

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA COMPUTACIONAL

**Comparação de Geometrias de Hélices para Geração de Energia Eólica:
Experimento de Bancada e Simulação Computacional**

ALLAN HENRIQUES TEIXEIRA ALBUQUERQUE RODRIGUES

JUIZ DE FORA

2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA COMPUTACIONAL

**Comparação de Geometrias de Hélices para Geração de Energia Eólica:
Experimento de Bancada e Simulação Computacional**

ALLAN HENRIQUES TEIXEIRA ALBUQUERQUE RODRIGUES

JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

2026

Comparação de Geometrias de Hélices para Geração de Energia Eólica: Experimento de Bancada e Simulação Computacional

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Computacional.

Área de conhecimento: Engenharia Computacional

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Flávia de Souza Bastos

JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

2026

Comparação de Geometrias de Hélices para Geração de Energia Eólica: Experimento de Bancada e Simulação Computacional

**ALLAN HENRIQUES TEIXEIRA ALBUQUERQUE
RODRIGUES**

Trabalho Final de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com as normas estabelecidas pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Computacional.

Aprovado em: 13/01/2026

Por:

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Flávia de Souza Bastos

Prof^a. Dra. Sara Del Vecchio

Prof^a. Dra. Patrícia Habib Hallak

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as graças concedidas e pela proteção ao longo do caminho.

Este trabalho é dedicado à minha mãe Zilda e ao meu pai Paulo, por terem apoiado incondicionalmente meus estudos e minha trajetória, me permitirem chegar aonde estou hoje. Agradeço a minha família estendida, meus tios e primos, pelo apoio e compreensão. Em especial, agradeço ao Sérgio Júnior por me acompanhar em cada momento deste projeto e também ao Cláudio Rodrigues e a Diana Mota pelos ensinamentos e revisões.

Manifesto minha profunda gratidão à minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Flávia de Souza Bastos. Sua condução precisa, paciência e incentivo constante foram fundamentais não apenas para a conclusão deste trabalho, mas para o meu amadurecimento como pesquisador e engenheiro. Obrigado por acreditar em mim e neste projeto.

Estendo meu reconhecimento aos professores da Universidade Federal de Juiz de Fora que foram pilares na minha graduação, em especial a Leonardo Goliatt, Alessandra Oliveira, Rodrigo Weber e Ruy Freitas. O conhecimento compartilhado e o exemplo profissional de vocês serviram de grande inspiração. Agradeço, igualmente, a todo o corpo docente dos departamentos de Ciência da Computação (DCC) e Mecânica Aplicada e Computacional (MAC), pelo ambiente de excelência e aprendizado.

Não poderia deixar de honrar as raízes da minha formação. Um tributo especial aos professores do ensino fundamental e médio que despertaram em mim a paixão pelo estudo. De modo particular, minha eterna gratidão a Denise, Márcio, Paula, Vanessa e Waldyr, mestres que marcaram minha trajetória e contribuíram decisivamente para a construção dos valores e da base intelectual que me trouxeram até aqui.

Por fim, um agradecimento especial aos amigos da Code Empresa Júnior de Computação, da equipe Hult Prize de 2018, da turma de Trabalho Multidisciplinar e projeto de extensão LabMaker. O convívio, as trocas de experiências e o apoio de vocês em cada uma dessas etapas foram essenciais para esta conquista. Deixo meu reconhecimento singular a Ian Marson, Jefferson Pereira, Rafael Kenji, Ana Fialho, Ketleen Faria, Samuel Henrique, Vitória Isabela, Guilherme Decoló, Bruno Moraes, Víctor Oliveira e Eduardo Araújo, cuja amizade e parceria tornaram essa jornada mais leve e memorável. Pois, embora a técnica e a ciência construam o futuro, são as pessoas que dão sentido à caminhada.

"Ninguém pode entrar duas vezes no mesmo rio, pois, quando nele se entra novamente, não se encontra as mesmas águas e o próprio ser já se modificou".

Heráclito de Éfeso

RESUMO

A expansão do setor energético sustentável demanda o desenvolvimento de tecnologias acessíveis e eficientes para microgeração. Este trabalho apresenta uma análise comparativa de desempenho entre hélices eólicas de três e quatro pás, baseadas no perfil aerodinâmico E205, utilizando uma metodologia híbrida que integra simulação computacional e experimentação física. As simulações foram realizadas no software OpenFOAM v9, empregando o método de Volumes Finitos (FVM), modelo de turbulência RANS $k - \epsilon$ e a técnica de Interface de Malha Arbitrária (AMI) para reproduzir o comportamento do rotor em um túnel de vento virtual. Experimentalmente, foram manufacturados protótipos em PLA via impressão 3D e testados em bancada instrumentada, onde a velocidade angular foi aferida por um sistema não intrusivo de visão computacional. Os resultados demonstraram que a geometria de quatro pás apresentou desempenho superior, atingindo maior rotação de estabilização (25,52 rad/s contra 23,64 rad/s) e maior coeficiente de potência (C_p) nas condições de teste aplicadas. A comparação entre os modelos revelou uma discrepância quantitativa esperada entre a potência mecânica bruta simulada ($\approx 0,4$ W) e a potência elétrica útil medida ($\approx 0,003$ W), evidenciando que as perdas por conversão eletromecânica são o fator limitante em microturbinas, e não o design aerodinâmico. Conclui-se que a metodologia proposta consegue confirmar que a configuração de quatro pás é mais eficiente que a de três para o experimento realizado.

Palavras-chave: Energias Renováveis; CFD; OpenFOAM; Visão Computacional; Eficiência Aerodinâmica; Microgeração.

ABSTRACT

The expansion of the sustainable energy sector demands the development of accessible and efficient technologies for microgeneration. This work presents a comparative performance analysis between three-bladed and four-bladed wind propellers, based on the E205 aerodynamic profile, using a hybrid methodology that integrates computational simulation and physical experimentation. Simulations were performed using OpenFOAM v9 software, employing the Finite Volume Method (FVM), the RANS $k - \epsilon$ turbulence model, and the Arbitrary Mesh Interface (AMI) technique to reproduce rotor behavior in a virtual wind tunnel. Experimentally, PLA prototypes were manufactured via 3D printing and tested on an instrumented bench, where angular velocity was measured by a non-intrusive computer vision system. Results showed that the four-bladed geometry exhibited superior performance, achieving a higher steady-state rotation (25.52 rad/s versus 23.64 rad/s) and a higher power coefficient (C_p) under the applied test conditions. The comparison between models revealed an expected quantitative discrepancy between the simulated gross mechanical power (≈ 0.4 W) and the measured useful electrical power (≈ 0.003 W), evidencing that electromechanical conversion losses are the limiting factor in microturbines, rather than the aerodynamic design. It is concluded that the proposed methodology successfully confirms that the four-bladed configuration is more efficient than the three-bladed one for the conducted experiment.

Keywords: Renewable Energy; CFD; OpenFOAM; Computer Vision; Aerodynamic Efficiency; Microgeneration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Materiais e instrumentação utilizados no experimento de bancada. . . .	27
Figura 2 – Representação visual da geometria da pá. Em (a), detalham-se os parâmetros geométricos da seção (corda e torção). Em (b), apresenta-se as seções para formar a superfície através da técnica de <i>Loft</i>	29
Figura 3 – Modelagem geométrica no FreeCAD e ângulo de <i>pitch</i> . Fonte: Acervo próprio.	29
Figura 4 – Variação da posição e rotação dos airfoils na modelagem da hélice. Fonte: Acervo próprio.	30
Figura 5 – Modelo final da pá da hélice e seu sistema de encaixe. Fonte: Acervo próprio.	31
Figura 6 – Processo de modelagem do <i>hub</i> . Fonte: Acervo próprio.	31
Figura 7 – Processo de montagem e exportação da hélice. Fonte: Acervo próprio. .	32
Figura 8 – Como foi feito o ajuste para acoplamento das hélices no motor. Apesar de só ter ilustrado o procedimento para uma configuração de hélice, ele é o mesmo para o outro. Fonte: Acervo próprio.	33
Figura 9 – Painel com a configuração experimental. A Figura (a) mostra o esquema de montagem do experimento. As Figuras (b) e (c) exibem as hélices montadas com um marcador na ponta de uma das pás para rastreamento por visão computacional. Fonte: Acervo próprio.	34
Figura 10 – Metodologia de aquisição de dados visuais. Em (a), a definição do marcador de cor para rastreamento. Em (b), a interface do software em execução.	36
Figura 11 – Visualização da malha do caso <i>propeller</i> , destacando a região interna rotativa e a interface com o domínio estático. Fonte: Acervo próprio. .	37
Figura 12 – Domínio e geometria resultante. Após criação da malha inicial com o <i>blockMesh</i> , o utilitário <i>snappyHexMesh</i> recorta a malha da figura da esquerda utilizando arquivos <i>stl</i> que contem o cilindro maior, o cilindro que representa o AMI e a hélice em questão. O resultado é apresentado na figura da direita. A hélice está dentro do cilindro menor que representa o AMI.	40
Figura 13 – Gráficos de velocidade angular em função do tempo, obtidos por visão computacional, para as hélices de 3 e 4 pás. Fonte: Acervo próprio. . .	47
Figura 14 – Visualizações do campo de escoamento ao redor das hélices de 3 e 4 pás em regime permanente. Escolha da Hélice 3 para representar a camada limite e as linhas de fluxo foi arbitrária. Fonte: Acervo próprio. . . .	49

Figura 15 – Árvore de diretórios contendo as definições de malha (constant), condições de contorno (0) e controle de solução (system). 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação da corda e rotação dos perfis aerodinâmicos ao longo da pá.	28
Tabela 2 – Métricas de qualidade topológica e geométrica das malhas.	41
Tabela 3 – Classificação das condições de contorno e tipos primitivos aplicados.	45
Tabela 4 – Cálculo da Potência Elétrica Gerada no Experimento	47
Tabela 5 – Comparativo de desempenho aerodinâmico entre as hélices de 3 e 4 pás.	48
Tabela 6 – Coordenadas dos vértices do bloco base ($1,0 \times 1,1 \times 1,0$ m).	55
Tabela 7 – Mapeamento de faces e condições de contorno preliminares.	55
Tabela 8 – Dimensões das geometrias auxiliares (formato STL).	56
Tabela 9 – Configuração dos esquemas numéricos para os termos das equações.	59
Tabela 10 – Configuração dos solvers para os sistemas lineares.	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMI	<i>Arbitrary Mesh Interface</i> (Interface de Malha Arbitrária)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinâmica dos Fluidos Computacional)
CM	Centro de Massa
COP	<i>Conference of the Parties</i> (Conferência das Partes)
CPU	<i>Central Processing Unit</i> (Unidade Central de Processamento)
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i> (Simulação Numérica Direta)
FEA	<i>Finite Element Analysis</i> (Análise de Elementos Finitos)
FPS	<i>Frames Per Second</i> (Quadros por Segundo)
FSI	<i>Fluid-Structure Interaction</i> (Interação Fluido-Estrutura)
FVM	<i>Finite Volume Method</i> (Método dos Volumes Finitos)
GAMG	<i>Geometric Algebraic Multi-Grid</i> (Multigrid Algébrico Geométrico)
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i> (Conselho Global de Energia Eólica)
HAWT	<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i> (Turbina Eólica de Eixo Horizontal)
HSV	<i>Hue, Saturation, Value</i> (Matiz, Saturação, Valor)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MAC	Mecânica Aplicada e Computacional
MAV	<i>Micro Air Vehicle</i> (Micro Veículo Aéreo)
PBiCGStab	<i>Preconditioned Bi-Conjugate Gradient Stabilized</i> (Gradiente Bi-Conjugado Estabilizado Pré-condicionado)
PCG	<i>Preconditioned Conjugate Gradient</i> (Gradiente Conjugado Pré-condicionado)
PIMPLE	<i>PISO-SIMPLE</i> (Fusão dos algoritmos PISO e SIMPLE)

PLA	<i>Polylactic Acid</i> (Ácido Polilático)
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i> (Policloreto de Vinila)
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i> (Navier-Stokes com Média de Reynolds)
RAS	<i>Reynolds Averaged Simulation</i> (Simulação com Média de Reynolds)
RGB	<i>Red, Green, Blue</i> (Vermelho, Verde, Azul)
ROI	<i>Region of Interest</i> (Região de Interesse)
STL	<i>Stereolithography</i> (Estereolitografia)
UHD	<i>Ultra High Definition</i> (Ultra Alta Definição)
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contexto Histórico da Energia Eólica e Energia Sustentável no Brasil . .	15
1.2	Principais Desafios	16
1.3	Objetivos do Trabalho	17
1.3.1	Objetivo Geral	17
1.3.2	Objetivos Específicos	17
1.4	Estruturação do Trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Aerodinâmica de Turbinas de Eixo Horizontal	18
2.2	Equações Governantes do Escoamento de Fluidos	19
2.2.1	Propriedades Termofísicas e Determinação da Densidade do Ar	20
2.3	Modelagem da Turbulência	21
2.3.1	Modelo $k-\epsilon$	22
2.4	Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)	23
2.4.1	A Equação Geral de Transporte	23
2.4.2	Método dos Volumes Finitos (FVM)	23
2.5	Análise de Desempenho Aerodinâmico	24
3	METODOLOGIA: MODELAGEM COMPUTACIONAL E MON- TAGEM DO EXPERIMENTO FÍSICO	26
3.1	Materiais e Recursos Computacionais	26
3.2	Métodos Experimentais	28
3.2.1	Design e Manufatura das Hélices	28
3.2.2	Configuração e Execução do Experimento	32
3.3	Visão computacional	34
3.3.1	Segmentação do Marcador e Espaço de Cores HSV	35
4	METODOLOGIA: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	37
4.1	Análise do Caso <i>propeller</i> como Referência para Modelagem Eólica . . .	37
4.1.1	Topologia de Malha e Interface AMI	37
4.1.2	O Solver <i>pimpleDyMFoam</i>	38
4.1.3	Extração de Dados via Objeto <i>forces</i>	38
4.1.4	Síntese e Adaptação para o Cenário Eólico	38
4.2	Configuração Numérica do Caso Eólico	39

4.3	Domínio e Geração da Malha	39
4.4	Diagnóstico e Verificação da Qualidade da Malha	40
4.4.1	Análise de Não-Ortogonalidade	41
4.4.2	Enviesamento (<i>Skewness</i>) e Robustez Numérica	41
4.4.3	Topologia e Regiões Desconectadas	42
4.5	Cálculo da Densidade do Ar e Parâmetros de Turbulência	42
4.6	Estratégia de Solução Numérica	43
4.7	Definição das Condições de Contorno e Tratamento da Camada Limite .	44
5	RESULTADOS	46
5.1	Parâmetros de Convergência da Simulação	46
5.2	Resultados Experimentais	46
5.3	Resultados de Desempenho Aerodinâmico da Simulação Computacional	47
5.3.1	Análise Visual dos Resultados da Simulação	48
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO	50
6.1	Análise da Discrepância Energética: Mecânica vs. Elétrica	50
6.2	Influência da Solidez e Número de Pás	51
6.3	Limitações do Estudo e Recomendações	51
6.4	Estabilidade e Convergência Numérica	52
6.4.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	52
6.5	Conclusão	53
	APÊNDICE A – Parâmetros Geométricos para Reprodução	
	da Malha	55
A.1	Definição do Bloco Base (<i>blockMesh</i>)	55
A.2	Dimensões das Geometrias STL	55
A.3	Configuração da Interface Rotativa (AMI)	56
	APÊNDICE B – Memória de Cálculo das Propriedades Físicas	
	e Numéricas	57
B.1	Cálculo da Densidade do Ar (ρ)	57
B.2	Estimativa dos Parâmetros de Turbulência	58
B.3	Cinemática do Movimento Prescrito (Rampa)	58
	APÊNDICE C – Tabelas de Configuração Numérica do Open-	
	FOAM	59
C.1	Esquemas de Discretização (fvSchemes)	59
C.2	Solucionadores Lineares (fvSolution)	59

C.3	Estrutura de Diretórios do Caso	60
-----	---	----

	REFERÊNCIAS	61
--	------------------------------	-----------

1 INTRODUÇÃO

A crescente urgência climática global e a necessidade de ampliar a segurança energética impulsionam uma transição mundial para fontes renováveis. A realização da 30ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 30) no Brasil, em 2025, reforça o protagonismo do país e da América Latina no cenário energético mundial (Schuck, 2025). Nesse contexto, a energia eólica emerge como um dos principais vetores de descarbonização, beneficiada pelos avanços tecnológicos e pela ampliação de projetos em larga escala (Global Wind Energy Council, 2020).

Entretanto, apesar do seu crescimento acelerado, a energia eólica ainda enfrenta desafios técnicos, econômicos e ambientais. O desenvolvimento de turbinas eficientes depende de estudos aprofundados que integrem aerodinâmica, materiais, instrumentação e simulação computacional de alta fidelidade. Além disso, como apontado por Veers *et al.* (2023), persistem discrepâncias importantes entre previsões numéricas e desempenho real, o que torna a validação experimental indispensável.

Este trabalho insere-se nesse cenário, não apenas contribuindo para a consolidação de metodologias de desenvolvimento de turbinas eólicas via ferramentas de código aberto, mas também atuando como uma plataforma educacional de baixo custo, visando despertar o interesse acadêmico pela modelagem computacional e por projetos de engenharia multidisciplinar.

1.1 Contexto Histórico da Energia Eólica e Energia Sustentável no Brasil

A energia eólica evoluiu de uma solução de nicho para uma componente central da infraestrutura elétrica global, impulsionada pela redução de custos e pelo aumento da eficiência dos aerogeradores (Veers *et al.*, 2023; Global Wind Energy Council, 2020). Relatórios recentes indicam que a América Latina deverá acrescentar mais de 26 GW de capacidade renovável até o final da década, com predominância de fontes eólica e solar (Schuck, 2025).

O Brasil, em particular, destaca-se como um dos maiores produtores de energia eólica do hemisfério sul, beneficiando-se de condições climáticas favoráveis e de uma cadeia produtiva em amadurecimento, que já se mobiliza para atender novas demandas tecnológicas como a geração *offshore* e a qualificação de mão de obra especializada (ABEEólica, 2024). Ainda assim, conforme apontado por Rabelo *et al.* (2023), o país apresenta forte dependência tecnológica externa, especialmente no desenvolvimento de turbinas, sistemas de controle e componentes aerodinâmicos.

Tal dependência evidencia a necessidade estratégica de pesquisa aplicada que explore

abordagens inovadoras, acessíveis e de baixo custo para o entendimento do comportamento aerodinâmico de turbinas, permitindo o avanço científico e tecnológico do setor no Brasil.

1.2 Principais Desafios

A expansão da energia eólica, embora promissora e estratégica para a transição energética, ainda enfrenta um conjunto de desafios que precisam ser cuidadosamente considerados. Do ponto de vista ambiental, estudos têm demonstrado impactos relevantes sobre a fauna aviária, além de efeitos associados ao ruído, ao sombreamento intermitente provocado pelas pás e às demandas específicas de uso do solo (Loss; Will; Marra, 2013; Adeyeye; Ijumba; Colton, 2020; Sunak; Madlener, 2016; Arnett; Baerwald, 2012). Esses fatores, amplamente discutidos na literatura, reforçam a necessidade de aprimorar práticas de planejamento e mitigação ambiental para garantir a sustentabilidade dos empreendimentos.

No campo tecnológico, o avanço contínuo dos aerogeradores exige a melhoria de materiais compósitos utilizados na fabricação das pás, o aumento da eficiência aerodinâmica e a integração cada vez mais sofisticada com redes elétricas inteligentes (*smart grids*). Pesquisas recentes (Magar *et al.*, 2023; Brøndsted; Nijssen; Goutianos, 2023) destacam que a combinação dessas inovações é crucial para elevar o desempenho, reduzir custos operacionais e ampliar a confiabilidade do sistema como um todo.

Há também importantes desafios numéricos e de modelagem, uma vez que resultados provenientes de simulações em dinâmica dos fluidos computacional (CFD) ainda apresentam discrepâncias relevantes quando comparados a medições experimentais. Conforme apontado em Veers *et al.* (2023), a superação dessas divergências depende do desenvolvimento de metodologias robustas de validação, capazes de aproximar os modelos, computacionais do comportamento físico real, especialmente em cenários de operação complexa.

Por fim, não se pode negligenciar os desafios econômicos. Ensaaios experimentais em túneis de vento, apesar de fundamentais para obtenção de dados confiáveis, são caros e frequentemente inacessíveis para grupos de pesquisa menores ou pequenas empresas. Essa barreira financeira limita a realização de testes sistemáticos e, conseqüentemente, dificulta a evolução de projetos inovadores que dependem de validações experimentais detalhadas.

Assim, o fortalecimento da energia eólica depende de uma abordagem integrada que considere simultaneamente os aspectos ambientais, tecnológicos, numéricos e econômicos, promovendo soluções que permitam seu desenvolvimento sustentável, eficiente e amplamente acessível.

1.3 Objetivos do Trabalho

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é analisar a eficiência aerodinâmica e o desempenho energético de hélices eólicas de três e quatro pás utilizando uma metodologia híbrida composta por experimentação física de baixo custo e simulação numérica via OpenFOAM.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para alcançar esse objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Projetar e fabricar, hélices baseadas em perfil aerodinâmico.
- Desenvolver um sistema de medição experimental.
- Realizar simulações transientes.
- Comparar os dados experimentais e computacionais.

1.4 Estruturação do Trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 2 Fundamentação Teórica:** apresenta os conceitos fundamentais de mecânica dos fluidos, aerodinâmica, turbulência e método dos volumes finitos utilizados nas simulações.
- **Capítulo 3 Metodologia Modelagem Geométrica e Experimento Físico:** descreve o processo de modelagem geométrica e fabricação experimental.
- **Capítulo 4 Metodologia Simulação Computacional:** descreve o processo de configuração do domínio computacional e parâmetros do OpenFOAM.
- **Capítulo 5 Resultados :** apresenta os resultados obtidos experimentalmente e numericamente, comparando os desempenhos das hélices.
- **Capítulo 6 Discussão e Conclusões :** sintetiza as principais conclusões, limitações do estudo e recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os fundamentos físicos, matemáticos e numéricos que sustentam o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, descrevem-se as equações governantes da mecânica dos fluidos e os métodos utilizados para a determinação das propriedades termofísicas do ar atmosférico. Em seguida, discute-se a modelagem da turbulência e os princípios da formulação numérica adotada pela Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), com ênfase no Método dos Volumes Finitos (FVM). Posteriormente, abordam-se os fundamentos da aerodinâmica de turbinas eólicas e, por fim, os princípios de visão computacional empregados na medição experimental.

2.1 Aerodinâmica de Turbinas de Eixo Horizontal

As turbinas eólicas são dispositivos mecânicos projetados para converter a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação. Elas são classificadas primariamente pela orientação do seu eixo de rotação em relação à direção do escoamento. As Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal (HAWT — *Horizontal Axis Wind Turbines*) representam a configuração dominante na indústria de geração de energia moderna, variando desde microgeradores até máquinas de grande escala na ordem de megawatts (Vian *et al.*, 2021).

Nesta configuração, o eixo do rotor posiciona-se paralelamente ao fluxo de vento incidente. O componente fundamental para a conversão de energia é a hélice (ou rotor), composta por duas ou mais pás fixadas a um cubo central (*hub*). Diferentemente de moinhos antigos que operavam baseados na força de arrasto, as turbinas modernas utilizam pás com perfis aerodinâmicos (*airfoils*) otimizados para gerar força de sustentação (*lift*), princípio análogo ao das asas de aviões (Burton *et al.*, 2001).

Segundo Hansen (2015), quando o escoamento incide sobre o perfil da pá, a curvatura e o ângulo de ataque geram uma diferença de velocidade e, conseqüentemente, de pressão entre as superfícies superior (extradorso ou lado de sucção) e inferior (intradorso ou lado de pressão). A força resultante aerodinâmica é decomposta em duas componentes principais: a sustentação, perpendicular ao vetor velocidade relativa, e o arrasto, paralelo a este. É a projeção da força de sustentação na direção tangencial ao plano de rotação que gera o torque motor responsável por acionar o eixo da turbina (Burton *et al.*, 2001).

A geometria das pás de uma HAWT é complexa devido à variação da velocidade tangencial ao longo do raio ($v = \omega r$). Próximo ao cubo, a velocidade linear de rotação é baixa, enquanto na ponta da pá ela é máxima. Para manter um ângulo de ataque eficiente ao longo de toda a envergadura e otimizar a extração de energia, a pá deve apresentar variação na largura da corda e uma torção geométrica (*twist*) progressiva da raiz até a

ponta (Vian *et al.*, 2021; Hansen, 2015).

A eficiência máxima teórica com que uma turbina ideal, de qualquer projeto, pode extrair energia do vento é limitada a 59,3%, valor conhecido como Limite de Betz (Betz, 1920). No entanto, perdas aerodinâmicas por arrasto, efeitos de ponta de pá e esteira rotacional fazem com que turbinas reais operem abaixo deste limite teórico (Burton *et al.*, 2001).

2.2 Equações Governantes do Escoamento de Fluidos

O escoamento de ar ao redor de uma hélice é modelado considerando o ar como um fluido newtoniano e incompressível ($Mach < 0,3$). Sob estas condições, a dinâmica do fluido é regida pela equação de Navier-Stokes, que representa a conservação da quantidade de movimento para propriedades constantes. Segundo Munson *et al.* (2013), o balanço vetorial entre as forças de inércia, pressão, viscosidade e campo gravitacional é expresso por:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \rho \mathbf{g} \quad (2.1)$$

Para garantir a conservação da massa no regime incompressível, assume-se implicitamente que o divergente do campo de velocidade é nulo ($\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$). As variáveis da equação são definidas como:

- \mathbf{V} : Vetor velocidade do escoamento;
- ρ : Massa específica (densidade) do fluido;
- p : Pressão estática;
- μ : Viscosidade dinâmica;
- \mathbf{g} : Vetor aceleração da gravidade;
- ∇^2 : Operador Laplaciano, representando a difusão viscosa.

Em notação indicial (convenção de Einstein), a conservação da quantidade de movimento para as três direções espaciais ($i = 1, 2, 3$) é expressa por:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \quad (2.2)$$

Nesta equação, adota-se a notação indicial com a convenção de soma de Einstein, onde índices repetidos em um mesmo termo (neste caso, o índice j) indicam um somatório sobre as três dimensões espaciais ($j = 1, 2, 3$). As variáveis são definidas como:

- x_i, x_j : Coordenadas espaciais cartesianas, onde $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$;
- U_i, U_j : Componentes do vetor velocidade correspondentes às direções i e j ;
- p : Pressão estática;
- ρ : Massa específica do fluido;
- ν : Viscosidade cinemática (μ/ρ);
- g_i : Componente do vetor aceleração da gravidade na direção i .

O índice i é o índice livre, indicando que esta expressão representa um sistema de três equações distintas (uma para cada componente do vetor quantidade de movimento).

Já a equação da continuidade, representando a conservação de massa para fluido incompressível (divergente nulo), é dada pelo somatório implícito dos índices repetidos:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.3)$$

2.2.1 Propriedades Termofísicas e Determinação da Densidade do Ar

A densidade do ar atmosférico (ρ) varia com temperatura, pressão e umidade. Para condições experimentais reais, a aproximação de gás ideal seco pode introduzir imprecisões. Neste trabalho, utiliza-se a equação de Tetens para estimar a pressão de saturação do vapor d'água, método padrão em meteorologia para a faixa de temperatura de 0°C a 50°C (Tetens, 1930).

A pressão de saturação (p_{sat}), em Pascals, é calculada como (Tetens, 1930):

$$p_{sat} = 610,78 \cdot \exp\left(\frac{17,27 T_c}{T_c + 237,3}\right) \quad (2.4)$$

Sendo T_c a temperatura em graus Celsius. A pressão parcial do vapor d'água (p_v) é função da umidade relativa ϕ (Munson *et al.*, 2013):

$$p_v = \phi \cdot p_{sat} \quad (2.5)$$

A pressão parcial do ar seco (p_d) é obtida pela lei de Dalton das pressões parciais. A equação é válida para ambientes não pressurizados: (Munson *et al.*, 2013):

$$p_d = P_{atm} - p_v \quad (2.6)$$

A densidade final do ar úmido é determinada pela equação de estado dos gases ideais aplicada à mistura (Munson *et al.*, 2013):

$$\rho = \frac{p_d}{R_d T_k} + \frac{p_v}{R_v T_k} \quad (2.7)$$

onde T_k é a temperatura em Kelvin, $R_d = 287,05 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ é a constante específica do ar seco e $R_v = 461,5 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ a do vapor d'água.

2.3 Modelagem da Turbulência

O Número de Reynolds (Re) é o parâmetro adimensional fundamental que governa a semelhança dinâmica em escoamentos de fluidos, representando a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas (Munson *et al.*, 2013).

Neste trabalho, a caracterização do regime de escoamento adota uma abordagem global, utilizando o diâmetro do rotor (D) como comprimento característico e a velocidade do vento incidente (U_∞) como escala de velocidade. A definição matemática (Fox *et al.*, 2018) é dada por:

$$Re_D = \frac{\rho U_\infty D}{\mu} \quad (2.8)$$

Onde:

- ρ : Massa específica do ar (kg/m^3);
- U_∞ : Velocidade característica do escoamento não perturbado (m/s);
- D : Diâmetro total da hélice (m);
- μ : Viscosidade dinâmica do ar ($\text{Pa} \cdot \text{s}$).

Para garantir a precisão dos cálculos experimentais e numéricos, a viscosidade dinâmica (μ) não é considerada constante, mas sim dependente da temperatura do fluido. Esta correção é realizada através da Lei de Sutherland, conforme descrito por Munson *et al.* (2013) e Ferziger & Perić (2002):

$$\mu(T) = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T + S} \quad (2.9)$$

Onde T é a temperatura absoluta do ar (em Kelvin), μ_0 é a viscosidade de referência na temperatura T_0 , e S é a constante de Sutherland para o ar.

A análise dimensional confirma a natureza adimensional do parâmetro, uma vez que as unidades de força no numerador e denominador se anulam:

$$[Re] = \frac{[kg/m^3] \cdot [m/s] \cdot [m]}{[kg/(m \cdot s)]} = 1 \quad (2.10)$$

2.3.1 Modelo k - ϵ

O modelo k - ϵ padrão é utilizado para o fechamento das equações RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*). Ele introduz duas equações de transporte para a energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação (ϵ), conforme descrito por (Wilcox, 1998) e documentação do OpenFOAM (The OpenFOAM Foundation, 2025):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (2.12)$$

Onde as variáveis e termos das equações são definidos como:

- k : Energia cinética turbulenta (m^2/s^2);
- ϵ : Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (m^2/s^3);
- t : Tempo (s);
- U_j : Componente da velocidade média do escoamento na direção j (m/s);
- x_j : Coordenada espacial na direção j (m);
- P_k : Termo de produção de energia cinética turbulenta gerada pelos gradientes de velocidade média (cisalhamento);
- ν : Viscosidade cinemática molecular do fluido (m^2/s);
- ν_t : Viscosidade turbulenta (ou de Foucault) cinemática (m^2/s).

As constantes do modelo adotam os valores padrão calibrados empiricamente para escoamentos turbulentos gerais, conforme Wilcox (1998):

- $C_\mu = 0,09$: Constante de proporcionalidade da viscosidade turbulenta;

- $C_{\epsilon 1} = 1,44$: Constante de produção na equação da dissipação;
- $C_{\epsilon 2} = 1,92$: Constante de destruição na equação da dissipação;
- $\sigma_k = 1,0$: Número de Prandtl turbulento para a energia cinética k ;
- $\sigma_\epsilon = 1,3$: Número de Prandtl turbulento para a taxa de dissipação ϵ .

A viscosidade turbulenta (ν_t) é modelada como (Wilcox, 1998):

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.13)$$

2.4 Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)

O OpenFOAM emprega o Método dos Volumes Finitos (FVM) para discretizar as equações governantes.

2.4.1 A Equação Geral de Transporte

As equações de conservação podem ser generalizadas em uma única equação de transporte para uma variável escalar ϕ . A forma conservativa diferencial, conforme definida por Versteeg & Malalasekera (2007) e Ferziger & Perić (2002), segue a mesma estrutura vetorial apresentada na Equação 2.1, sendo composta pelo equilíbrio entre os termos de transiente, convecção, difusão e fonte (S_ϕ).

2.4.2 Método dos Volumes Finitos (FVM)

No FVM, a equação geral é integrada sobre um volume de controle V_P . A etapa fundamental é a aplicação do Teorema da Divergência de Gauss, que converte integrais de volume em integrais de superfície (Ferziger; Perić, 2002):

$$\int_{V_P} \nabla \cdot \mathbf{A} dV = \oint_{\partial V_P} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.14)$$

Aplicando este teorema à equação de transporte, obtém-se a forma discretizada em termos de fluxos através das faces f da célula (Ferziger; Perić, 2002):

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} V_P + \sum_f (\rho \mathbf{U}\phi)_f \cdot \mathbf{S}_f = \sum_f (\Gamma_\phi \nabla \phi)_f \cdot \mathbf{S}_f + S_\phi V_P \quad (2.15)$$

Esta formulação assegura a conservação global das propriedades transportadas.

2.5 Análise de Desempenho Aerodinâmico

As seguintes análises foram baseadas em (Vian *et al.*, 2021) para avaliar o desempenho com os dados provenientes das simulações computacionais.

Para calcular a potência disponível, é necessário determinar a área varrida pelas pás da turbina, que representa a região de captação da energia do vento. A área varrida, que depende apenas do raio (e não do número de pás), é dada por:

$$A = \pi \times r^2, \quad r = 0,218 \text{ m} \quad (2.16)$$

Em seguida, a potência disponível no fluxo de ar, isto é, a energia cinética que pode ser convertida, é calculada levando em consideração a densidade do ar ρ , a área A e a velocidade do vento v , elevada ao cubo, dada por

$$P_{disponivel} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (2.17)$$

Nota-se que a potência disponível varia com o cubo da velocidade, o que ressalta a alta sensibilidade do sistema a variações na velocidade do vento.

Para determinar a potência efetivamente extraída pela turbina, utilizou-se o torque médio medido na simulação. Os valores de `endTime`, `startTime` e ΔT (intervalo de tempo) são informados no arquivo `controlDict` da simulação. Primeiramente, calcula-se o número de amostras n conforme

$$n = \frac{\text{endTime} - \text{startTime}}{\Delta T} \quad (2.18)$$

Posteriormente, o torque médio (τ_{medio}) é obtido pela média aritmética dos valores de T_y registrados durante as n amostras:

$$\tau_{medio} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n T_y \quad (2.19)$$

Com o valor do torque médio τ_{medio} e da velocidade angular w determinados, a potência extraída é calculada pela multiplicação desses dois parâmetros:

$$P_{extraida} = \tau_{medio} \times \omega \quad (2.20)$$

Essa relação demonstra como o desempenho mecânico da turbina está diretamente relacionado à combinação do torque produzido e da velocidade de rotação.

Para avaliar a eficiência da conversão de energia, calcula-se o coeficiente de potência C_p , que é definido como a razão entre a potência extraída e a potência disponível:

$$C_p = \frac{P_{extraida}}{P_{disponivel}} \quad (2.21)$$

Este coeficiente indica a fração da energia do vento que é convertida em energia mecânica útil. Por fim, para oferecer uma referência comparativa, utiliza-se o limite teórico de eficiência estabelecido pelo Limite de Betz (Betz, 1920) (59,3%). Assim, a eficiência relativa ao Limite de Betz é expressa por

$$\text{Eficiência} = \left(\frac{C_p}{0,593} \right) \times 100 \quad (2.22)$$

3 METODOLOGIA: MODELAGEM COMPUTACIONAL E MONTAGEM DO EXPERIMENTO FÍSICO

Este capítulo detalha o desenvolvimento metodológico adotado para a análise comparativa de eficiência entre hélices eólicas de três e quatro pás. A abordagem proposta é híbrida, integrando uma etapa experimental de bancada — para a validação de parâmetros elétricos e rotacionais — e uma etapa de modelagem numérica via Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para a investigação aprofundada dos fenômenos aerodinâmicos. A estrutura a seguir descreve os materiais utilizados, os processos de manufatura, a configuração experimental e os parâmetros de simulação no software OpenFOAM.

3.1 Materiais e Recursos Computacionais

A infraestrutura necessária para a execução deste estudo foi dividida em dois eixos principais: a montagem física para a coleta de dados experimentais e o ambiente computacional de alto desempenho para as simulações numéricas.

No que tange aos recursos físicos, a etapa experimental demandou a integração de componentes de manufatura, geração de fluxo e instrumentação. Para a materialização das geometrias das hélices e do cubo central (*hub*), utilizou-se a tecnologia de manufatura aditiva (impressão 3D) com filamento de Ácido Polilático (PLA), como pode ser observado na Figura 1. A escolha deste polímero justifica-se pela sua estabilidade dimensional adequada para a prototipagem rápida de perfis aerodinâmicos e pelo baixo custo de produção. A estrutura de suporte da bancada foi confeccionada com tubos e conexões de PVC, oferecendo a modularidade necessária para ajustes de altura e posicionamento frente à fonte de vento.

Para simular as condições de escoamento, empregou-se um ventilador doméstico de três velocidades, posicionado de forma a gerar um fluxo de ar controlado sobre a turbina. A conversão da energia mecânica rotacional em energia elétrica foi realizada por um motor de corrente contínua (DC) de 12V, operando em modo gerador. O monitoramento do sistema incluiu a aferição da resistência elétrica do enrolamento do motor, através de um multímetro digital, informação para o posterior cálculo da potência elétrica gerada.

A instrumentação para aquisição de dados foi composta por um anemômetro digital, essencial para caracterizar a velocidade de referência do vento incidente no ponto de operação, e um multímetro digital para a aferição da tensão elétrica gerada nos terminais do motor. Adicionalmente, para a medição da velocidade angular, optou-se por um método não intrusivo baseado em visão computacional, evitando a introdução de atrito mecânico adicional que ocorreria com o uso de tacômetros de contato em um sistema de pequena escala. Para isso, utilizou-se um *smartphone* configurado para captura de vídeo em alta

resolução (UHD) com taxa de 60 quadros por segundo (FPS), rastreando marcadores adesivos de cor contrastante (rosa) fixados nas pontas das pás.

A Figura 1 apresenta os principais componentes utilizados na montagem da bancada experimental.



Figura 1 – Materiais e instrumentação utilizados no experimento de bancada.

Fonte: Acervo próprio.

No âmbito computacional, a complexidade dos cálculos de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), especialmente em regime transiente e turbulento, exigiu uma infraestrutura de *hardware* robusta. As simulações e o processamento de imagens foram realizados em uma estação de trabalho equipada com processador Intel® Core™ i7-14700 de 14ª geração. A disponibilidade de 18 núcleos de processamento neste equipamento foi determinante para viabilizar a execução das simulações numéricas em paralelo, reduzindo significativamente o tempo de convergência dos casos.

O fluxo de trabalho de *software* baseou-se inteiramente em ferramentas de código aberto, alinhando-se ao objetivo de acessibilidade do projeto. A modelagem geométrica paramétrica das pás foi executada no FreeCAD, utilizando a extensão *Air Plane Design* para garantir a fidelidade das coordenadas do perfil aerodinâmico. O solver numérico utilizado foi o OpenFOAM v9, executado sobre o subsistema WSL (*Windows Subsystem*

for Linux) com a distribuição Ubuntu 20.04 LTS. Por fim, a visualização dos campos de escoamento e o pós-processamento dos dados foram realizados no software ParaView 5.6 e através de *scripts* desenvolvidos em Python, utilizando as bibliotecas *OpenCV* e *NumPy* para a análise dos vídeos experimentais.

3.2 Métodos Experimentais

Esta seção detalha o fluxo de trabalho experimental, desde a concepção geométrica das hélices até o processamento dos dados coletados na bancada de testes.

3.2.1 Design e Manufatura das Hélices

A geometria da hélice e o ângulo de *pitch* são fundamentais para o desempenho aerodinâmico e a eficiência de uma turbina eólica, conforme apresentado na Figura 3. A hélice foi projetada utilizando o perfil E205 em escala 1:350. A escolha justifica-se pela análise dos dados aerodinâmicos catalogados por Airfoil Tools (2025), que evidenciam a adequação e o bom desempenho deste perfil para o número de Reynolds calculado.

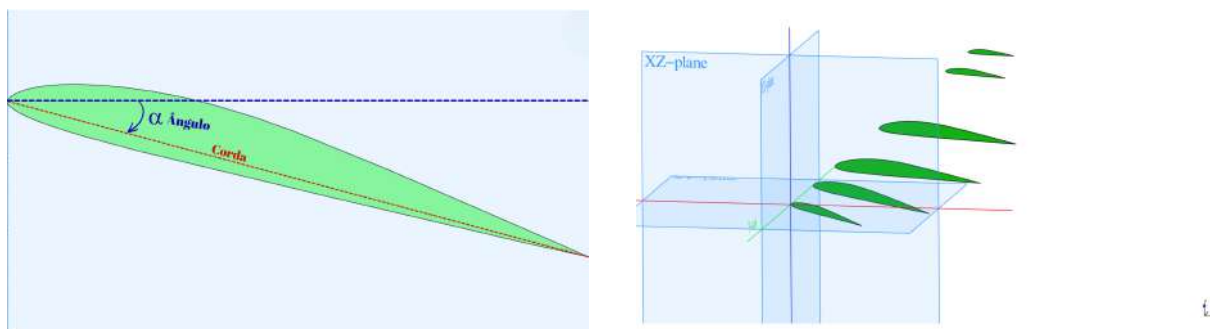
A modelagem geométrica foi realizada no software FreeCAD. Diferente de pás simples, as hélices eólicas modernas exigem uma variação complexa da geometria ao longo da envergadura para maximizar a eficiência. Para reproduzir essa característica, a pá foi construída através de múltiplos perfis distribuídos ao longo do eixo radial, variando-se a corda (*chord*) e o ângulo de torção (*twist*). A geometria sólida final foi obtida mediante a aplicação da ferramenta de *Loft* (interpolamento de seções), que gera uma superfície contínua e suave ao conectar sequencialmente todos os perfis transversais definidos.

A Tabela 1 detalha a configuração geométrica adotada. Observa-se que a rotação dos perfis diminui progressivamente da raiz (15°) para a ponta (3°). Essa torção geométrica é essencial para compensar o aumento da velocidade tangencial na ponta da pá, com o objetivo de minimizar o arrasto induzido. A Figura 2 mostra como é a configuração espacial das seções seguindo os dados da tabela, e também ilustra os conceitos de ângulo de rotação e corda.

Tabela 1 – Variação da corda e rotação dos perfis aerodinâmicos ao longo da pá.

Perfil	Posição Y (m)	Corda (m)	Rotação Y (rad)	Rotação Y ($^\circ$)
1	0,000	0,016	0,2618	15
2	0,025	0,026	0,2094	12
3	0,050	0,032	0,1396	8
4	0,100	0,030	0,0873	5
5	0,175	0,013	0,0873	5
6	0,200	0,010	0,0524	3

Fonte: Acervo próprio.

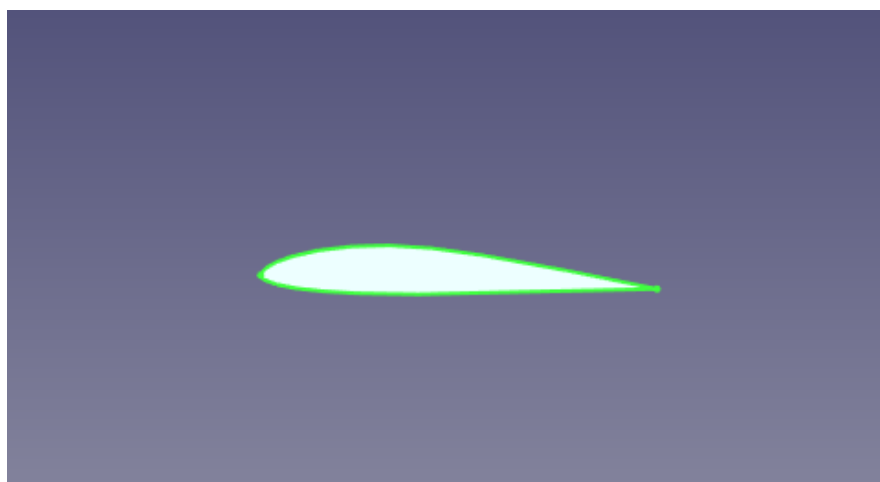


(a) **Parâmetros da seção:** Ilustração da corda e do ângulo de torção (α). (b) **Distribuição espacial:** Visualização 3D dos perfis ao longo da pá.

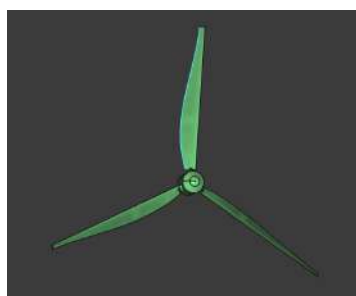
Figura 2 – Representação visual da geometria da pá. Em (a), detalham-se os parâmetros geométricos da seção (corda e torção). Em (b), apresenta-se as seções para formar a superfície através da técnica de *Loft*.

Fonte: Acervo próprio.

A Figura 3 mostra o processo de design, desde o esboço 2D do aerofólio até as geometrias finais de três e quatro pás. A ferramenta *Additive Loft* foi utilizada para interpolar os perfis e gerar o sólido suave da pá.



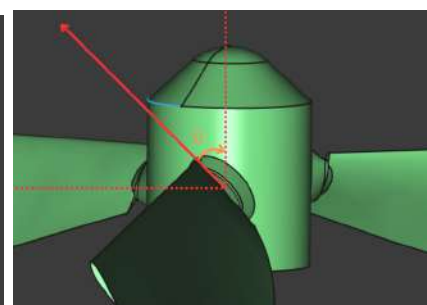
(a) Design de Aerofólio



(b) Hélice de 3 pás modelada no FreeCAD



(c) Hélice de 4 pás modelada no FreeCAD



(d) Representação gráfica do ângulo de *pitch*

Figura 3 – Modelagem geométrica no FreeCAD e ângulo de *pitch*. Fonte: Acervo próprio.

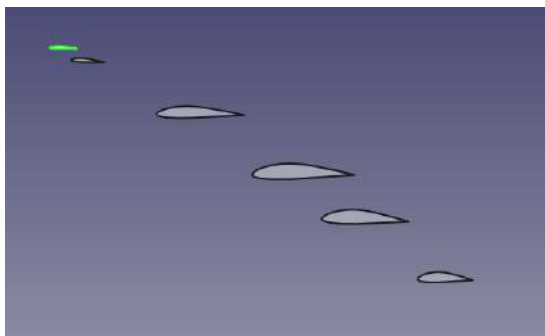
A variação do ângulo de rotação ao longo do eixo Y é essencial para garantir a torção

gradual da pá da hélice. Essa torção otimiza o desempenho aerodinâmico, permitindo que diferentes seções interajam de maneira mais eficiente com o fluxo de ar.(Hansen, 2015).

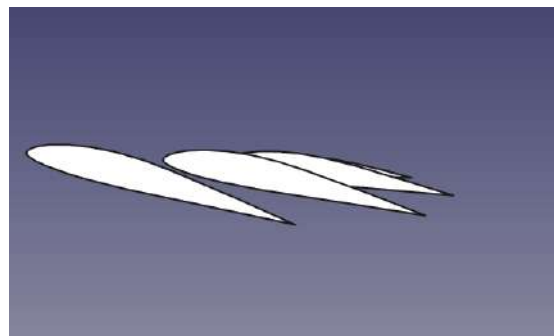
Próximo à base da hélice, a rotação é mais acentuada (15°), pois essa região está mais próxima ao eixo de rotação e precisa de um ângulo maior para captar melhor a força do vento. À medida que se aproxima da ponta, o ângulo diminui progressivamente, chegando a apenas 3° no último perfil. Essa redução minimiza a resistência do ar, pois a velocidade tangencial na ponta da pá é maior. Com essa velocidade elevada, um ângulo de ataque muito grande não é necessário, pois aumentaria a resistência do ar e poderia gerar turbulências indesejadas, reduzindo a eficiência aerodinâmica.

Além disso, observa-se que o mesmo ângulo de 5° foi repetido em duas seções consecutivas ($Y = 100 \text{ mm}$ e $Y = 175 \text{ mm}$). Essa escolha foi feita para suavizar a transição da curva gerada pelo *Loft*, evitando irregularidades na geometria.

A configuração da distribuição dos *airfoils* ao longo do eixo Y (Figura 4a), bem como a rotação aplicada para gerar a torção da pá (Figura 4b), é apresentada na Figura 4.



(a) Distribuição dos airfoils ao longo do eixo Y.



(b) Diferença de rotação entre os airfoils.

Figura 4 – Variação da posição e rotação dos airfoils na modelagem da hélice. Fonte: Acervo próprio.

Para transformar essa estrutura em um sólido, utiliza-se a ferramenta *Additive Loft*, que cria um sólido conectando múltiplas seções transversais (*sketches*). Para a conexão da pá com o *hub*, foi escolhida uma base elíptica, garantindo maior estabilidade no encaixe. Como a pá possui torções ao longo de sua estrutura, os focos da elipse foram usados como referência para centralizar o encaixe, mantendo o equilíbrio do centro de massa (*CM*).

A Figura 5a apresenta o modelo sólido da pá da hélice, enquanto a Figura 5b exibe o design da pá com o encaixe para fixação no *hub*.

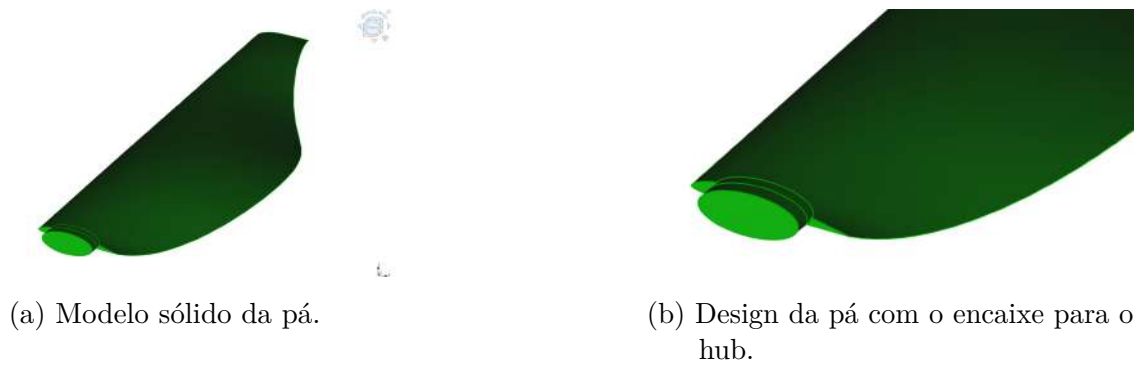


Figura 5 – Modelo final da pá da hélice e seu sistema de encaixe. Fonte: Acervo próprio.

Na base, o furo central foi projetado prevendo a tolerância de ajuste adequada para garantir a fixação solidária ao eixo do motor de 12V. Para criar as conexões (furos) no *hub* para fixar a hélice, adotou-se uma estratégia que inclui um prolongamento (suporte) para garantir uma fixação mais robusta (Figura 6c). Como foi escolhido um ângulo de *pitch* de 45° , essa estrutura está inclinada em 45° em relação ao eixo Z.

Para criar mais furos de maneira simétrica, utilizou-se a ferramenta *Polar Pattern*, que gera um padrão polar. Com essa ferramenta, foi possível repetir o suporte prolongado e o furo no cilindro, resultando na versão final do *hub* com todos os encaixes (Figura 6d). Neste trabalho, utilizou-se o eixo de referência Z, criando dois *hubs*: um com três ocorrências e outro com quatro. Para cada ponto de encaixe, foi adicionado um *chamfer* para redirecionar o fluxo de ar para a pá, reduzindo a turbulência e aumentando a estabilidade.

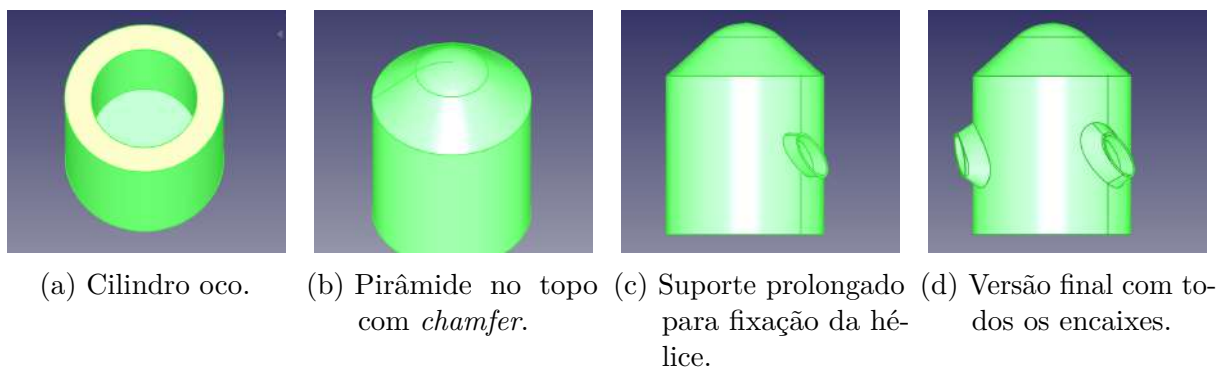
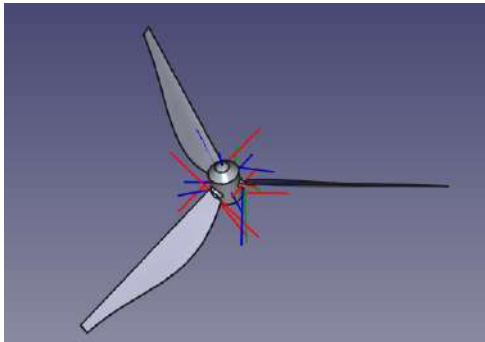


Figura 6 – Processo de modelagem do *hub*. Fonte: Acervo próprio.

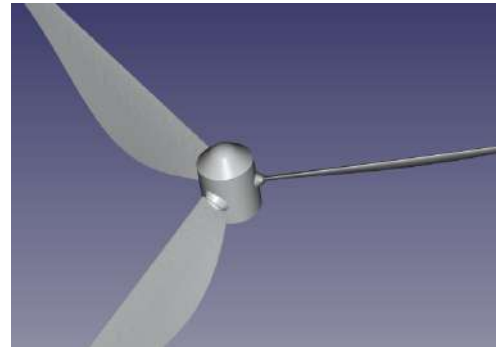
Após a criação do *hub* e da pá (*blade*), utilizou-se a ferramenta de montagem do FreeCAD (*Assembly*), que é usada para unir várias peças (*parts*), permitindo definir relações entre elas, como alinhamento e encaixe (Figura 7a).

Após a montagem completa da hélice, a geometria final foi exportada para o formato STL (do inglês, *STereoLithography*) formato muito utilizado para impressão 3D e

desenho assistido por computador (CAD), compatível com o OpenFOAM para simulação (Figura 7b).



(a) Montagem da hélice no FreeCAD.



(b) Geometria exportada para STL.

Figura 7 – Processo de montagem e exportação da hélice. Fonte: Acervo próprio.

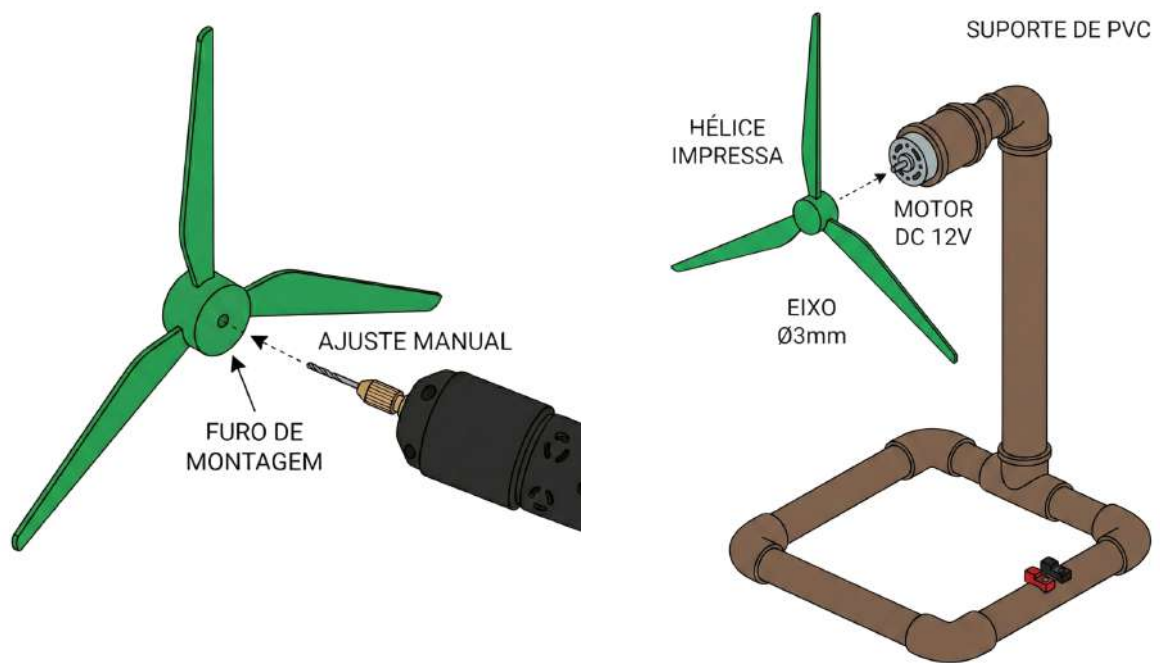
Para o *hub*, criou-se um cilindro no qual foi feito um furo para torná-lo oco (Figura 6a). Isso reduz o consumo de material e alivia o peso. No topo do cilindro, foi moldada uma pirâmide com a ponta arredondada (Figura 6b), utilizando o *chamfer* para otimizar o fluxo de ar.

3.2.2 Configuração e Execução do Experimento

A integração entre as hélices impressas em 3D e o motor exigiu um ajuste dimensional de precisão pós-manufatura. Embora a geometria da hélice contemplasse um orifício central projetado, a tolerância de impressão demandou um refinamento manual para garantir o alinhamento correto. Utilizando-se uma broca de artesanato, o alojamento do eixo foi cuidadosamente alargado e polido até atingir o diâmetro necessário para o acoplamento justo ao eixo do motor de 12V, que possui 3,0 mm de diâmetro. A Figura 8 exemplifica o procedimento.

A configuração experimental foi estabelecida conforme o esquema da Figura 9(a), posicionando-se a turbina a uma distância fixa de 1,0 metro da fonte de vento. A caracterização do fluxo incidente foi realizada previamente via anemômetro no ponto de acoplamento do rotor, resultando em uma velocidade média de referência de $6,0 \pm 0,3$ m/s (na terceira potência do ventilador), valor este adotado como parâmetro de entrada para as simulações computacionais.

O protocolo de ensaio foi delineado para capturar a resposta dinâmica completa do sistema. Para assegurar a integridade dos dados, a aquisição de vídeo (60 FPS) operou de forma contínua durante todo o ciclo. O procedimento iniciou-se com o sistema em repouso estático, seguido pelo acionamento da fonte de vento, induzindo a aceleração transiente. Após o sistema atingir o equilíbrio dinâmico — identificado pela estabilização da rotação



(a) Ajuste Manual com Broca de Artesanato.

(b) Encaixe da Hélice na estrutura.

Figura 8 – Como foi feito o ajuste para acoplamento das hélices no motor. Apesar de só ter ilustrado o procedimento para uma configuração de hélice, ele é o mesmo para o outro. Fonte: Acervo próprio.

(regime permanente) — procedeu-se à leitura da tensão elétrica nos terminais do gerador, utilizando um multímetro na escala de 20 V. Este ciclo foi replicado integralmente para as geometrias de três e quatro pás. Concluída a medição elétrica, a fonte de vento foi desligada, mantendo-se a gravação ativa até a dissipação total da energia cinética e o retorno da hélice ao repouso completo. Essa abordagem assegurou que o algoritmo de visão computacional processasse todo o envelope de operação, permitindo isolar com precisão a velocidade angular média do estágio estável.

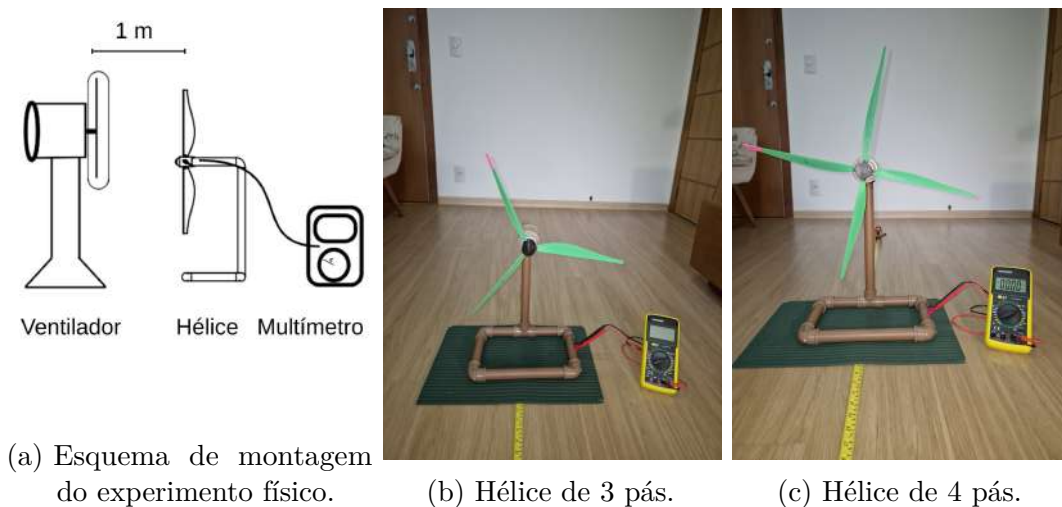


Figura 9 – Painel com a configuração experimental. A Figura (a) mostra o esquema de montagem do experimento. As Figuras (b) e (c) exibem as hélices montadas com um marcador na ponta de uma das pás para rastreamento por visão computacional. Fonte: Acervo próprio.

3.3 Visão computacional

Para a aquisição dos dados visuais do experimento, utilizou-se um *smartphone*, que foi fixado em uma posição constante e padronizada para todas as medições. O procedimento de gravação seguiu as diretrizes abaixo para assegurar a reprodutibilidade e a precisão dos resultados:

1. **Repetições:** Foram realizadas três repetições de gravação para cada experimento, com o intuito de minimizar incertezas e aumentar a confiabilidade dos dados.
2. **Qualidade de Vídeo:** As gravações foram configuradas em qualidade **UHD (Ultra High-Definition)** com uma taxa de **60 FPS (Frames per Second)**. A alta taxa de quadros foi fundamental para a análise subsequente por visão computacional, permitindo a captura detalhada e com desfoque reduzido, porém presente do movimento rotacional da hélice.

A velocidade angular da hélice foi medida por visão computacional, uma técnica usada para analisar o movimento rotacional de hélices, conforme descrito em Zhao *et al.* (2018). Para rastrear o movimento, um marcador rosa foi fixado na ponta de uma das pás, como mostrado na Figura 9. O movimento foi gravado com um *smartphone* em UHD a 60 FPS, garantindo uma boa precisão da análise. Um script em Python foi desenvolvido para processar os vídeos, utilizando as bibliotecas *OpenCV* e *NumPy*. Baseado em (Bradski; Kaehler, 2008), o script usa a Região de Interesse (*ROI* - do inglês: *Region of Interest*)

para focar o processamento. Ele isola o marcador rosa em cada quadro, utilizando a conversão para o espaço de cores HSV e calcula seu centroide.

3.3.1 Segmentação do Marcador e Espaço de Cores HSV

O rastreamento do marcador rosa necessita que o algoritmo distinga o objeto de interesse em relação ao cenário, operando de forma consistente sob as condições de iluminação do experimento. As imagens digitais capturadas nativamente no padrão RGB (*Red, Green, Blue*) apresentam desafios para essa tarefa devido à alta correlação entre os componentes cromáticos e a intensidade luminosa, conforme discutido por Gonzalez & Woods (2008). No modelo RGB, variações na luz ambiente tendem a alterar simultaneamente os valores das três coordenadas de cor, o que dificulta a determinação de limiares fixos para a segmentação de objetos coloridos (Bradski; Kaehler, 2008).

Para reduzir a sensibilidade do sistema a essas variações, emprega-se a conversão para o espaço de cores HSV (*Hue, Saturation, Value*). De maneira análoga a uma mudança de sistema de coordenadas em mecânica, onde se opta por um referencial que simplifique as equações do problema, o modelo HSV reorganiza a informação visual desacoplando a crominância (cor) da luminância (intensidade) (Solomon; Breckon, 2011). Neste sistema, a componente Matiz (H) representa a cor pura medida como uma coordenada angular, sendo o parâmetro principal para a identificação do marcador, uma vez que o ângulo correspondente ao pigmento tende a permanecer estável mesmo sob variações de sombra. As componentes de Saturação (S) e Valor (V) representam, respectivamente, a pureza da cor e a intensidade luminosa.

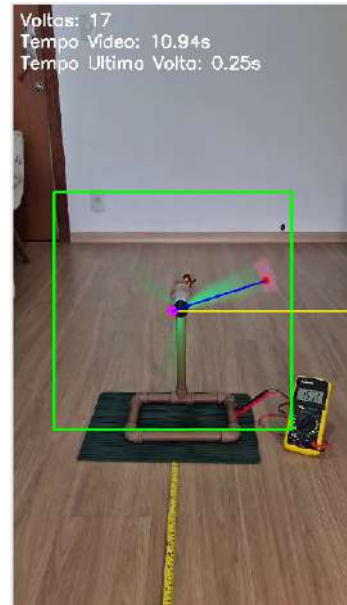
Ao adotar essa transformação, o algoritmo aplica uma filtragem seletiva no intervalo angular do Matiz correspondente à cor rosa, permitindo uma segmentação menos dependente das variações na componente de Valor. Este procedimento resulta em uma máscara binária onde a região de interesse é isolada do fundo. A partir desta segmentação, o centroide da área detectada é calculado para determinar as coordenadas (x, y) do marcador, seguindo a metodologia de momentos de imagem descrita por Bradski & Kaehler (2008).

O centro de rotação da hélice serve como referência para traçar uma linha, onde as voltas são contadas cada vez que o marcador passa por ela. A velocidade angular é então calculada a partir do período de cada rotação. Os dados coletados foram armazenados para a análise do desempenho das hélices. Para elucidar o funcionamento prático do sistema de medição desenvolvido, a Figura 10 ilustra as etapas visuais do processamento de imagem. O painel (a) demonstra a fase inicial de calibração, onde os limiares do espaço de cor HSV são ajustados para isolar o marcador adesivo. Já o painel (b) apresenta o algoritmo em operação, destacando a identificação da Região de Interesse (ROI), o ponto pivô central e

o vetor de rastreamento do marcador em relação à linha de referência horizontal.



(a) Etapa de calibração da cor.



(b) Algoritmo de rastreamento.

Figura 10 – Metodologia de aquisição de dados visuais. Em (a), a definição do marcador de cor para rastreamento. Em (b), a interface do software em execução.

Fonte: Acervo próprio.

4 METODOLOGIA: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

4.1 Análise do Caso *propeller* como Referência para Modelagem Eólica

O caso tutorial *propeller*, integrante da distribuição padrão do OpenFOAM v9, transcende a função de um simples exemplo didático; ele estabelece a arquitetura numérica fundamental para a simulação de turbomáquinas em regime transiente. A sua relevância para este trabalho reside na implementação de uma topologia de malha não-conforme e na aplicação de solvers de malha dinâmica, elementos indispensáveis para a captura correta da aerodinâmica de uma turbina eólica de eixo horizontal.

A seguir, detalham-se os aspectos construtivos e numéricos deste caso que fundamentam a metodologia adotada.

4.1.1 Topologia de Malha e Interface AMI

A estratégia de discretização adotada baseia-se na decomposição do domínio espacial em duas regiões distintas: (i) uma região externa estática (*stator*), que representa o campo distante; e (ii) uma região interna rotativa (*rotor*), que encapsula a geometria da hélice.

A comunicação entre estas regiões é mediada pela técnica de *Arbitrary Mesh Interface* (AMI). O OpenFOAM utiliza o método de *Galerkin Projection* (The OpenFOAM Foundation, 2021) para interpolar os fluxos de massa e quantidade de movimento entre as faces não-coincidentes da interface rotativa/estática. Isso garante a conservação das propriedades físicas sem a necessidade de remalhamento contínuo (*remeshing*), reduzindo o custo computacional.

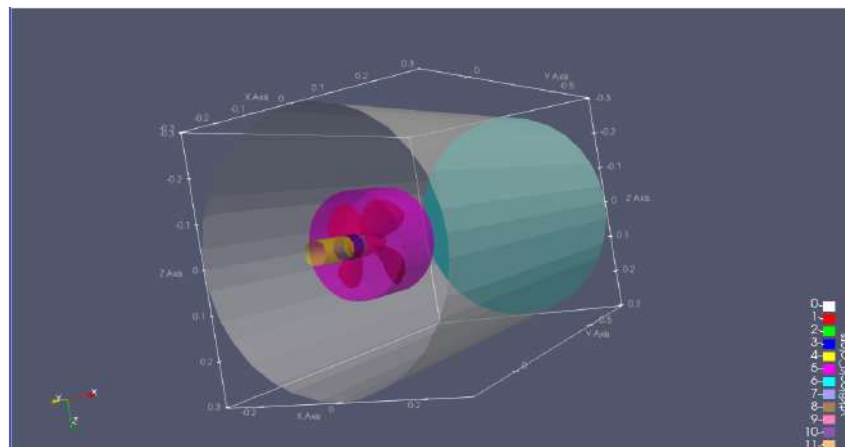


Figura 11 – Visualização da malha do caso *propeller*, destacando a região interna rotativa e a interface com o domínio estático. Fonte: Acervo próprio.

4.1.2 O Solver *pimpleDyMFoam*

A resolução das equações governantes é realizada pelo solver *pimpleDyMFoam*, adequado para escoamentos incompressíveis e transientes em malhas dinâmicas. O algoritmo empregado é o PIMPLE, uma estrutura híbrida PISO-SIMPLE que permite o uso de passos de tempo maiores (números de Courant > 1) mantendo a estabilidade numérica através de iterações corretoras internas. (The OpenFOAM Foundation, 2025)

4.1.3 Extração de Dados via Objeto *forces*

Para a análise quantitativa do desempenho, utiliza-se o *function object* denominado *forces*. Diferente de ferramentas que calculam coeficientes adimensionais automaticamente, esta função realiza a integração direta das distribuições de pressão (p) e tensão de cisalhamento viscoso (τ) sobre as superfícies das pás a cada passo de tempo.

O vetor de forças totais \mathbf{F} e o vetor de momentos \mathbf{M} são calculados em relação a um centro de rotação definido. No presente estudo, como a hélice foi configurada para rotacionar em torno do eixo Y, a variável de interesse primário é o componente Y do vetor momento (M_y). Este valor corresponde ao torque aerodinâmico (T) gerado pelo rotor.

A partir dos dados brutos de torque (T) extraídos pela função *forces*, os parâmetros de desempenho são calculados *a posteriori* pelas relações:

$$P_{\text{mec}} = T \cdot \omega \quad (4.1)$$

$$C_p = \frac{P_{\text{mec}}}{\frac{1}{2}\rho AV^3} \quad (4.2)$$

Onde ω é a velocidade angular em rad/s, ρ a densidade do ar, A a área varrida e V a velocidade do vento livre. Assim, é possível obter o Coeficiente de Potência (C_p). Esta abordagem permite um controle preciso sobre o pós-processamento dos dados brutos da simulação.

4.1.4 Síntese e Adaptação para o Cenário Eólico

A análise aprofundada do caso tutorial *propeller* permitiu validar o arcabouço numérico necessário para a simulação de máquinas rotativas no OpenFOAM. Deste estudo preliminar, consolidam-se na metodologia deste trabalho elementos estruturais cruciais, notadamente a estratégia de malha dividida em domínios estático e rotativo interconectados pela interface AMI, que se provou robusta para lidar com a rotação da geometria. Da mesma forma, preserva-se a utilização do solver *pimpleDyMFoam* com o algoritmo PIMPLE,

dada a sua capacidade de garantir estabilidade numérica em passos de tempo maiores, bem como a aplicação do objeto *forces* como abordagem padrão para o pós-processamento quantitativo das cargas aerodinâmicas.

Contudo, a transposição deste modelo para o contexto da geração eólica exige modificações substanciais nas condições de contorno e nas propriedades físicas do sistema. Diferentemente de um propulsor naval, que consome energia mecânica para acelerar um fluido denso como a água, a turbina eólica opera extraindo energia cinética do escoamento de ar. Portanto, as adaptações mandatárias para a etapa subsequente incluem a substituição da geometria do propulsor pela hélice baseada no perfil E205 projetada neste trabalho, além da alteração das propriedades termofísicas do fluido de trabalho para as características do ar atmosférico. Por fim, faz-se necessária a reconfiguração das condições de contorno de velocidade e pressão para representar um túnel de vento virtual, onde o fluxo incidente aciona a rotação, invertendo a lógica de transferência de energia observada no caso tutorial.

4.2 Configuração Numérica do Caso Eólico

Fundamentado nas premissas numéricas validadas pela análise do caso *propeller*, estrutura-se nesta etapa o modelo computacional definitivo voltado para a simulação da turbina eólica baseada no perfil E205. O objetivo central é transpor a geometria projetada para um ambiente numérico controlado (simulação computacional), replicando as condições físicas observadas nos ensaios experimentais.

A construção deste cenário no OpenFOAM segue um fluxo de trabalho sistemático, detalhado nas subseções a seguir. Este processo inicia-se pela definição topológica do volume de controle e pelas estratégias de discretização espacial (geração de malha), avançando para a imposição das condições de contorno e parâmetros de turbulência que regem a física do escoamento.

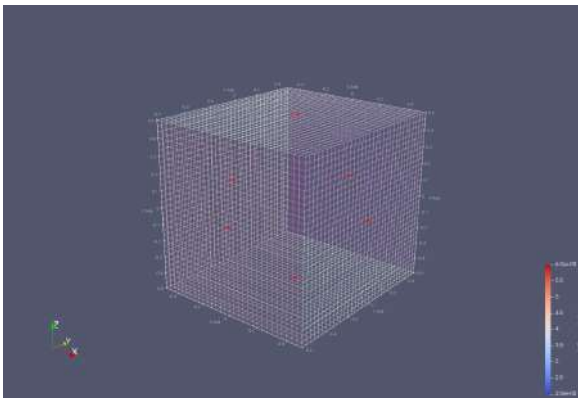
4.3 Domínio e Geração da Malha

O domínio de simulação foi modelado como um cilindro. Para isso, a geometria cilíndrica foi inicialmente criada no software de pré-processamento **Salome**, com dimensões alinhadas ao domínio cartesiano com o *bounding box* (do inglês - caixa limitadora) de $(1,0\text{ m} \times 1,1\text{ m} \times 1,0\text{ m})$. A malha foi então criada de forma híbrida: inicialmente, uma malha em formato de bloco foi gerada com o utilitário *blockMesh*. Em seguida, a outra ferramenta *snappyHexMesh* ajustou essa malha à geometria cilíndrica desejada como domínio e às superfícies das hélices, com o objetivo de preservar a representação gráfica original dos arquivos utilizados como base com a maior qualidade possível. O refinamento

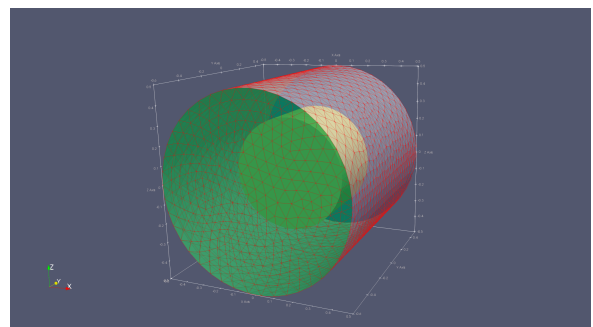
da malha foi concentrado ao redor da hélice e na esteira a jusante, otimizando a resolução nas áreas de maior interesse físico.

Para lidar com a rotação da hélice, o domínio foi dividido em duas regiões: uma interna, que gira com a hélice, e uma externa, que permanece estacionária. A comunicação entre essas regiões é feita por uma **Arbitrary Mesh Interface** (do inglês **Interface de Malha Arbitrária**) (AMI). O AMI é uma interface não-conforme que, através de interpolação, garante a conservação de massa e momento entre as malhas adjacentes, permitindo simular o efeito da rotação sem mover a malha fisicamente, o que reduz o custo computacional. (The OpenFOAM Foundation, 2025).

A Figura 12 mostra os resultados da execução dos dois utilitários mencionados, *blockMesh* e *snappyHexMesh*.



(a) Domínio no formato de um cubo após criação com o *blockMesh*.



(b) Geometria resultante após o *snappyHexMesh*.

Figura 12 – Domínio e geometria resultante. Após criação da malha inicial com o *blockMesh*, o utilitário *snappyHexMesh* recorta a malha da figura da esquerda utilizando arquivos *stl* que contem o cilindro maior, o cilindro que representa o AMI e a hélice em questão. O resultado é apresentado na figura da direita. A hélice está dentro do cilindro menor que representa o AMI.

Fonte: Acervo próprio.

4.4 Diagnóstico e Verificação da Qualidade da Malha

A discretização espacial em volumes finitos exige que os elementos da malha atendam a critérios geométricos mínimos para garantir a conservação das propriedades transportadas e a estabilidade dos algoritmos de inversão matricial. Conforme destacado por Ferziger & Perić (2002), distorções excessivas na malha podem degradar a ordem de precisão do esquema numérico e introduzir erros de difusão artificial.

Para validar a malha computacional deste estudo, utilizou-se a ferramenta de diagnóstico nativa *checkMesh*. A Tabela 2 apresenta um comparativo das métricas obtidas para as configurações de 3 e 4 pás, extraídas diretamente dos logs de verificação.

Tabela 2 – Métricas de qualidade topológica e geométrica das malhas.

Parâmetro de Controle	Hélice 3 Pás	Hélice 4 Pás
Contagem de Elementos		
Total de Células	112.736	132.066
Predominância Hexaédrica	87,7%	87,5%
Predominância Poliédrica	11,5%	10,9%
Ortogonalidade (°)		
Não-Ortogonalidade Média	10,92	10,44
Não-Ortogonalidade Máxima	69,96	69,92
Distorção Geométrica		
<i>Max Skewness</i>	9,35	14,69
Faces com alto enviesamento	6	15

Fonte: Acervo próprio.

4.4.1 Análise de Não-Ortogonalidade

A não-ortogonalidade, definida pelo ângulo entre o vetor que conecta os centróides de células adjacentes e o vetor normal à face compartilhada, é crítica para a aproximação dos termos difusivos (Versteeg; Malalasekera, 2007). Os resultados indicam uma média global baixa ($\approx 10^\circ$), o que denota uma malha bem estruturada na maior parte do domínio. O valor máximo próximo de 70° ocorre apenas na camada de transição da malha *snappyHexMesh*. De acordo com as diretrizes da documentação oficial do OpenFOAM (The OpenFOAM Foundation, 2025), malhas com não-ortogonalidade nesta faixa ($70\text{--}80^\circ$) são plenamente gerenciáveis através da ativação de corretores não-ortogonais (*non-orthogonal correctors*) no ciclo PIMPLE. Neste trabalho, configurou-se o solver para realizar 3 passagens corretivas por passo de tempo, garantindo a conservação dos fluxos.

4.4.2 Enviesamento (*Skewness*) e Robustez Numérica

O parâmetro de enviesamento (*skewness*) mede o desvio entre o ponto de interseção da linha que une os centros das células e o centro real da face. O relatório apontou faces altamente enviesadas nas pontas das pás, excedendo os limites conservadores do verificador padrão.

No entanto, é importante ressaltar que a presença de elementos com alto *skewness* é comum em malhas geradas automaticamente para geometrias complexas com arestas afiladas. A própria documentação e os casos tutoriais fornecidos pela fundação OpenFOAM, como o caso de referência *propeller*, operam frequentemente com malhas que apresentam falhas nestas verificações estritas, sem que isso comprometa a validade física dos resultados globais de torque e empuxo (The OpenFOAM Foundation, 2025). A robustez do solver *pimpleDyMFoam*, aliada ao uso de limitadores de gradiente (*cellLimited*) definidos no

utilitário *fvSchemes* (esquemas de solução), assegura a estabilidade da solução mesmo na presença destas imperfeições locais.

4.4.3 Topologia e Regiões Desconectadas

O diagnóstico de “regiões desconectadas” (*disconnected regions*) não constitui um erro de malha neste contexto, mas sim uma consequência da topologia AMI (*Arbitrary Mesh Interface*). Como detalhado por The OpenFOAM Foundation (2021), a simulação é composta por dois domínios físicos distintos (o cilindro rotativo e o túnel estático) que não compartilham nós coincidentes. A continuidade do escoamento é garantida numericamente pela projeção de Galerkin na interface AMI, e não pela conectividade topológica tradicional (The OpenFOAM Foundation, 2025).

4.5 Cálculo da Densidade do Ar e Parâmetros de Turbulência

As propriedades termofísicas do fluido foram definidas com base nas condições ambientais médias de Juiz de Fora - MG na data do experimento (03 de julho de 2025). Considerando a altitude local de 678 m (IBGE, 2020), temperatura de 20°C (293,15 K) e umidade relativa de 65%, a densidade do ar foi calculada através da equação de estado apresentada no Apêndice B, resultando em $\rho \approx 1,104 \text{ kg/m}^3$.

Nas condições operacionais do experimento, o número de Reynolds global foi calculado em aproximadamente $1,56 \times 10^5$, situando o escoamento em regime de transição. Para a aplicação da metodologia proposta, adotou-se o perfil Eppler 205 (E205) como geometria de referência. A seleção deste aerofólio, frequentemente documentado na literatura de aeromodelismo e baixas velocidades (Selig; Donovan; Fraser, 1989), não visou a otimização aerodinâmica para a turbina específica, mas sim fornecer uma geometria conhecida e documentada para implementar o fluxo de trabalho híbrido (numérico-experimental). O desempenho obtido com este perfil serve, portanto, como linha de base para aferir a sensibilidade das ferramentas de simulação e medição desenvolvidas neste estudo, deixando a otimização da forma da pá para estudos futuros.

Para a inicialização dos campos de turbulência, adotaram-se as correlações padrão para estimativa de condições de contorno em escoamentos externos. A energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação (ϵ) foram calculadas conforme as formulações teóricas do modelo $k - \epsilon$ apresentadas na Fundamentação Teórica (Capítulo 2) e detalhadas na memória de cálculo do Apêndice B, resultando em:

$$k \approx 0,070 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad \text{e} \quad \epsilon \approx 0,099 \text{ m}^2/\text{s}^3 \quad (4.3)$$

Os valores das constantes empíricas do modelo (C_μ , $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$, σ_k , σ_ϵ) utilizados na simulação correspondem aos valores padrão descritos na fundamentação teórica, assegurando a consistência com a literatura consolidada para escoamentos turbulentos plenamente desenvolvidos.

4.6 Estratégia de Solução Numérica

A configuração do solucionador no OpenFOAM envolveu a definição da abordagem de movimentação de malha, a escolha dos esquemas de discretização e o ajuste dos algoritmos de solução de sistemas lineares. As escolhas descritas a seguir priorizaram a estabilidade numérica necessária para lidar com a natureza transiente do escoamento em torno de geometrias complexas. Para a representação da rotação, adotou-se a técnica de *Solid Body Motion* (Movimento de Corpo Rígido), na qual a cinemática do rotor é prescrita *a priori*, desacoplando a resolução das equações de fluido do cálculo da dinâmica de corpos rígidos. Ressalta-se que, preliminarmente, investigou-se a aplicação do solver 6DoF (*Six Degrees of Freedom*) para permitir que a rotação fosse uma resposta dinâmica às forças aerodinâmicas em uma interação fluido-estrutura. Entretanto, a implementação desta metodologia em malhas tridimensionais complexas impôs desafios severos de estabilidade e custo computacional que inviabilizaram sua convergência dentro do escopo deste trabalho. A opção pelo movimento prescrito, portanto, permitiu isolar o fenômeno aerodinâmico, garantindo a obtenção de resultados consistentes para o torque e potência em regime permanente.

No que tange à discretização dos termos das equações governantes, configurada no dicionário *fvSchemes*, buscou-se um equilíbrio entre precisão e difusividade numérica, conforme as recomendações de Ferziger & Perić (2002). A discretização temporal empregou o esquema *Euler* (implícito de primeira ordem) que, embora introduza maior difusão temporal que esquemas de segunda ordem, foi determinante para manter a estabilidade durante a fase de aceleração da turbina. Para os termos convectivos do momento linear, utilizou-se o esquema *Gauss linearUpwind* de segunda ordem, oferecendo maior acurácia na captura de estruturas de fluxo, enquanto para as variáveis de turbulência (k e ϵ) optou-se pelo esquema *Gauss upwind* de primeira ordem, visando garantir a limitação (*boundedness*) e evitar valores físicos negativos. Adicionalmente, o esquema *Gauss linear* foi aplicado aos gradientes com limitadores de inclinação (*slope limiters*) na velocidade para evitar oscilações espúrias, e os termos laplacianos incluíram correções de não-ortogonalidade necessárias para lidar com a distorção das células na superfície curvada e torcida das pás.

O acoplamento pressão-velocidade foi resolvido pelo algoritmo PIMPLE, uma estrutura híbrida PISO-SIMPLE configurada com 4 corretores externos e 3 corretores de

ortogonalidade internos, permitindo a utilização de passos de tempo maiores ($Courant > 1$) sem perda de estabilidade (The OpenFOAM Foundation, 2025). Os métodos iterativos utilizados para a solução dos sistemas algébricos incluem o *Preconditioned Conjugate Gradient* (PCG – Gradiente Conjugado Pré-condicionado), frequentemente aplicado para resolver matrizes simétricas, como na equação de correção de pressão. Alternativamente, utiliza-se o *Geometric Algebraic Multi-Grid* (GAMG – Multigrid Algébrico Geométrico), uma técnica que acelera a convergência ao resolver o problema em diferentes níveis de resolução de malha ("grid levels"), sendo particularmente eficiente para reduzir erros de baixa frequência em domínios grandes. Acoplado ao solver de pressão, utilizou-se o pré-condicionador *DIC* (*Diagonal Incomplete Cholesky* ou Diagonal Incompleta de Cholesky). Este pré-condicionador é particularmente adequado para matrizes simétricas, como a matriz de pressão resultante da discretização da equação de Poisson no algoritmo PIMPLE. A combinação PBiCGStab com DIC oferece um equilíbrio robusto entre a redução do número de iterações necessárias para atingir a tolerância residual e o custo computacional por iteração, garantindo a estabilidade da solução do campo de pressão a cada passo de tempo. As equações de transporte para velocidade (\mathbf{U}) e variáveis de turbulência (k, ϵ) foram resolvidas com o *smoothSolver*, utilizando o suavizador *symGaussSeidel*, que oferece um bom equilíbrio entre velocidade de convergência e estabilidade para sistemas acoplados. O algoritmo *PIMPLE* foi configurado com 4 corretores externos e 3 corretores internos para garantir a conservação de massa a cada passo de tempo. Por fim, fatores de relaxamento (*under-relaxation factors*) de 0,3 foram aplicados a todas as variáveis, amortecendo oscilações de alta frequência e contribuindo para a estabilidade do processo iterativo transiente. Fatores de relaxamento de 0,3 foram aplicados às equações durante as iterações internas para amortecer oscilações de alta frequência. O critério de convergência não se baseou apenas nos resíduos numéricos, mas na estabilização macroscópica das forças monitoradas. A simulação cobriu o período de aceleração — rampa de 7,0s para a hélice de 3 pás e 5,84s para a de 4 pás — estendendo-se até que o torque aerodinâmico apresentasse um comportamento periódico estável, indicando o alcance do regime quase-estacionário (Ferziger; Perić, 2002).

4.7 Definição das Condições de Contorno e Tratamento da Camada Limite

A correta definição das condições de contorno é essencial para garantir a unicidade da solução das equações de Navier-Stokes. No OpenFOAM, as fronteiras do domínio foram classificadas em dois tipos primitivos fundamentais: *patch* e *wall*, conforme a natureza física da interação fluido-fronteira. A Tabela 3 resume a aplicação destas condições às partes nomeadas da malha.

Tabela 3 – Classificação das condições de contorno e tipos primitivos aplicados.

Região da Malha	Tipo Primitivo	Descrição Física
<i>inlet</i>	<i>patch</i>	Entrada de fluxo (Velocidade prescrita).
<i>outlet</i>	<i>patch</i>	Saída de fluxo (Pressão prescrita).
<i>walls</i>	<i>wall</i>	Paredes do túnel (Confinamento).
<i>helice</i>	<i>wall</i>	Superfície da pá (Interação viscosa).

Fonte: Acervo próprio.

Para as fronteiras abertas do domínio virtual (*inlet* e *outlet*), utilizou-se o tipo ***patch***. Segundo Ferziger & Perić (2002), esta condição é apropriada para superfícies de entrada e saída onde não há obstrução física ao escoamento, permitindo o transporte de massa e quantidade de movimento para dentro ou fora do volume de controle. No *inlet*, impôs-se uma condição de Dirichlet para a velocidade ($\mathbf{U} = 6,0 \text{ m/s}$) e Neumann para a pressão, enquanto no *outlet* aplicou-se a condição oposta (pressão relativa nula), garantindo a estabilidade numérica do fluxo unidirecional.

Para as fronteiras sólidas, tanto as paredes do túnel virtual (*walls*) quanto a superfície da turbina (*helice*) foram definidas como ***wall***. Esta condição impõe a restrição física de impermeabilidade (fluxo de massa normal nulo) e a condição de não-deslizamento (*no-slip*), onde a velocidade relativa do fluido na parede é zero (Munson *et al.*, 2013). No caso específico da *helice*, que está inserida em um domínio rotativo (AMI), a condição de parede é fundamental para a geração dos gradientes de velocidade que resultam nas forças aerodinâmicas de sustentação e arrasto e, conseqüentemente, no torque motriz.

5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os dados obtidos através da metodologia híbrida adotada, confrontando as medições experimentais de bancada com as previsões numéricas geradas pelo modelo computacional. A análise inicia-se pela caracterização do desempenho elétrico e rotacional do sistema físico, estabelecendo os parâmetros de referência para a validação das simulações. Em seguida, detalham-se os resultados aerodinâmicos do modelo CFD, com foco na evolução temporal do torque e na visualização dos campos de escoamento.

5.1 Parâmetros de Convergência da Simulação

As simulações numéricas foram executadas em uma estação de trabalho de alto desempenho com 18 núcleos de processamento. Para cada geometria de hélice (três e quatro pás), o tempo total de simulação foi definido em 12 segundos, demandando aproximadamente 36 horas de tempo de computação (CPU time) por caso.

A estabilidade numérica durante a fase transiente inicial foi assegurada pela implementação da função de rampa linear na velocidade angular, conforme descrito na metodologia. Os parâmetros temporais desta função foram extraídos diretamente dos ensaios experimentais:

- **Hélice de 3 pás:** Tempo de aceleração (t_{accel}) de 7,00 segundos.
- **Hélice de 4 pás:** Tempo de aceleração (t_{accel}) de 5,84 segundos.

Essa abordagem permitiu uma transição suave do repouso até a rotação de projeto, mitigando picos de pressão artificiais. O critério de convergência para o algoritmo PIMPLE em regime transiente foi atendido quando os resíduos das equações de transporte e o monitoramento do torque aerodinâmico apresentaram um comportamento periódico estável (regime quase-permanente), indicando o desenvolvimento completo da esteira e das forças fluidodinâmicas, em concordância com as diretrizes de Ferziger e Perić (Ferziger; Perić, 2002). As análises de desempenho subsequentes concentraram-se exclusivamente neste intervalo de estado estacionário.

5.2 Resultados Experimentais

A caracterização do sistema físico foi realizada sob uma velocidade de vento constante de $v_{ref} = 6,0$ m/s. A Tabela 4 sintetiza os valores médios de tensão elétrica e velocidade angular obtidos após a estabilização do rotor. Os dados de rotação representam

a média aritmética de três repetições do ensaio, processados via visão computacional conforme ilustrado na Figura 13.

Para a determinação da potência elétrica gerada (P_{el}), utilizou-se a resistência interna do enrolamento do motor, aferida experimentalmente em $R = 7,6 \Omega$. O cálculo baseou-se na Lei de Joule, expressa em função da tensão de saída (V):

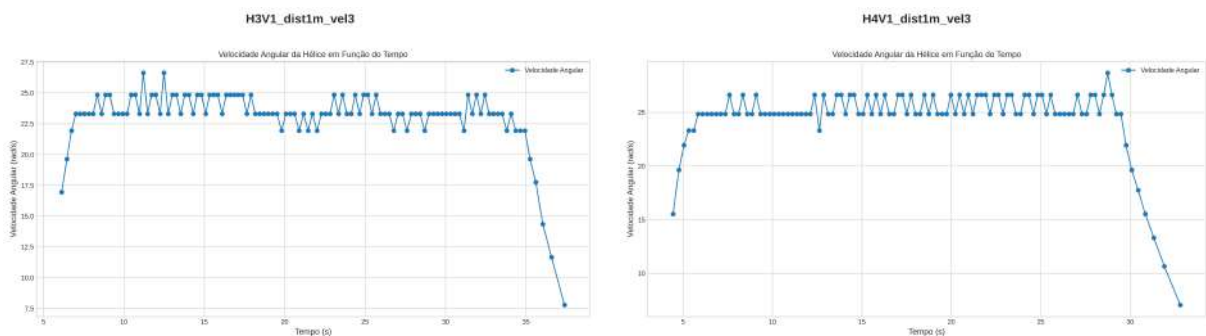
$$P_{el} = \frac{V^2}{R} \quad (5.1)$$

Estes dados experimentais constituem a base de comparação para avaliar a capacidade do modelo numérico em prever a eficiência mecânica das turbinas.

Tabela 4 – Cálculo da Potência Elétrica Gerada no Experimento

Hélice	Tensão (V)	Rotação (rad/s)	Resistência (Ω)	Potência (W)
Hélice 3	0,145	23,64	7,6	0,00276
Hélice 4	0,165	25,52	7,6	0,00358

Fonte: Acervo próprio.



(a) Hélice de 3 pás: Velocidade Angular x Tempo (b) Hélice de 4 pás: Velocidade Angular x Tempo

Figura 13 – Gráficos de velocidade angular em função do tempo, obtidos por visão computacional, para as hélices de 3 e 4 pás. Fonte: Acervo próprio.

5.3 Resultados de Desempenho Aerodinâmico da Simulação Computacional

A Tabela 5 apresenta uma comparação detalhada dos resultados de desempenho aerodinâmico obtidos nas simulações de movimento de corpo rígido para as hélices de 3 e 4 pás. A velocidade angular de cada hélice foi imposta com base nos valores médios mensurados no experimento. O torque aerodinâmico, a potência extraída e os coeficientes de eficiência foram os principais parâmetros de interesse obtidos a partir da simulação.

A análise comparativa demonstra que a hélice de 4 pás apresentou um desempenho superior. Embora o aumento do torque médio em relação à hélice de 3 pás tenha sido

pequeno (de 0,016933 Nm para 0,017085 Nm), o fator determinante para o aumento da potência extraída foi a maior velocidade angular imposta (25,52 rad/s contra 23,64 rad/s), obtendo, assim, 0,4017 W e 0,4394 W.

Este resultado se traduz em um coeficiente de eficiência (C_p), calculado como a razão da potência extraída pela potência disponível, como demonstrado por Vian et al. (Vian *et al.*, 2021), e uma eficiência relativa ao Limite de Betz (limite teórico possível de extração de energia eólica) superiores para a hélice de 4 pás, indicando que ela foi mais eficaz na conversão da energia do vento nas condições simuladas. A hélice de 3 pás atingiu uma eficiência de 3,80% do limite de Betz, enquanto a hélice de 4 pás alcançou 4,16%, confirmando o melhor desempenho global da configuração com maior número de pás.

Tabela 5 – Comparativo de desempenho aerodinâmico entre as hélices de 3 e 4 pás.

Métrica de Desempenho	Hélice de 3 Pás	Hélice de 4 Pás
Velocidade Angular (rad/s)	23,64	25,52
Torque Médio (N·m)	0,016933	0,017085
Potência Extraída (W)	0,4017	0,4394
Coefficiente de Eficiência (C_p)	0,0226	0,0247
Eficiência Relativa a Betz (%)	3,80	4,16

Fonte: Acervo próprio.

5.3.1 Análise Visual dos Resultados da Simulação

A análise visual dos resultados de simulação, obtidos por meio do *ParaView*, oferece uma visão detalhada do escoamento em um túnel de vento virtual, conforme ilustrado na Figura 14. As visualizações abaixo demonstram o comportamento do escoamento ao redor das hélices de 3 e 4 pás.

Campo de Velocidade As visualizações de velocidade (Figuras 14a e 14d) mostram que o escoamento é acelerado ao passar pelas pás, criando uma esteira de alta velocidade (4 a 7 m/s) a jusante, indicada por cores quentes (amarelo a vermelho). A formação de vórtices nas pontas das pás, um fenômeno conhecido de perda de energia, é claramente visível, confirmando o desprendimento do fluxo.

Campo de Pressão Nas visualizações de pressão (Figuras 14b e 14e), a diferença de pressão manométrica é evidente entre as superfícies das pás. A face que interage com o fluxo de entrada (lado de pressão) apresenta alta pressão (0 a 29 Pa), representada por tons de vermelho e amarelo. A face oposta (lado de sucção) exibe baixa pressão (-42 a 0 Pa), com tons de azul e verde. Essa diferença de pressão gera a força de sustentação, responsável pelo torque propulsor da hélice.

Linhas de Fluxo (*Streamlines*) As linhas de fluxo (Figuras 14c e 14f) mostram o

caminho das partículas de fluido. Na vista lateral da hélice de 3 pás, observa-se a esteira de alta velocidade atrás da hélice. As cores representam a magnitude da velocidade, variando do azul (0 a 2 m/s) ao vermelho (6 m/s). O detalhe na Figura 14f ilustra a formação e o desprendimento da camada limite na ponta da pá, validando a capacidade da malha de capturar com precisão esse fenômeno.

A análise visual dos resultados corrobora o sucesso da simulação em replicar o comportamento aerodinâmico esperado de uma hélice, permitindo uma compreensão qualitativa das interações físicas que geram o torque e a potência extraída.

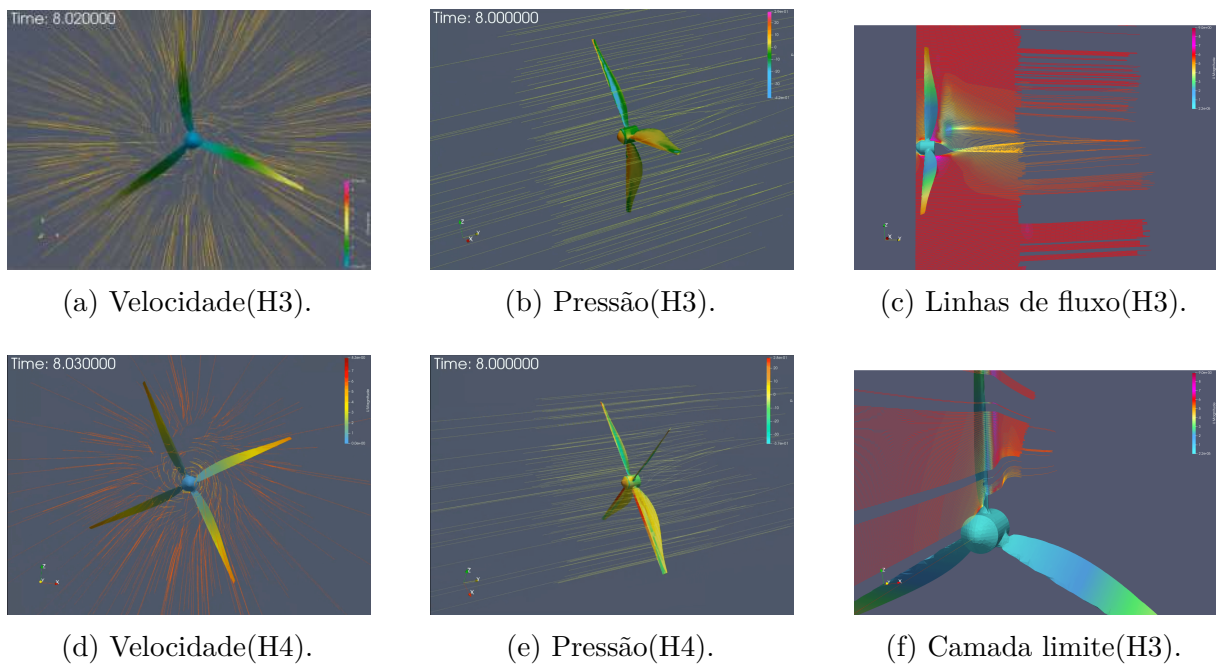


Figura 14 – Visualizações do campo de escoamento ao redor das hélices de 3 e 4 pás em regime permanente. Escolha da Hélice 3 para representar a camada limite e as linhas de fluxo foi arbitrária. Fonte: Acervo próprio.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO

A análise dos dados obtidos nas etapas experimental e computacional permite uma compreensão aprofundada das dinâmicas envolvidas na operação de microturbinas eólicas. Este capítulo dedica-se a interpretar as correlações entre o modelo físico e o numérico, justificando as discrepâncias observadas e avaliando o impacto da geometria no desempenho aerodinâmico.

6.1 Análise da Discrepância Energética: Mecânica vs. Elétrica

Uma observação imediata ao confrontar os resultados experimentais (Tabela 4) com os simulados (Tabela 5) é a diferença de ordem de grandeza entre a potência elétrica gerada ($\approx 3 \times 10^{-3}$ W) e a potência mecânica extraída na simulação ($\approx 0,4$ W). Esta disparidade não indica erro no modelo, mas sim a distinção física entre o que foi medido em cada etapa.

A simulação CFD, via objeto *forces*, calcula a **Potência Aerodinâmica Bruta** transferida do fluido para o rotor ($P_{mec} = \tau \cdot \omega$). Já o experimento mede a **Potência Elétrica Útil** (P_{el}) entregue à carga. A relação entre elas é governada pela eficiência total do sistema de conversão (η_{total}):

$$P_{el} = P_{mec} \cdot \eta_{mec} \cdot \eta_{gerador} \cdot \eta_{circuito} \quad (6.1)$$

No experimento de bancada em escala reduzida, as perdas são significativas:

- **Perdas Mecânicas** (η_{mec}): O atrito nos rolamentos do motor e a resistência aerodinâmica do próprio cubo (*hub*) consomem parte do torque antes que ele seja convertido em eletricidade.
- **Eficiência do Gerador** ($\eta_{gerador}$): Motores DC pequenos operando como geradores em baixas rotações e correntes possuem eficiência extremamente baixa. Grande parte da energia é dissipada como calor na resistência interna dos enrolamentos ($7,6 \Omega$) e nas perdas magnéticas.

Portanto, a simulação computacional fornece o limite teórico de desempenho da geometria da hélice (o potencial aerodinâmico), enquanto o experimento reflete a realidade operacional do protótipo, severamente penalizada pelas ineficiências da conversão eletromecânica em pequena escala.

6.2 Influência da Solidez e Número de Pás

A comparação direta entre as configurações demonstrou que a hélice de 4 pás obteve desempenho superior à de 3 pás, tanto na velocidade angular atingida (25,52 rad/s contra 23,64 rad/s) quanto no coeficiente de potência (C_p).

Este resultado pode ser explicado pelo aumento da **solidez** do rotor (σ). A solidez é a razão entre a área projetada das pás e a área varrida pelo rotor. Em escalas reduzidas e baixos números de Reynolds ($Re \approx 1,6 \times 10^5$), onde a viscosidade do ar tem papel preponderante sobre a inércia, uma maior solidez ajuda a capturar mais momento do fluxo de ar (Burton *et al.*, 2001).

Além disso, o maior torque de partida proporcionado pelas quatro pás permitiu que o rotor vencesse o torque de "*cogging*" (resistência magnética inicial) do motor DC mais rapidamente, atingindo um regime permanente de rotação mais elevado. Isso contradiz parcialmente a teoria de grandes turbinas, onde menos pás geralmente resultam em maiores rotações (*Tip Speed Ratio* mais alto), evidenciando que, em microturbinas, a capacidade de torque inicial é um fator limitante prioritário.

6.3 Limitações do Estudo e Recomendações

A realização deste trabalho permitiu identificar restrições inerentes à modelagem adotada. A principal simplificação numérica residiu na definição das condições de contorno laterais como superfícies impermeáveis com condição de não-deslizamento (*no-slip walls*). Essa configuração impôs um confinamento artificial ao escoamento, impedindo a expansão radial das linhas de corrente que ocorreria em um ambiente aberto. Consequentemente, a conservação da massa no volume restrito induziu uma aceleração local do fluxo ao redor do plano do rotor, fenômeno conhecido como Efeito de Bloqueio (*Blockage Effect*), que tende a superestimar as forças aerodinâmicas calculadas (Ferziger; Perić, 2002).

No âmbito experimental, a configuração física da bancada introduziu variáveis geométricas não modeladas. A altura limitada da base de suporte da hélice em relação à superfície de apoio (solo/mesa) gera uma assimetria no campo de escoamento. A proximidade de uma superfície sólida na parte inferior do disco do rotor restringe o desenvolvimento da esteira e pode induzir turbulência adicional, criando uma distorção no perfil de velocidade que o modelo computacional — baseado em um fluxo incidente uniforme e simétrico — não contempla.

Além disso, a consideração da hélice como um corpo rígido indeformável na simulação ignorou a flexibilidade do material polimérico (PLA). Em operação, as pás sofrem deflexão devido às cargas aerodinâmicas, o que altera o ângulo de ataque efetivo e,

consequentemente, o desempenho real em comparação ao previsto pelo modelo rígido.

6.4 Estabilidade e Convergência Numérica

A robustez da solução numérica obtida no cenário de implementado deve-se fundamentalmente à estratégia de acoplamento entre o movimento da malha e o escoamento do fluido. Diferente de abordagens que impõem condições de contorno bruscas, a estabilidade deste caso foi assegurada pela implementação da função de rampa linear na velocidade angular (ω), conforme descrito na metodologia.

A prescrição de uma aceleração gradual ($0 \rightarrow \omega_{est}$) permitiu que o campo de pressão se adaptasse progressivamente às forças centrífugas e de Coriolis geradas pela rotação. Isso evitou o fenômeno de "partida impulsiva", que frequentemente gera ondas de pressão espúrias e divergência dos resíduos nas primeiras iterações de simulações transientes. O algoritmo PIMPLE demonstrou eficácia em manter o Número de Courant sob controle durante essa fase de aceleração, garantindo o acoplamento pressão-velocidade mesmo com as grandes deformações de fluxo na interface AMI.

A confirmação da estabilidade numérica é evidenciada pelo comportamento do torque aerodinâmico (Figuras 19 e 20). Após o período transitório inicial de aceleração ($t < t_{accl}$), observa-se que a solução não diverge nem flutua aleatoriamente; ao contrário, ela converge para um regime periódico bem definido. As oscilações regulares observadas no estado estacionário não são instabilidades numéricas, mas sim a resposta física correta da interação entre as pás e o fluxo, indicando que o modelo alcançou um equilíbrio dinâmico consistente.

6.4.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Visando a continuidade e o aprimoramento desta linha de pesquisa, recomenda-se prioritariamente a implementação de um acoplamento Fluido-Estrutura (FSI). A integração do OpenFOAM com *solvers* de elementos finitos, como o CalculiX, ou ferramentas de aeroelasticidade, como o OpenFAST, permitiria simular a deformação das pás em tempo real. Essa abordagem é essencial para capturar o comportamento de materiais poliméricos sob carga, corrigindo as simplificações impostas pelo modelo de corpo rígido.

No que tange à fidelidade do ambiente virtual, sugere-se a expansão do domínio computacional para simulações em Campo Livre (*Freestream*), aplicando condições de contorno de entrada/saída (*inletOutlet*) em todas as fronteiras laterais. Essa alteração eliminaria o efeito de bloqueio, aproximando os resultados numéricos das condições reais de operação atmosférica. Paralelamente, o refinamento do modelo de seis graus de liberdade (6DoF) demanda o desenvolvimento de uma biblioteca de restrição de movimento que

aplique um torque resistivo proporcional ao quadrado da velocidade angular, simulando a curva de carga de um gerador real para estabilizar a rotação e permitir a convergência da simulação dinâmica.

6.5 Conclusão

O presente trabalho cumpriu seu objetivo principal de analisar e comparar a eficiência aerodinâmica de hélices eólicas de três e quatro pás, estabelecendo uma metodologia híbrida que integrou prototipagem rápida, experimentação de baixo custo e simulação computacional de alta fidelidade. A abordagem adotada permitiu não apenas quantificar o desempenho energético, mas também isolar os fenômenos físicos que governam a operação de microturbinas em baixos números de Reynolds.

A investigação experimental confirmou a viabilidade técnica do uso de visão computacional para a medição precisa da velocidade angular, eliminando a necessidade de instrumentação intrusiva que poderia prejudicar a aerodinâmica do rotor. Os ensaios em bancada demonstraram que a configuração de quatro pás superou a de três pás, atingindo uma rotação média de estabilização superior (25,52 rad/s contra 23,64 rad/s) e gerando maior tensão elétrica sob as mesmas condições de vento (6,0 m/s). Este resultado empírico evidencia que, para a escala reduzida e o perfil E205 utilizado, o aumento da solidez do rotor (maior área de pá) favorece o torque de partida e a captura de energia, superando as perdas por arrasto adicional.

No âmbito computacional, o modelo desenvolvido no OpenFOAM provou-se uma ferramenta robusta para a previsão do potencial aerodinâmico. A estratégia de simulação, utilizando a técnica de Interface de Malha Arbitrária (AMI) e o modelo de turbulência $k - \epsilon$, foi capaz de replicar a estabilidade do regime permanente observada fisicamente.

A análise crítica da discrepância entre a potência mecânica simulada ($\approx 0,4$ W) e a potência elétrica medida ($\approx 0,003$ W) foi um dos pontos altos do estudo. Longe de invalidar os resultados, essa diferença elucidou as severas limitações de eficiência dos sistemas de conversão eletromecânica em microescala. Conclui-se que o design aerodinâmico proposto é capaz de extrair energia do vento de forma coerente para microturbinas artesanais, mas que a maior parte dessa energia é dissipada por atrito mecânico e perdas resistivas no gerador, e não por falha no design das pás.

Portanto, este trabalho demonstrou que a geometria de quatro pás possui melhor desempenho nas condições estudadas, oferecendo maior torque e estabilidade. A metodologia desenvolvida serve agora como uma plataforma para o desenvolvimento futuro de projetos mais eficientes, sugerindo que os próximos esforços de engenharia devem focar não apenas na aerodinâmica, mas prioritariamente na otimização do acoplamento eletromecânico e na

redução das perdas de transmissão.

APÊNDICE A – Parâmetros Geométricos para Reprodução da Malha

Este apêndice lista as coordenadas, dimensões e configurações topológicas exatas utilizadas para a construção do domínio computacional e da interface rotativa (AMI).

A.1 Definição do Bloco Base (*blockMesh*)

A malha de fundo foi gerada a partir de um bloco cartesiano com as coordenadas de vértices listadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Coordenadas dos vértices do bloco base ($1,0 \times 1,1 \times 1,0$ m).

Vértice	Coordenadas (x y z) [m]	Posição Relativa
0	(-0.5 -0.6 -0.5)	Inferior-Frontal-Esq
1	(0.5 -0.6 -0.5)	Inferior-Frontal-Dir
2	(0.5 0.5 -0.5)	Inferior-Traseiro-Dir
3	(-0.5 0.5 -0.5)	Inferior-Traseiro-Esq
4	(-0.5 -0.6 0.5)	Superior-Frontal-Esq
5	(0.5 -0.6 0.5)	Superior-Frontal-Dir
6	(0.5 0.5 0.5)	Superior-Traseiro-Dir
7	(-0.5 0.5 0.5)	Superior-Traseiro-Esq

Fonte: Acervo próprio.

Configuração de Discretização Inicial:

- **Subdivisões (x y z):** (12 20 12)
- **Total de Células de Fundo:** 2.880 células hexaédricas
- **Grading:** Simple Grading (1 1 1)

As faces do bloco foram mapeadas para as condições de contorno iniciais conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Mapeamento de faces e condições de contorno preliminares.

Face	Vértices (Regra da Mão Direita)	Tipo Primitivo
Entrada (<i>inlet</i>)	(1 5 4 0)	<i>patch</i>
Saída (<i>outlet</i>)	(3 7 6 2)	<i>patch</i>
Paredes (<i>walls</i>)	(0 4 7 3), (2 6 5 1), (0 3 2 1), (4 5 6 7)	<i>wall</i>

Fonte: Acervo próprio.

A.2 Dimensões das Geometrias STL

As superfícies utilizadas pelo utilitário *snappyHexMesh* para o recorte e refinamento do domínio possuem as dimensões apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Dimensões das geometrias auxiliares (formato STL).

Componente	Geometria	Dimensões [m]
Túnel Virtual	Cilindro Externo (Eixo Y)	$R = 0,50$ $L = 1,10$
Região AMI	Cilindro Interno (Eixo Y - Concêntrico)	$R = 0,30$ $L = 0,40$
Hélice	Diâmetro do Rotor	$D = 0,436$

Fonte: Acervo próprio.

A.3 Configuração da Interface Rotativa (AMI)

A interface não-conforme foi gerada através do utilitário *createBaffles* com os seguintes parâmetros de controle:

- **FaceZone Alvo:** *cylinder_ami* (gerada pelo snappyHexMesh)
- **Par de Patches Criado:** *AMI1* (master) e *AMI2* (slave)
- **Tipo de Condição de Contorno:** *cyclicAMI*
- **Transformação:** Rotacional
- **Eixo de Rotação:** Vetor (0 1 0)
- **Centro de Rotação:** (0 0 0)

APÊNDICE B – Memória de Cálculo das Propriedades Físicas e Numéricas

Este apêndice detalha as equações e os valores utilizados para determinar as propriedades do fluido e as condições iniciais de turbulência apresentadas na Metodologia.

B.1 Cálculo da Densidade do Ar (ρ)

As condições ambientais de Juiz de Fora - MG na data do experimento (03/07/2025) foram utilizadas como referência.

Dados de Entrada:

- Temperatura (T_C): $20^\circ\text{C} \rightarrow T_K = 293,15 \text{ K}$
- Umidade Relativa (ϕ): 65% ou 0,65
- Pressão Atmosférica Local Estimada (P_{atm}): 93.500 Pa (Altitude $\approx 678 \text{ m}$)

Passo 1: Pressão de Saturação de Vapor (p_{sat})

Utilizando a equação de Tetens (Tetens, 1930):

$$p_{sat} = 610,78 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_C}{T_C + 237,3}\right) \quad (\text{B.1})$$

$$p_{sat} \approx 610,78 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot 20}{257,3}\right) \approx 2.337 \text{ Pa} \quad (\text{B.2})$$

Passo 2: Pressões Parciais

Pressão de vapor (p_v) e pressão de ar seco (p_d):

$$p_v = \phi \cdot p_{sat} = 0,65 \cdot 2.337 \approx 1.519 \text{ Pa} \quad (\text{B.3})$$

$$p_d = P_{atm} - p_v = 93.500 - 1.519 \approx 91.981 \text{ Pa} \quad (\text{B.4})$$

Passo 3: Densidade da Mistura

Aplicando a lei dos gases ideais para a mistura, com $R_d = 287,05$ e $R_v = 461,5 \text{ J}/(\text{kg K})$:

$$\rho = \frac{p_d}{R_d \cdot T_K} + \frac{p_v}{R_v \cdot T_K} \quad (\text{B.5})$$

$$\rho = \frac{91.981}{287,05 \cdot 293,15} + \frac{1.519}{461,5 \cdot 293,15} \approx 1,104 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{B.6})$$

B.2 Estimativa dos Parâmetros de Turbulência

Para a inicialização do modelo $k - \epsilon$, considerou-se as características geométricas da hélice ($D = 0,436$ m) e a velocidade de referência ($U = 6$ m/s). Os valores foram calculados conforme metodologia clássica para escoamentos externos.

1. Número de Reynolds (Re)

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} = \frac{1,104 \cdot 6 \cdot 0,436}{1,851 \cdot 10^{-5}} \approx 1,56 \cdot 10^5 \quad (\text{B.7})$$

O valor confirma o regime turbulento.

2. Intensidade Turbulenta (I)

Calculada pela correlação para escoamento externo em baixo Reynolds ($Re^{-1/8}$):

$$I = 0,16 \cdot (1,56 \cdot 10^5)^{-0,125} \approx 0,0359 \quad (3,59\%) \quad (\text{B.8})$$

3. Energia Cinética Turbulenta (k)

Utilizando $I = 3,59\%$:

$$k = \frac{3}{2}(I \cdot U)^2 = 1,5 \cdot (0,0359 \cdot 6)^2 \approx 0,070 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (\text{B.9})$$

4. Taxa de Dissipação (ϵ)

Assumindo comprimento de escala turbulenta $l \approx 0,07D$:

$$l = 0,07 \cdot 0,436 \approx 0,0305 \text{ m} \quad (\text{B.10})$$

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{0,75} \cdot k^{1,5}}{l} = \frac{0,09^{0,75} \cdot 0,070^{1,5}}{0,0305} \approx 0,09879 \text{ m}^2/\text{s}^3 \quad (\text{B.11})$$

B.3 Cinemática do Movimento Prescrito (Rampa)

Para evitar instabilidades numéricas no início da simulação ($t = 0$), a velocidade angular ω foi implementada através de uma função de rampa linear no dicionário *dynamicMeshDict*, conforme a equação:

$$\omega(t) = \begin{cases} \frac{\omega_{est}}{t_{acel}} \cdot t & \text{se } 0 \leq t \leq t_{acel} \\ \omega_{est} & \text{se } t > t_{acel} \end{cases} \quad (\text{B.12})$$

Onde ω_{est} é a rotação estacionária alvo e t_{acel} é o tempo de aceleração extraído experimentalmente (7,0s para 3 pás e 5,84s para 4 pás).

APÊNDICE C – Tabelas de Configuração Numérica do OpenFOAM

As tabelas a seguir detalham os esquemas de discretização e os parâmetros de solução linear configurados nos dicionários *system/fvSchemes* e *system/fvSolution*.

C.1 Esquemas de Discretização (fvSchemes)

Tabela 9 – Configuração dos esquemas numéricos para os termos das equações.

Termo	Esquema Adotado	Justificativa Técnica
Derivada Temporal ($\partial/\partial t$)	<i>Euler</i>	Primeira ordem, implícito. Garante estabilidade na fase transiente (bounded).
Gradientes (∇)	<i>Gauss linear c/ cellLimited</i>	Segunda ordem. O limitador evita oscilações em gradientes de velocidade abruptos.
Divergente ($\nabla \cdot$): Movimento U	<i>Gauss linearUpwind</i>	Segunda ordem. Melhor precisão para capturar estruturas de esteira.
Divergente ($\nabla \cdot$): Turbulência (k, ϵ)	<i>Gauss upwind</i>	Primeira ordem. Garante que k e ϵ permaneçam positivos (bounded).
Laplaciano (∇^2)	<i>Gauss linear corrected</i>	Considera a não-ortogonalidade da malha nas correções de fluxo difusivo.

Fonte: Acervo próprio.

C.2 Solucionadores Lineares (fvSolution)

Tabela 10 – Configuração dos solvers para os sistemas lineares.

Variável	Solver	Suavizador/Pré-cond.	Relaxação
Pressão (p)	PBiCGStab	DIC	0.3
Velocidade (U)	smoothSolver	symGaussSeidel	0.3
Turbulência (k, ϵ)	smoothSolver	symGaussSeidel	0.3

Fonte: Acervo próprio.

Nota: O algoritmo PIMPLE foi configurado com 4 corretores externos (*nOuterCorrectors*) e 3 corretores internos de ortogonalidade (*nCorrectors*).

C.3 Estrutura de Diretórios do Caso

A organização dos arquivos de configuração segue a hierarquia padrão do OpenFOAM, conforme ilustrado na Figura 15.

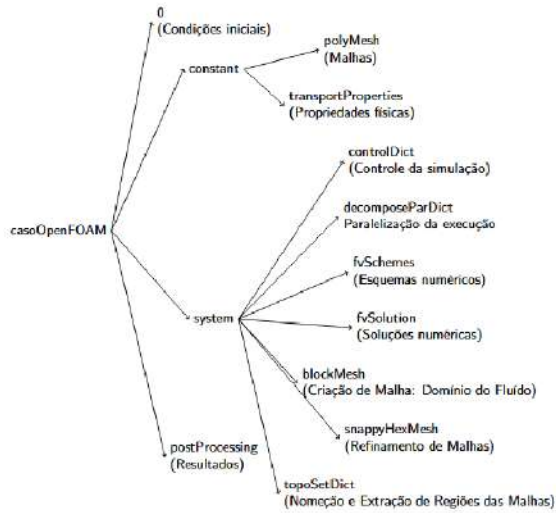


Figura 15 – Árvore de diretórios contendo as definições de malha (constant), condições de contorno (0) e controle de solução (system).

Fonte: Acervo próprio.

REFERÊNCIAS

- ABEEólica. **Eólica Offshore avança no mundo e SENAI-RN vai começar a preparar profissionais no Brasil**. 2024. Note. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/eolica-offshore-avanca-no-mundo-e-senai-rn-vai-comecar-a-preparar-profissionais-no-brasil/>>.
- ADEYEYE, Kehinde; IJUMBA, Nelson; COLTON, Jonathan. Exploring the environmental and economic impacts of wind energy: A cost-benefit perspective. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 27, n. 8, p. 718–731, 2020.
- Airfoil Tools. **E205 (e205-il) Airfoil**. 2025. Disponível em: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=e205-il>. Acesso em: 10 mar. 2025.
- ARNETT, Edward B.; BAERWALD, Erin F. Impact of renewable energy development on wildlife conservation. **Global Change Biology**, v. 18, n. 4, p. 1265–1278, 2012.
- BETZ, Albert. **Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren**. [S.l.], 1920.
- BRADSKI, Gary; KAEHLER, Adrian. **Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library**. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2008.
- BRØNDSTED, Povl; NIJSSEN, Rogier PL; GOUTIANOS, Stergios. **Advances in wind turbine blade design and materials**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2023.
- BURTON, Tony; SHARPE, David; JENKINS, Nick; BOSSANYI, Ervin. **Wind Energy Handbook**. 1. ed. Chichester, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- FERZIGER, Joel H.; PERIĆ, Milovan. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed. [S.l.]: Springer, 2002.
- FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J.; MITCHELL, John W. **Introduction to Fluid Mechanics**. 9. ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 2018.
- Global Wind Energy Council. **Global offshore wind report 2020**. Brussels, Belgium: [s.n.], 2020. 19–12 p.
- GONZALEZ, Rafael C; WOODS, Richard E. **Digital image processing**. 3rd. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2008.
- HANSEN, Martin O. L. **Aerodynamics of wind turbines**. 3. ed. [S.l.]: Routledge, 2015.
- IBGE. **Altitude de Juiz de Fora**. 2020. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- LOSS, Scott R.; WILL, Tom; MARRA, Peter P. Estimates of bird collision mortality at wind facilities in the contiguous united states. **Biological Conservation**, v. 168, p. 201–209, 2013.
- MAGAR, Vanesa; PEÑA, Alfredo; HAHMANN, Andrea Noemí; PACHECO-ROJAS, Daniel Alejandro; GARCÍA-HERNÁNDEZ, Luis Salvador; GROSS, Markus Sebastian. Wind energy and the energy transition: challenges and opportunities for mexico. **Sustainability**, v. 15, n. 6, p. 5496, 2023.

- MUNSON, Bruce R.; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore H.; HUEBSCH, William W.; ROTHMAYER, Alric P. **Fundamentals of Fluid Mechanics**. 7. ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013.
- RABELO, Davi Rodrigues; VIDAL, Douglas Bitencourt; TORRES, Ednildo Andrade; JONG, Pieter de. Generation of wind energy in the state of bahia, brazil: challenges and possibilities. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 3, p. 1145–1155, 2023.
- SCHUCK, Sofia. As 10 tendências da transição energética na américa latina em 2025. **Exame**, 2025.
- SELIG, Michael S.; DONOVAN, John F.; FRASER, David B. **Airfoils at Low Speeds**. Virginia Beach, VA: SoarTech Publications, 1989. (SoarTech 8). Disponível em: <<https://m-selig.ae.illinois.edu>>.
- SOLOMON, Chris; BRECKON, Toby. **Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- SUNAK, Yasin; MADLENER, Reinhard. The impact of wind farm visibility on property values: A spatial difference-in-differences analysis. **Energy Economics**, v. 55, p. 79–91, 2016.
- TETENS, O. Über einige erscheinungen bei der verdunstung und kondensation des wasserdampfes. **Zeitschrift für Meteorologie**, v. 7, p. 148–153, 1930.
- The OpenFOAM Foundation. **Source Code: AMIInterpolation.H (OpenFOAM-9)**. 2021. Código-fonte C++ que implementa a interpolação AMI baseada em Projeção de Galerkin. Disponível em: <<https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-9/blob/master/src/meshTools/AMIInterpolation/AMIInterpolation/AMIInterpolation.H>>.
- The OpenFOAM Foundation. **Turbulence Modeling - k-Epsilon Model**. 2025. Acessado em 08/03/2025. Disponível em: <<https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-turbulence-ras-k-epsilon.html>>.
- VEERS, Paul; BOTTASSO, Carlo L; MANUEL, Lance; NAUGHTON, Jonathan; PAO, Lucy; PAQUETTE, Joshua; ROBERTSON, Amy; ROBINSON, Michael; ANANTHAN, Shreyas; BARLAS, Thanasis *et al.* Grand challenges in the design, manufacture, and operation of future wind turbine systems. **Wind Energy Science**, v. 8, n. 7, p. 1071–1131, 2023.
- VERSTEEG, Henk Kaarle; MALALASEKERA, Weeratunge. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. 2. ed. [S.l.]: Pearson Education, 2007.
- VIAN, A.; TAHAN, C. M. V.; AGUILAR, G. J. R.; GOUVEA, M. R.; GEMIGNANI, M. M. F. **Energia Eólica: fundamentos, tecnologia e aplicações**. 1. ed. São Paulo, Brazil: Editora Edgard Blücher Ltda., 2021.
- WILCOX, David C. **Turbulence Modeling for CFD**. 2. ed. Laurel, Maryland, USA: DCW Industries, Inc., 1998.
- ZHAO, Yipeng; LI, Yongbin; GUO, Shijie; LI, Tiejun. Measuring the angular velocity of a propeller with video camera using electronic rolling shutter. **Journal of Sensors**, v. 2018, p. 1037083, 2018.