resultados["sugestoes_compativeis"] = sugestoes

if sugestoes:

    sugestoes.sort(key=lambda x: (x["H"], x["A"]))

    melhor = sugestoes[0]

    resultados["d_darrieus"] = melhor["D"]

    resultados["h_darrieus"] = melhor["H"]

    resultados["area_darrieus"] = melhor["A"]

    resultados["potencia_gerada_watts"] = melhor["potencia_gerada_watts"]

    resultados["d_savonius"] = round(0.2 * melhor["D"], 2)

    resultados["h_savonius"] = round(0.5 * melhor["H"], 2)

    if potencia_desejada > 200:

        resultados["estagios_savonius"] = 2

    else:

        resultados["estagios_savonius"] = 1

else:

    resultados["d_darrieus"] = None

    resultados["h_darrieus"] = None

    resultados["area_darrieus"] = None

    resultados["potencia_gerada_watts"] = None

    resultados["d_savonius"] = None

```

```

    resultados["h_savonius"] = None

    resultados["estagios_savonius"] = None

texto_relatorio = gerar_texto_relatorio(resultados)

print(texto_relatorio)

nome_arquivo =
    f"relatorio_dimensao_{provincia.lower()}_{datetime.datetime.now().strftime('%Y%m%d_%H%M%S')}.txt"

try:
    with open(nome_arquivo, "w", encoding="utf-8") as f:
        f.write(texto_relatorio)

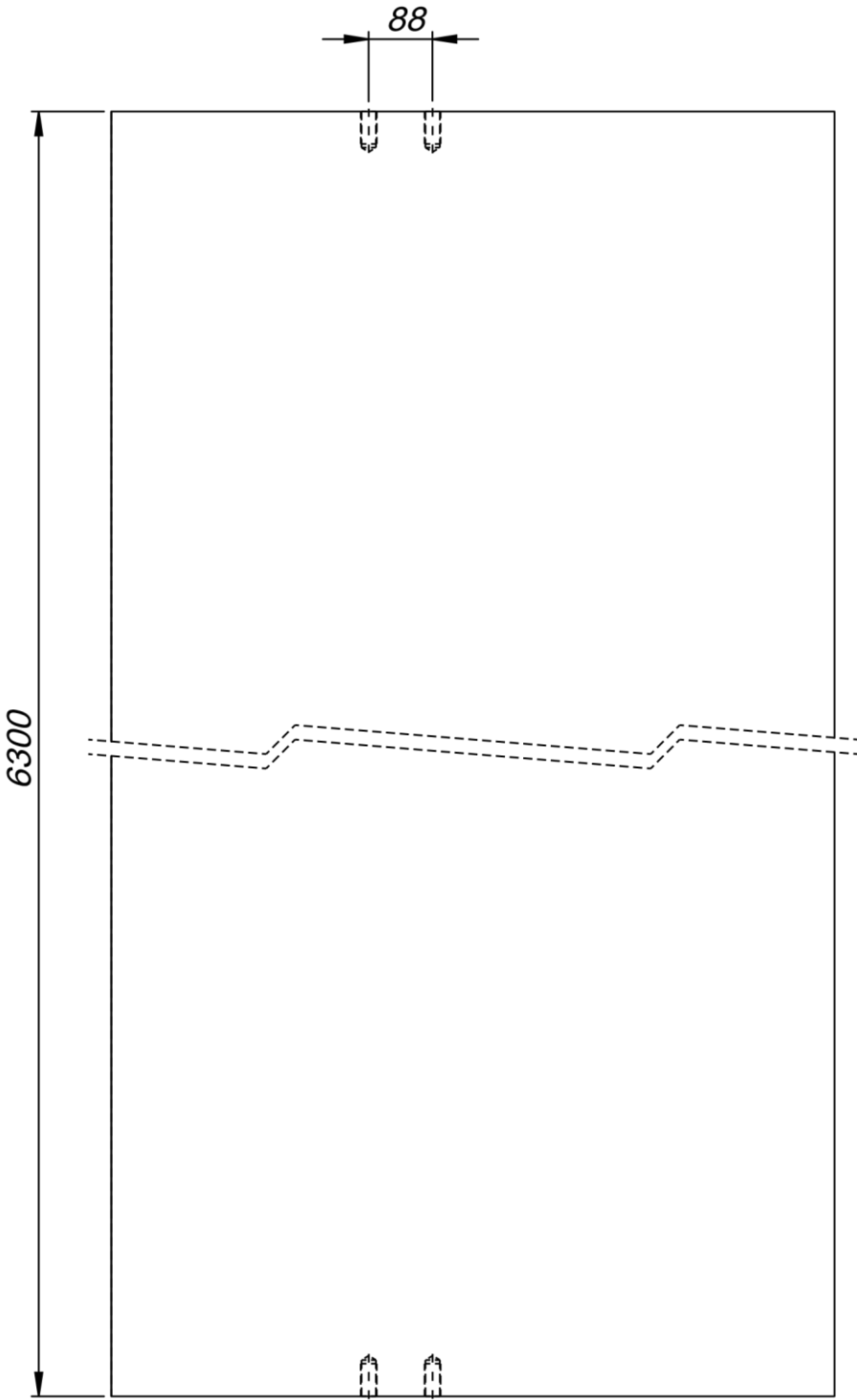
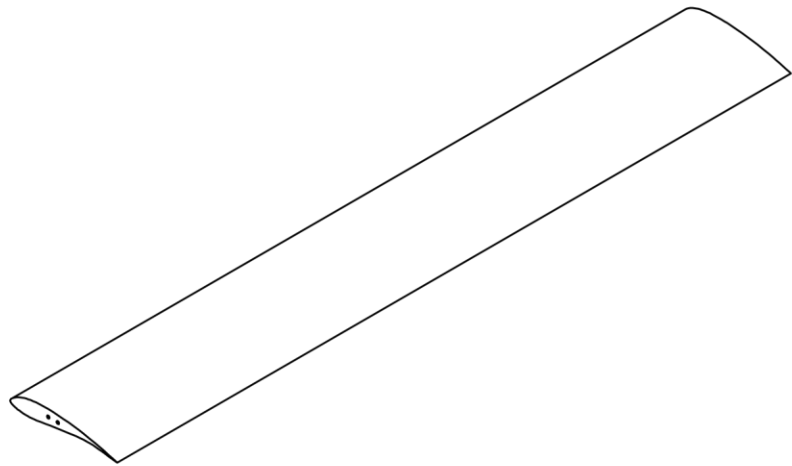
        print(f"\n✓ Relatório salvo em: {nome_arquivo}")
except IOError as e:
    print(f"\n✗ Erro ao salvar relatório: {e}")

# --- EXECUÇÃO PRINCIPAL ---

if __name__ == "__main__":
    print("\n🔧 DIMENSIONAMENTO DE TURBINA HÍBRIDA DARRIEUS–SAVONIUS")
    print("-----")
    base_de_dados_gerada = gerar_base_dados()
    provincia_selecionada = obter_entrada_provincia()
    velocidade_vento, potencia_requerida = obter_entradas_numericas()
    calcular_e gerar_relatorio(provincia_selecionada, velocidade_vento, potencia_requerida,
        base_de_dados_gerada.

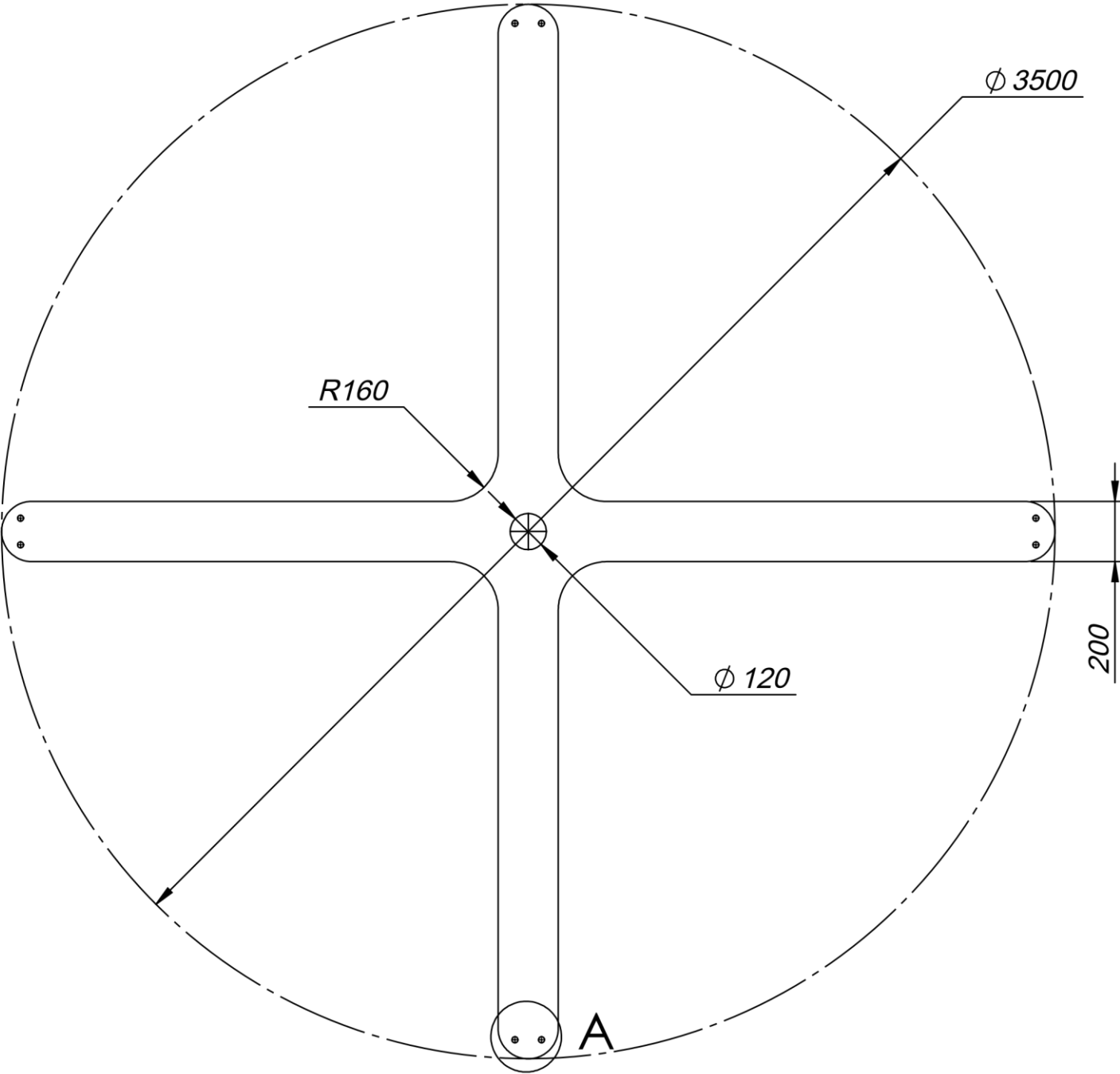
```

x	y	0.583768	0.093405	0.156885	0.095511	0.002505	-0.00023	0.179298	-0.04064	0.623908	0.022937
1	0	0.570741	0.095099	0.145202	0.09268	0.00103	-0.00015	0.19197	-0.0399	0.637557	0.024388
0.9935973	0.002188	0.557728	0.096714	0.133698	0.089577	8.71E-05	-0.00042	0.204675	-0.03891	0.651256	0.025698
0.9855066	0.00474	0.544734	0.098253	0.122417	0.086196	0.000492	-0.00185	0.217417	-0.03767	0.665008	0.026845
0.9765228	0.007475	0.531765	0.099717	0.111425	0.082548	0.001059	-0.00328	0.230204	-0.03622	0.678805	0.027809
0.9665107	0.010439	0.518828	0.101106	0.100795	0.078656	0.001789	-0.00469	0.243039	-0.03458	0.692609	0.02857
0.955391	0.013646	0.505926	0.10242	0.090594	0.074557	0.002686	-0.00611	0.25592	-0.03279	0.70636	0.029113
0.943246	0.017059	0.493059	0.103658	0.080908	0.070304	0.003757	-0.00753	0.268841	-0.03087	0.719993	0.02942
0.9303946	0.020584	0.480226	0.104821	0.071861	0.065988	0.005009	-0.00896	0.281788	-0.02886	0.733488	0.029477
0.9172416	0.024116	0.467424	0.105909	0.063561	0.061709	0.006442	-0.01037	0.294744	-0.02679	0.746881	0.029274
0.9040665	0.027593	0.454652	0.10692	0.056037	0.057536	0.008046	-0.01175	0.307688	-0.02467	0.76025	0.028804
0.89092	0.031018	0.441908	0.107853	0.04924	0.0535	0.009821	-0.0131	0.3206	-0.02254	0.773673	0.028078
0.8777046	0.034418	0.429192	0.108704	0.043087	0.049606	0.011786	-0.01445	0.33347	-0.0204	0.787165	0.027115
0.8643439	0.037807	0.416505	0.109472	0.037521	0.045866	0.013969	-0.01581	0.346305	-0.01826	0.800667	0.025949
0.8508201	0.041182	0.403852	0.110152	0.032535	0.042319	0.016398	-0.01717	0.359132	-0.01613	0.814055	0.024621
0.8371793	0.044523	0.391241	0.110739	0.028117	0.039006	0.019113	-0.01853	0.371982	-0.01399	0.827228	0.023155
0.8234959	0.047813	0.378678	0.111228	0.024228	0.035945	0.022167	-0.01989	0.384881	-0.01187	0.840171	0.021567
0.8098259	0.051041	0.366162	0.111612	0.020806	0.033131	0.025623	-0.02129	0.397837	-0.00975	0.852939	0.019869
0.796198	0.054202	0.353683	0.111884	0.017796	0.030536	0.029548	-0.02274	0.410845	-0.00766	0.865628	0.018077
0.782618	0.057294	0.341222	0.112036	0.015149	0.028118	0.034013	-0.02429	0.423889	-0.00559	0.878293	0.016229
0.7690852	0.060314	0.328756	0.112064	0.012814	0.02584	0.039093	-0.02591	0.436961	-0.00354	0.890914	0.014377
0.7556001	0.063257	0.316274	0.111965	0.010747	0.023674	0.04484	-0.0276	0.450057	-0.00151	0.903399	0.012585
0.7421646	0.066119	0.303774	0.111736	0.008911	0.021596	0.051274	-0.02933	0.463183	0.000502	0.915605	0.010894
0.7287801	0.068895	0.291271	0.111374	0.007273	0.0196	0.058422	-0.03106	0.476346	0.002505	0.927388	0.009309
0.7154448	0.071581	0.278788	0.11087	0.005808	0.017689	0.066367	-0.0328	0.489553	0.004499	0.938639	0.007826
0.7021526	0.074175	0.266343	0.110215	0.004497	0.015862	0.075185	-0.0345	0.502805	0.006483	0.949291	0.006435
0.6888935	0.076676	0.253946	0.109397	0.003344	0.014091	0.084868	-0.03613	0.516103	0.008455	0.959317	0.005126
0.6756589	0.079085	0.2416	0.108404	0.002363	0.012335	0.095292	-0.03762	0.529445	0.010413	0.968725	0.003906
0.6624452	0.081403	0.229301	0.107223	0.001551	0.010594	0.106289	-0.03891	0.542828	0.01235	0.977548	0.002778
0.6492542	0.08363	0.217051	0.105843	0.000898	0.008884	0.11775	-0.03994	0.556251	0.014257	0.985829	0.001738
0.6360925	0.085766	0.204854	0.10425	0.000397	0.007217	0.129603	-0.04068	0.569711	0.016126	0.993614	0.000777
0.6229653	0.087811	0.192721	0.102432	4.29E-05	0.005595	0.141763	-0.04112	0.583206	0.017943	1	0
0.6098727	0.089764	0.180668	0.100378	0.004023	-0.00017	0.154146	-0.04125	0.596736	0.019695		
0.5968099	0.091628	0.168715	0.098074	0.002609	-0.00023	0.166677	-0.04109	0.610302	0.021366		

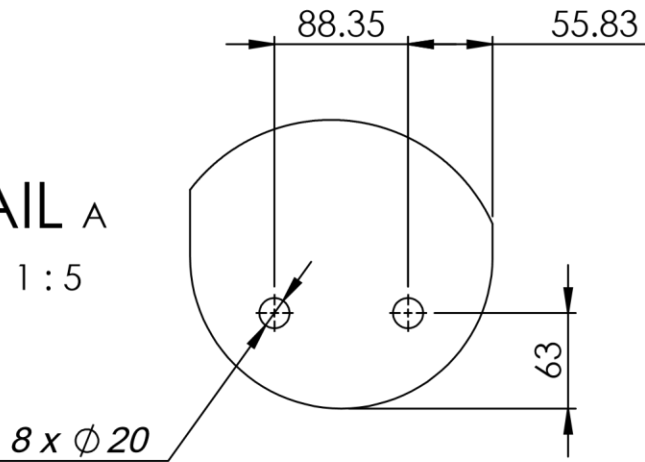


Desenhou	Data	Apelido	DEMA 02 25 TCC DF01			
Tiago	18.01	Cossa				
Verificou	Data	Apelido				
Jorge		Nhambiu				
1:10	Aerofólio NACA 63-415					UEM FE LENEGMEC

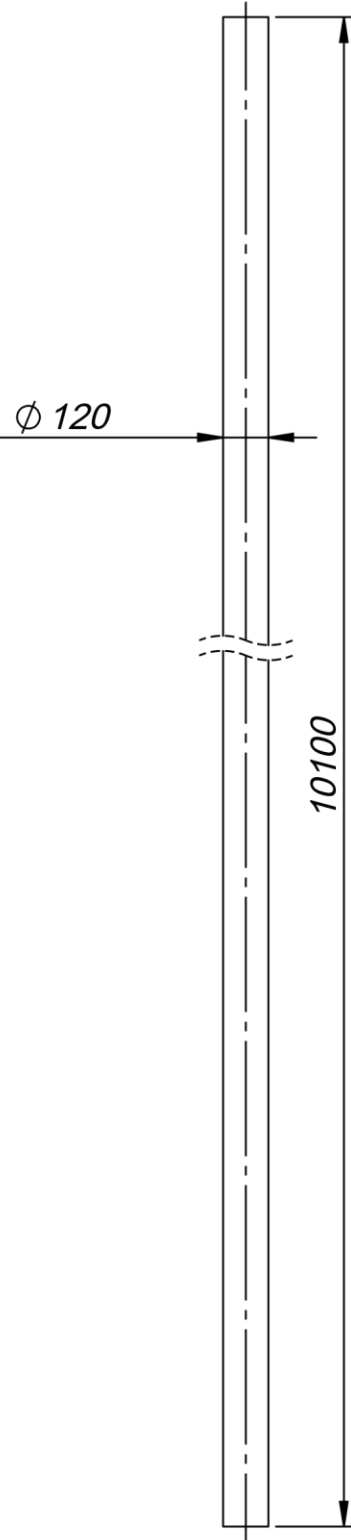
Conector dos Aerofólios



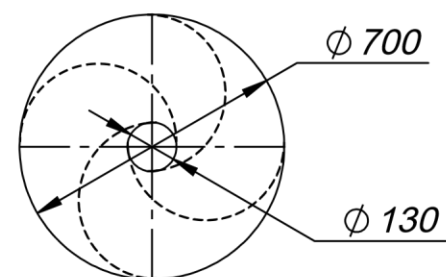
DETAIL A
SCALE 1 : 5



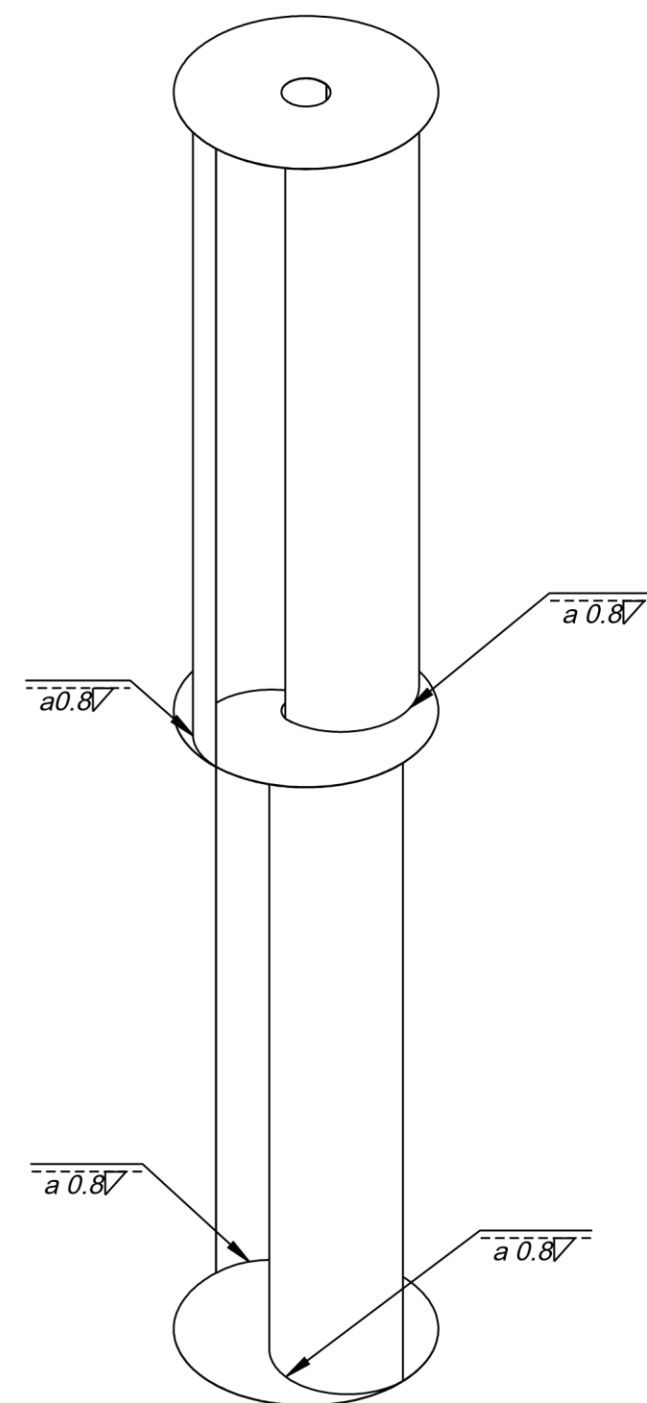
Mastro Rotativo



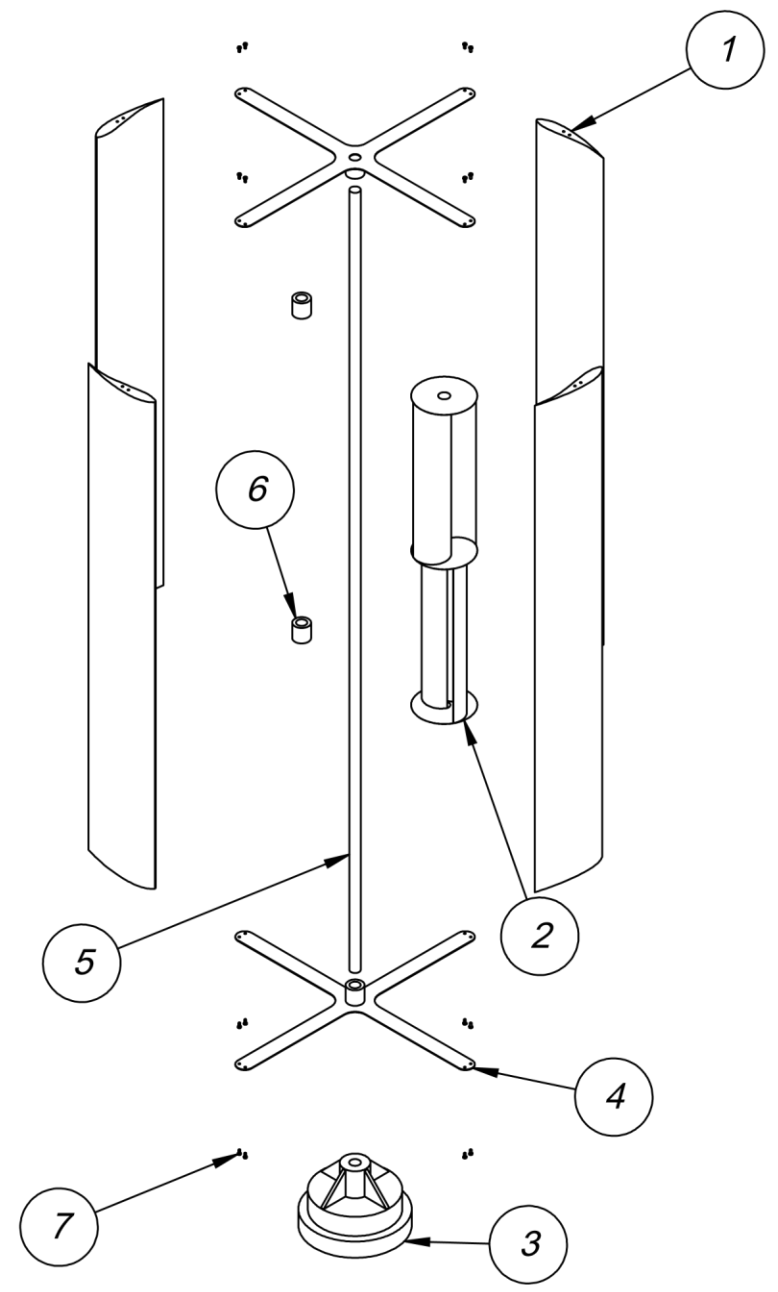
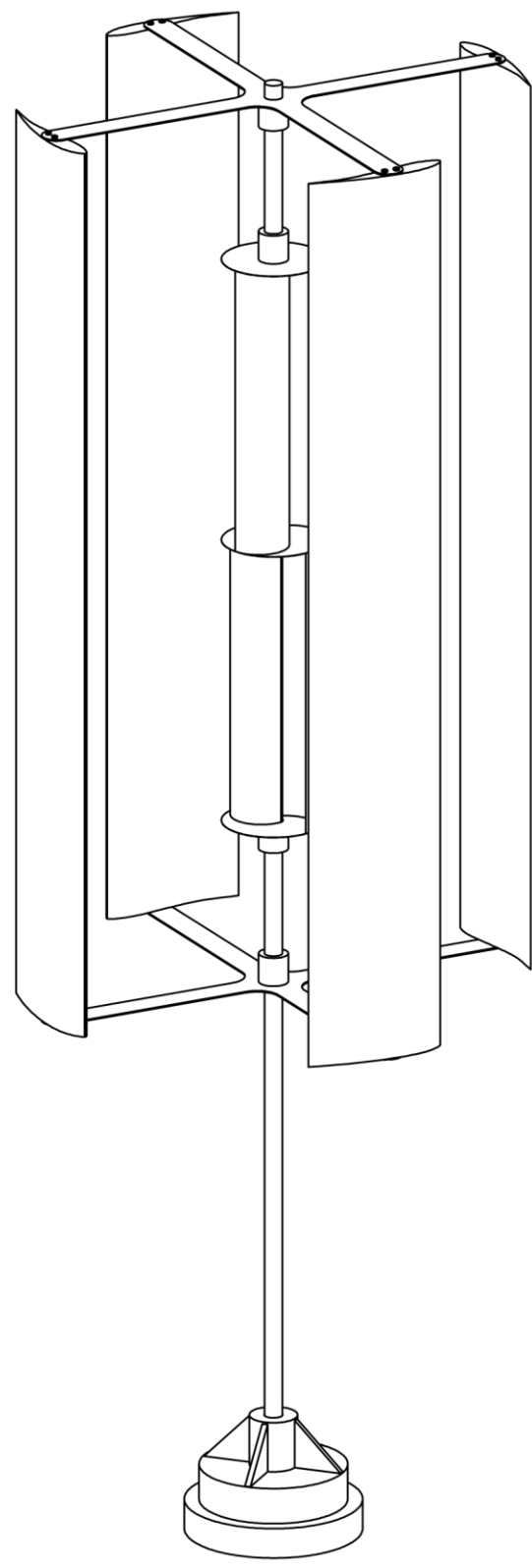
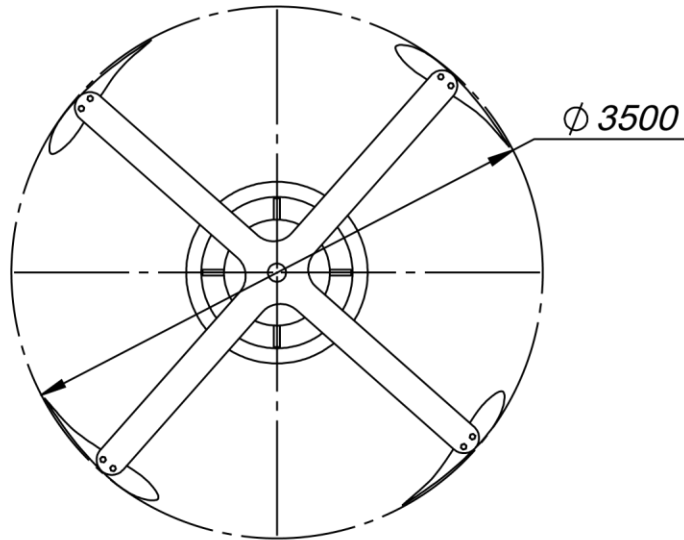
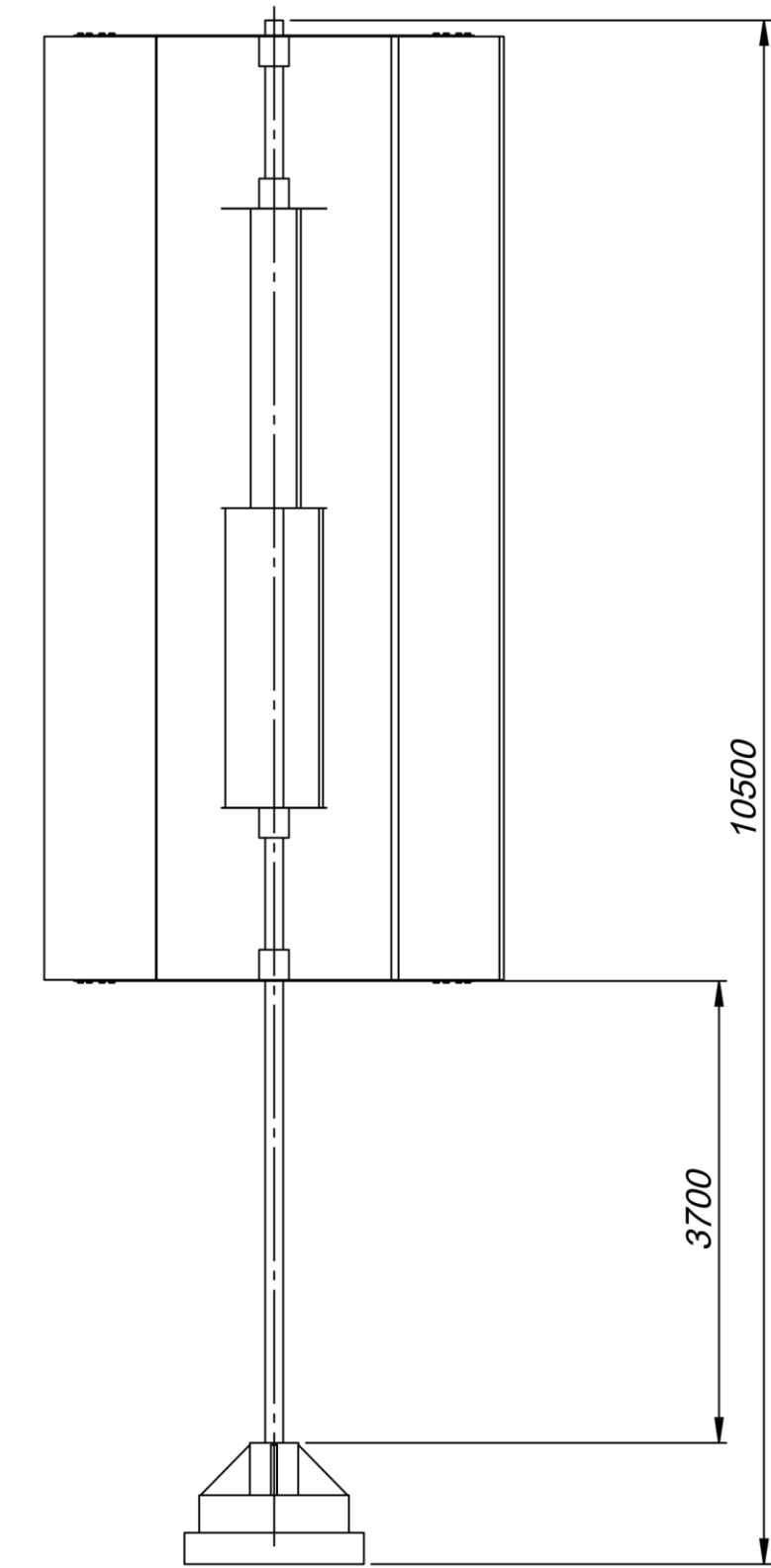
Desenhou	Data	Apelido		DEMA 02 25 TCC DF03					
Tiago	18.07	Cossa							
Verificou	Data	Apelido							
Jorge		Nhambiu							
1:20	Conector dos Aerofólios & Mastro Rotativo			UEM FE LENEGMEC					
							i		



Technical drawing of a semi-circular part. The drawing shows a semi-circle with a radius dimensioned as $R207.25$ and a thickness dimensioned as $Espessura: 1mm$. The drawing is a top view, showing the semi-circular shape and the thickness of the part.



4	Pá de Avanço/Retorno		AI 6061	2			Espeçsura 1mm														
3	Chapa		AI 6061	1			Espeçsura 1mm														
No.	DESIGNAÇÃO	No. DA NORMA No. DESENHO	MATERIAL	No. REF	PRODUTO SEMI ACABADO No. MOLDE No. MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES														
		Desenhou	Data	Apelido	DEMA 02 25 TCC DF02																
		Tiago	18.07	Cossa																	
		Verificou	Data	Apelido																	
		Jorge		Nhambiu																	
1:20		Turbina Savonius			UEM FE LENEGMEC																
					<table><tr><td></td><td></td><td></td><td>ili</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>						ili										
								ili													



16	Parafuso DIN 933 M20	ISO 4017	AISI 1020	7			Parafuso e Arruela
4	Cubo de mastro rotativo		AISI 1020	6			
1	Mastro Rotativo		AISI 1020	5			
2	Conector dos Aerofólios		AISI 1020	4			
1	Caixa de velocidades com Gerador			3			
1	Turbina Savonius		Al 6061	2		170 N	Dois Estágios
4	Aerofólio NACA 63-415		Al 6061	1			
No.	DESIGNAÇÃO	No. DA NORMA No. DESENHO	MATERIAL	No. REF	PRODUTO SEMI ACABADO No. MOLDE No. MATRIZ	PESO	OBSERVAÇÕES

	Desenhou	Data	Apelido						
	Tiago	18.07	Cossa						
	Verificou	Data	Apelido						
	Jorge		Nhambiu						
	1:50	Turbina Híbrida (Darrieus + Savonius)			UEM FE LENEGMEC				
							iv		