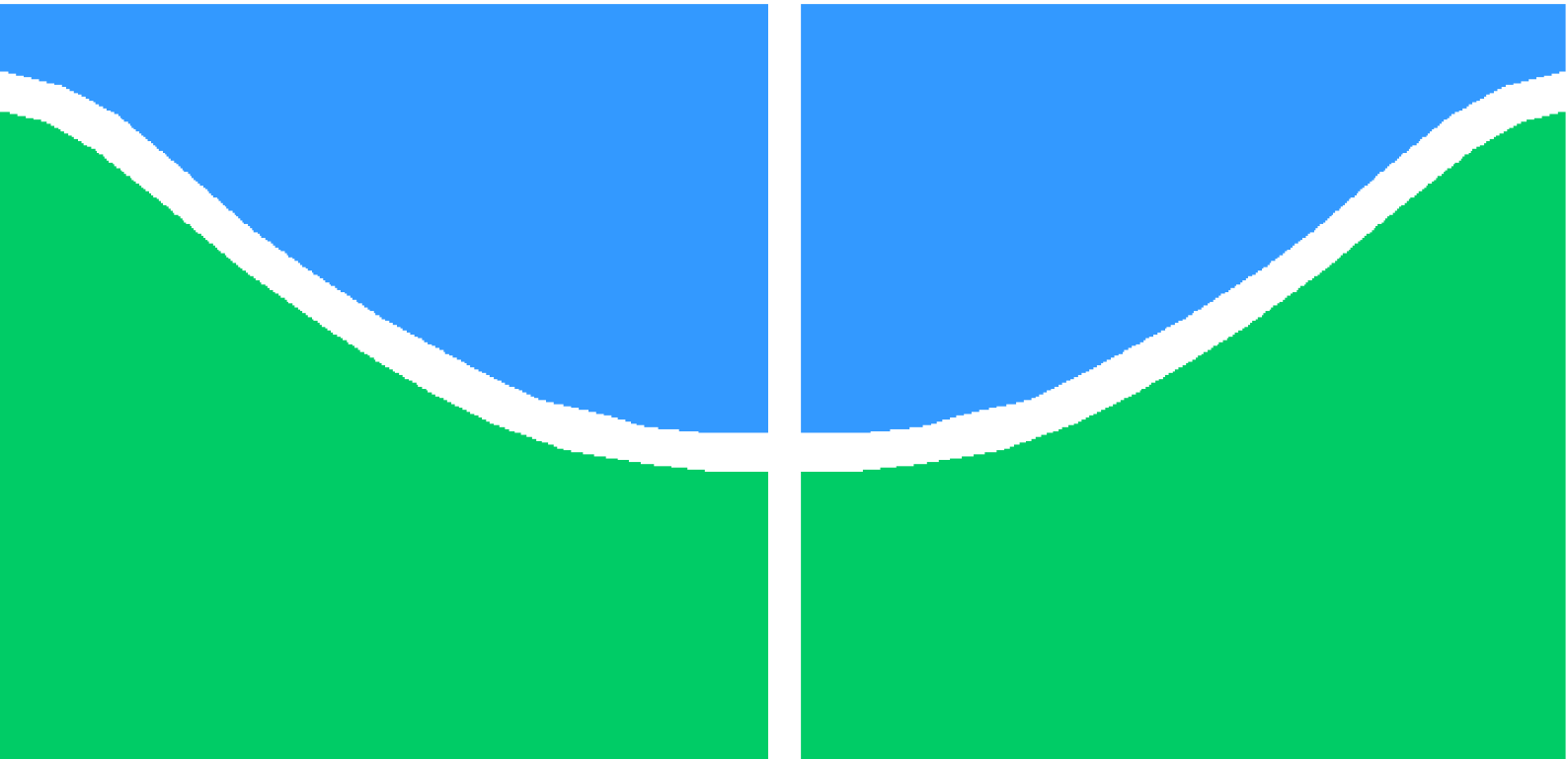




Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharias - FCTE
Engenharia Aeroespacial

Análise Paramétrica do Refinamento de Malha na Simulação de uma Turbina de Fluxo Livre

Autor: Fernanda Noronha Coelho dos Santos Marques
Orientador: Prof. Dr. Luciano Noleto

Brasília, DF
2025



Fernanda Noronha Coelho dos Santos Marques

Análise Paramétrica do Refinamento de Malha na Simulação de uma Turbina de Fluxo Livre

Monografia submetida ao curso de graduação
em Engenharia Aeroespacial da Universidade
de Brasília, como requisito parcial para ob-
tenção do Título de Bacharel em Engenharia
Aeroespacial.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharias - FCTE

Orientador: Prof. Dr. Luciano Noletto

Brasília, DF

2025

Fernanda Noronha Coelho dos Santos Marques

Análise Paramétrica do Refinamento de Malha na Simulação de uma Turbina de Fluxo Livre/ Fernanda Noronha Coelho dos Santos Marques. – Brasília, DF, 2025-

74 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Noleto

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB

Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharias - FCTE , 2025.

1. Refinamento de malha. 2. Dinâmica dos fluidos computacional (CFD). I. Prof. Dr. Luciano Noleto. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade de Ciências E Tecnologias em Engenharia. IV. Análise Paramétrica do Refinamento de Malha na Simulação de uma Turbina de Fluxo Livre

CDU 02:141:005.6

Fernanda Noronha Coelho dos Santos Marques

Análise Paramétrica do Refinamento de Malha na Simulação de uma Turbina de Fluxo Livre

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 18 de fevereiro de 2025:

Prof. Dr. Luciano Noletto
Orientador

Msc. Ramiro Bertolina
Convidado 1

Prof. Dr. Rafael Castilho
Convidado 2

Brasília, DF
2025

Este trabalho é dedicado à menina que olhava para o céu e acreditava que um dia alcançaria voos mais altos, você conseguiu!

Agradecimentos

Chegar até aqui foi uma linda caminhada que só foi possível pela graça de Deus e pelo apoio de pessoas decisivas. Sendo assim, agradeço em primeiro lugar a Deus, o meu orientador por ter acreditado no meu trabalho. A minha tia e madrinha Josefa *in memoriam* por ter me dado a oportunidade de estar aqui na Universidade de Brasília, assim como tio Romeo, Isabel e Guilherme.

Não poderia deixar de agradecer a minha mãe por ter sonhado esse sonho comigo e sempre ter me incentivado a seguir os meus sonhos. Pai muito obrigada por nunca ter duvidado do meu potencial. Ricardo saiba que você sempre foi uma das minhas forças para prosseguir. Gabriel obrigada por ter sido o meu grande apoio em momentos difíceis. Por fim muito obrigada aos meus grandes amigos que sempre me apoiaram nessa caminhada.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,
mas transformai-vos pela renovação da mente,
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

Resumo

A precisão das simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional depende de diversos fatores, dentre eles este trabalho irá abordar a qualidade da malha, que influencia na estabilidade numérica, no tempo de convergência e na confiabilidade dos resultados. Este estudo investiga a influência do refinamento da malha no desempenho de uma turbina hidrocínética de eixo horizontal (HK10) em escala 1:10, analisando especificamente o coeficiente de potência em função da razão de velocidade de ponta. Foram geradas 31 malhas distintas, variando o refinamento dos elementos por meio do método *Patch Independent*, garantindo melhor controle da geração da malha da geometria. Os resultados foram analisados com base em estudos de convergência e sensibilidade da malha, avaliando como o refinamento influencia a precisão do coeficiente de potência em comparação aos valores esperados na prática. Os dados obtidos evidenciam a sensibilidade do coeficiente de potência ao refinamento da malha, destacando sua influência na convergência dos resultados.

Palavras-chave: Dinâmica dos Fluidos Computacional, Refinamento de Malha, Turbina Hidrocínética, Coeficiente de Potência, Razão de Velocidade de Ponta.

Abstract

The accuracy of Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations depends on several factors, among which this study focuses on mesh quality, as it influences numerical stability, convergence time, and result reliability. This study investigates the influence of mesh refinement on the performance of a horizontal-axis hydrokinetic turbine (HK10) at a 1:10 scale, specifically analyzing the power coefficient as a function of the tip speed ratio.

A total of 31 different meshes were generated, varying the refinement of the elements using the Patch Independent method, ensuring better control over the mesh generation of the geometry. The results were analyzed based on mesh convergence and sensitivity studies, evaluating how refinement affects the accuracy of the power coefficient compared to expected practical values. The obtained data highlight the sensitivity of the power coefficient to mesh refinement, emphasizing its influence on result convergence.

Key-words: Computational Fluid Dynamics, Mesh Refinement, Hydrokinetic Turbine, Power Coefficient, Tip Speed Ratio.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Turbina HK10.	21
Figura 2 – Geometria HK10.	39
Figura 3 – Malha mais refinada (2 mm).	40
Figura 4 – Malha menos refinada (5 mm).	40
Figura 5 – Visualização na turbina da malha mais refinada (2 mm).	41
Figura 6 – Visualização na turbina da malha mais refinada (2 mm) com zoom na pá.	41
Figura 7 – Visualização na turbina da malha menos refinada (5 mm).	41
Figura 8 – Visualização na turbina da malha menos refinada (5 mm), com zoom na pá.	42
Figura 9 – Malha do volume de controle utilizada na simulação.	43
Figura 10 – Turbina no interior do domínio computacional adotado.	45
Figura 11 – Turbina no interior do domínio computacional adotado.	47
Figura 12 – Convergência de Malha - Malhas 1 - 10.	49
Figura 13 – Convergência de Malha - Malhas 11 - 20.	49
Figura 14 – Convergência de Malha - Malhas 21 - 31.	50
Figura 15 – Curvas do Coeficiente de Potência para cada <i>Tip Speed Ratio</i> em visu- alização unificada.	51
Figura 16 – Gráfico de Coeficiente de Potência máximo com relação a malha.	53
Figura 17 – Convergência de Malha - Erro Percentual entre Malhas.	59
Figura 18 – Erro do C_p Máximo em Relação ao Valor de Referência.	59
Figura 19 – Sensibilidade da Malha - C_p Máximo.	60

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características da Turbina HK10.	21
Tabela 2 – Características gerais da malha do volume de controle	42
Tabela 3 – Métricas de qualidade da malha do volume de controle (valores médios)	42
Tabela 4 – Tabela de Malhas e suas características	52
Tabela 5 – Qualidade da Malha para Diferentes Refinamentos	55
Tabela 6 – Valores de y^+ para Diferentes Refinamentos	56
Tabela 7 – Evolução da Convergência da Malha.	58

Lista de abreviaturas e siglas

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CFX	Módulo do <i>Ansys</i> para simulação de fluídos
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
eVTOL	<i>Electric vertical take-off and landing</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier-stokes</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
TDA	Teoria do Disco Atuador
TSR	<i>Tip Speed Ratio</i>
UnB	Universidade de Brasília

Lista de símbolos

A	Área varrida do rotor
c	Velocidade do som
C_p	Coefficiente de potência
cm	Unidade de comprimento
e	energia interna do fluido
F	Força
g	Gravidade
k	Energia cinética turbulenta
L	Comprimento característico da geometria onde ocorre o escoamento
Ma	Número de Mach
mm	Unidade de comprimento
m/s	Unidade de velocidade
P	Potência
p	Pressão
Pa	Unidade de pressão Pascal
rad/s	Unidade de velocidade angular
Re	Número de Reynolds
T	Temperatura
TSR	<i>Tip Speed Ratio</i>
V	Velocidade do escoamento
γ	Peso específico
μ	Viscosidade
ρ	Massa específica
ω	Taxa de dissipação específica
σ	Tensões normais

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contextualização	16
1.2	Objetivos	17
1.2.1	Objetivos específicos	17
1.3	A disposição do trabalho	17
2	TURBINAS	19
2.1	Definição	19
2.2	Classificação das Turbinas	19
2.2.1	Classificação com base no tipo de fluido	19
2.2.2	Classificação com base na direção do fluxo	20
2.2.3	Turbinas de Fluxo Livre	20
2.3	Turbina HK10	20
3	DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ESCOAMENTOS	22
3.1	Propriedades dos Fluidos	22
3.2	Classificação dos escoamentos	22
3.3	Princípios Fundamentais da Dinâmica dos Fluidos	23
3.3.1	Conservação de Massa	23
3.3.2	Conservação de Momento Linear	24
3.4	Turbulência	24
3.4.1	Abordagens para a Modelagem de Turbulência	25
3.4.1.1	Simulação Direta de Turbulência	25
3.4.1.2	Simulação de Grandes Escalas	25
3.4.1.3	Modelos Médios de Reynolds	25
3.5	Modelos de Turbulência	26
3.5.1	Modelo $k - \epsilon$	26
3.5.2	Modelo $k - \omega$	27
3.5.3	Modelo <i>Shear Stress Transport</i>	27
3.6	Modelo RANS-SST no Ansys CFX	28
3.6.1	Equações de Transporte do Modelo RANS-SST	28
3.6.2	Parâmetros do Modelo	29
4	TEORIA DO DISCO ATUADOR	31
4.1	Fundamentos da Teoria do Disco Atuador	31
4.2	Modelagem do escoamento	31

4.3	Conservação de Massa aplicada a Teoria do Disco Atuador	31
4.4	Conservação de Momento Linear aplicada a Teoria do Disco Atuador	32
4.5	Conservação de Energia aplicada a Teoria do Disco Atuador	32
4.6	O Limite Teórico de Betz	32
4.7	Coeficiente de Potência	33
4.8	Razão de Velocidade de Ponta	33
4.9	Limitações da Teoria do Disco Atuador	33
5	DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	34
5.1	Origens e Aplicações da CFD	34
5.2	Etapas de uma Simulação CFD	34
5.2.1	Pré-processamento	35
5.2.2	Solução Numérica	35
5.2.3	Pós-processamento	35
5.3	Geração de Malha no <i>Ansys CFX</i>	35
5.3.1	Criação e Refinamento da Malha	36
5.3.2	Parâmetros de Qualidade da Malha	37
5.3.3	Parâmetro y^+	37
6	METODOLOGIA	38
6.1	Geometria da Turbina	39
6.2	Geração da Malha	39
6.2.1	Critério de Refinamento e Parâmetro y^+	39
6.2.2	Comparação entre malhas a partir do refinamento.	40
6.3	Malha do Volume de Controle	42
6.4	Estudo de Sensibilidade e Convergência da Malha	43
6.4.1	Estudo de Convergência da Malha	43
6.4.2	Estudo de Sensibilidade da Malha	44
6.5	Configuração da Simulação e Condições de Contorno	44
6.5.1	Domínio Computacional	45
6.5.2	Condições de Contorno	45
6.5.2.1	Entrada do Escoamento (<i>Inlet</i>)	45
6.5.2.2	Saída do Escoamento (<i>Outlet</i>)	46
6.5.2.3	Superfícies Laterais	46
6.5.2.4	Pás da Turbina	46
6.5.3	Modelagem do Escoamento e Configuração da Simulação	46
6.5.4	Configuração do Solver	46
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
7.1	Análise da Qualidade da Malha	54

7.1.1	Análise do Parâmetro y^+	55
7.2	Convergência e Sensibilidade da Malha	57
7.2.1	Erro Percentual entre Malhas	57
7.2.2	Erro do C_p Máximo em Relação ao Valor de Referência	58
7.2.3	Sensibilidade da Malha	60
7.3	Discussão dos Resultados e Possíveis Melhorias	61
7.3.1	Possíveis Fontes de Erro	62
7.3.2	Influência do Refinamento da Malha na Modelagem da Turbulência	62
7.4	Conclusão	63
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
	REFERÊNCIAS	66
	ANEXOS	69
	ANEXO A – PRIMEIRO ANEXO	70
A.1	Código para gerar o gráfico de C_p vs TSR dividido em três grupos .	70
A.2	Código para gerar os gráficos de C_p vs TSR de forma individual . .	71
	ANEXO B – SEGUNDO ANEXO	72
B.1	Código para análise de convergência e sensibilidade de malha	72
B.2	Código para análise de C_p por malha	73

1 Introdução

1.1 Contextualização

O desenvolvimento de turbinas de fluxo livre tem sido um campo de estudo amplamente explorado devido à sua relevância em diferentes setores, incluindo a geração de energia e aplicações aeroespaciais. A eficiência aerodinâmica dessas turbinas está diretamente relacionada ao desempenho de suas pás, sendo fundamental a análise da interação entre o fluxo e os elementos rotativos (EASA., 2023).

Um dos principais parâmetros utilizados para avaliar a eficiência dessas turbinas é o coeficiente de potência (C_p), que mede a capacidade de conversão da energia cinética do fluido em trabalho mecânico. Associado a isso, a razão de velocidade de ponta (*TSR - Tip Speed Ratio*) representa a relação entre a velocidade periférica das pás e a velocidade do fluido incidente (BURTON et al., 2011). A otimização desses parâmetros é essencial para maximizar o desempenho aerodinâmico e a eficiência energética de sistemas que empregam rotores.

Além das turbinas eólicas, turbinas hidrocínéticas operam sob os mesmos princípios de conversão de energia, mas em um meio fluido de maior massa específica. Esse fator influencia diretamente o comportamento aerodinâmico das pás, tornando necessária uma análise detalhada do C_p e do *TSR* para melhorar o desempenho dessas estruturas (SØRENSEN, 2015). Ademais, efeitos como variações nas condições de escoamento demandam abordagens avançadas de modelagem e simulação computacional para melhor compreensão do comportamento aerodinâmico dessas turbinas.

A análise numérica por meio da dinâmica dos fluidos computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*) tem sido amplamente empregada para investigar o desempenho aerodinâmico de rotores, permitindo simular o escoamento em condições próximas da realidade (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). O presente trabalho utiliza simulações CFD aplicadas ao modelo de turbina de fluxo livre HK10 para estudar o impacto do refinamento de malhas na obtenção do coeficiente de potência, comparando os resultados numéricos com os valores de referências, obtidos no estudo de interação entre esteiras aerodinâmicas em turbinas de eixo horizontal (MENDES, 2020). Para isso, serão conduzidos estudos de análise de convergência e sensibilidade da malha, visando entender a influência do refinamento nos resultados obtidos.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho aerodinâmico de uma turbina de fluxo livre, utilizando simulações computacionais no software *Ansys CFX*. O estudo se concentra em compreender a influência do refinamento de malha nos parâmetros de desempenho, especialmente no coeficiente de potência (C_p), e estabelecer uma correlação entre os resultados numéricos e referências teóricas e experimentais.

1.2.1 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica detalhada sobre o estado da arte na simulação de turbinas de fluxo livre, com foco no entendimento da dinâmica do fluido computacional e a teoria do disco atuador;
- Implementar simulações numéricas de uma turbina de fluxo livre utilizando diferentes níveis de refinamento de malha, analisando a convergência e a precisão dos resultados obtidos para o C_p ;
- Comparar os valores simulados de C_p com dados experimentais e teóricos disponíveis, validando a abordagem metodológica empregada no estudo;
- Avaliar a relação entre a Taxa de Velocidade de Ponta (TSR) e o coeficiente de potência (C_p), explorando como o refinamento das malhas se aplicam a essa relação;
- Identificar as configurações de malha que oferecem um equilíbrio ideal entre precisão nos resultados e custo computacional, buscando otimização para futuros estudos.

1.3 A disposição do trabalho

Este trabalho está organizado de maneira a conduzir o leitor pelos aspectos teóricos e práticos envolvidos na análise de turbinas utilizando métodos de dinâmica dos fluidos. O primeiro capítulo apresenta uma contextualização geral acerca do trabalho, bem como apresenta os objetivos gerais e específicos a serem desenvolvidos. O capítulo 2 aborda uma introdução geral sobre turbinas, abordando suas definições, classificações e aplicações. O capítulo 3 aborda os principais aspectos teóricos envolvendo escoamentos e o fenômeno de turbulência, além de apresentar as diferentes classificações de escoamentos pela literatura e as principais equações que regem os escoamentos no estudo da dinâmica dos fluidos. Por sua vez, o capítulo 4 apresenta e explora a Teoria do Disco Atuador, cuja metodologia é utilizada na análise de escoamentos em turbinas. O objetivo deste capítulo é apresentar o equacionamento do Coeficiente de Potência e da Razão de Velocidade de Ponta, bem como mostrar as limitações dessa abordagem. No capítulo 5 é apresentado os aspectos

teóricos da modelagem CFD, além de serem apresentadas as etapas de uma simulação e os principais modelos de turbulência utilizados, com foco no RANS-SST utilizado no software *Ansys CFX*. A metodologia do trabalho é apresentada no capítulo 6, abrangendo os procedimentos conduzidos para realização das simulações CFD, estudos de convergência e de sensibilidade das malhas. Os resultados obtidos e as respectivas discussões são apresentados no capítulo 7, e, por fim, as considerações finais são apresentadas no capítulo 8, ressaltando as principais conclusões e contribuições do estudo, além de sugestões para trabalhos futuros dentro do estudo de turbinas.

2 Turbinas

2.1 Definição

As turbinas são dispositivos mecânicos projetados para converter a energia de um fluido, seja cinética ou potencial, em trabalho mecânico. O princípio básico envolve o movimento do fluido interagindo com as pás, que capturam a energia do fluxo e a transformam em movimento rotacional, onde esse processo depende da transferência de energia entre o fluido e a turbina, sendo essencial para diversas aplicações, como geração de energia, propulsão aeroespacial e sistemas industriais. O design e a operação das turbinas são fundamentados nos princípios da termodinâmica e dinâmica dos fluidos, que afetam sua eficiência e capacidade de conversão de energia (BURTON et al., 2011; WHITE, 2018; CENGEL; CIMBALA, 2018).

2.2 Classificação das Turbinas

As turbinas podem ser classificadas de acordo com diferentes critérios, como o tipo de fluido de trabalho, a direção do fluxo ou o método de conversão de energia. Abaixo estão as principais classificações das turbinas:

2.2.1 Classificação com base no tipo de fluido

- **Turbinas Eólicas** - Tem como fluido de trabalho o vento. A sua principal aplicação é na geração de energia elétrica através da conversão da energia cinética do vento.
- **Turbinas hidráulicas** - Estas utilizam a água como fluido de trabalho, geralmente situadas em usinas hidrelétricas. Aproveitam a energia potencial da água para gerar movimento rotacional.
- **Turbinas a gás** - Estas turbinas possuem gases, como o ar ou outros combustíveis queimados como fluido de trabalho, para gerar movimento rotacional. São comumente utilizadas em usinas termelétricas e em motores de aeronaves.
- **Turbinas a vapor** - Estas utilizam do vapor de água gerado em caldeiras para movimentar um rotor. Elas são amplamente usadas em usinas de geração de energia elétrica.

2.2.2 Classificação com base na direção do fluxo

- **Turbinas de fluxo axial** - O fluido flui paralelamente ao eixo da turbina. Este tipo de turbina é comum em turbinas eólicas e em turbinas de aviões, como as turbinas de motores a jato.
- **Turbinas de fluxo radial** - O fluido flui perpendicularmente ao eixo da turbina, sendo comum em turbinas hidráulicas e em algumas turbinas a gás.
- **Turbinas de fluxo misto** - Combinam os fluxos axial e radial. São projetadas para otimizar a eficiência dependendo das condições operacionais.

2.2.3 Turbinas de Fluxo Livre

As turbinas de fluxo livre operam sem restrições físicas no fluxo ao redor do rotor, como no caso das turbinas hidráulicas de eixo horizontal. Essas turbinas são amplamente utilizadas em parques eólicos devido à sua eficiência em aproveitar o vento em grandes altitudes (HEIER, 2014). Além disso, turbinas de fluxo livre são aplicáveis a aeronaves elétricas de decolagem e pouso vertical (eVTOLs) e drones. A ausência de carenagem reduz a resistência ao fluxo, permitindo um design mais compacto e leve, características essenciais para a eficiência de eVTOLs e drones (GUIMARÃES; SILVA; OLIVEIRA, 2021).

2.3 Turbina HK10

O modelo de turbina hidrocínética HK10, que será utilizada neste trabalho, é uma turbina de pequeno porte projetada para aplicações em pesquisa e simulação de arranjos de turbinas em campo hidrocínético. Ela tem como característica um design compacto e eficiente, sendo capaz de operar em uma faixa de velocidades moderadas, o que a torna ideal para experimentos em laboratório e simulações numéricas (MENDES, 2020). A Figura 1 pertencente ao (MENDES, 2020) mostra a turbina HK10.

A turbina HK10 foi desenvolvida pelo Laboratório de Energia e Ambiente da Universidade de Brasília no projeto *Hydrok* possui características aerodinâmicas otimizadas para reduzir as perdas por arrasto, o que aumenta sua eficiência. Na tabela 1 é possível conhecer suas informações técnicas.

Essa turbina será utilizada para simulações numéricas com o objetivo investigar o desempenho em termos de taxa de coeficiente da potência (C_p) e *tip speed ratio* (TSR) para diferentes malhas.

Vale destacar que a eficiência das turbinas está intimamente ligada ao comportamento do fluido que interage com as pás, onde o estudo de fenômenos como a turbulência, camadas limite e a dinâmica do escoamento são essenciais para a otimização do



Figura 1 – Turbina HK10.

Tabela 1 – Características da Turbina HK10.

Fonte: (MENDES, 2020)

Parâmetro	Valor
Diâmetro	2.1 m
Potência nominal	10 kW
Velocidade	2.5 m/s
Rotação nominal	20-40 rpm
Rotor	4 pás (em compósito metal/epoxy)
Peso	750 kg
Gerador	Imãs permanentes com fluxo axial
Transmissão	Multiplicação 1:12 com engrenagens planetárias
Regulação de potência	Retificação AC/DC c/conversor
Tensão nominal	120/240/480 V

desempenho das turbinas. Esses aspectos são fundamentais para entender como o fluido se comporta ao redor do rotor, influenciando a eficiência de conversão de energia. Este tema será abordado com mais detalhes no próximo capítulo, que tratará da definição e classificação de escoamentos.

3 Definição e Classificação de Escoamentos

O estudo dos escoamentos de fluidos é fundamental para a compreensão de fenômenos presentes em diversas áreas da engenharia, especialmente na análise e no design de turbinas e sistemas aerodinâmicos. Fluidos são substâncias que se deformam continuamente sob a ação de uma tensão cisalhante (WHITE, 2018) onde, diferente dos sólidos, que mantêm um arranjo molecular estrutural fixo, os fluidos adaptam sua forma ao recipiente que os contém, podendo ser classificados em líquidos e gases (CENGEL; CIMBALA, 2018).

3.1 Propriedades dos Fluidos

As propriedades físicas dos fluidos influenciam diretamente o comportamento de um escoamento, e são determinantes para os mecanismos de transferência de energia e momento, essenciais para o desempenho de turbinas. As principais propriedades físicas dos fluidos são descritas a seguir:

- **Pressão (p)** - A pressão é a força exercida por unidade de área e é uma grandeza fundamental para o estudo do comportamento de fluidos. Em sistemas de turbinas, a diferença de pressão entre as superfícies das lâminas tem um impacto direto na geração de força (WHITE, 2018).
- **Massa específica (ρ)** - Representa a massa específica do fluido e é dada por $\rho = \frac{m}{V}$, onde m é a massa e V é o volume. No caso do ar, a massa específica é afetada pela pressão e pela temperatura, sendo modelada pela equação dos gases ideais: $p = \rho RT$, onde R é a constante do gás específico (WHITE, 2018).
- **Viscosidade (μ)** - A viscosidade é uma medida da resistência interna do fluido ao escoamento. Ela é crucial para a formação de camadas limites em turbinas e afeta a eficiência do processo de conversão de energia (CENGEL; CIMBALA, 2018).

Embora o fluido seja composto por partículas discretas, no escopo deste trabalho será considerado o fluido como um meio contínuo, dado o grande número de partículas em um volume típico.

3.2 Classificação dos Escoamentos

Os escoamentos de fluidos podem ser classificados de várias maneiras, com base em características do movimento e das condições do fluido. Para contextualizar este trabalho

será abordada a diferenciação entre escoamento laminar e turbulento.

No escoamento laminar, as partículas do fluido seguem trajetórias suaves e bem definidas, e as linhas de corrente são paralelas. Em escoamentos turbulentos, há uma distribuição caótica e tridimensional das partículas, que dificulta a previsão do comportamento do fluido (ANDERSON, 2001).

A distinção entre escoamentos laminares e turbulentos pode ser feita por meio do Número de Reynolds (Re), dado pela equação:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}. \quad (3.1)$$

Onde:

- v é a velocidade característica do fluido,
- L é o comprimento característico da geometria,
- ρ é a massa específica, e
- μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

Para um escoamento laminar, o valor de Re é baixo, enquanto que, para um escoamento turbulento, Re é alto (WHITE, 2018).

3.3 Princípios Fundamentais da Dinâmica dos Fluidos

A dinâmica dos fluidos é regida por três princípios fundamentais que são essenciais para a modelagem de escoamentos e para a análise do comportamento de turbinas, sendo elas: 1) conservação de massa, 2) conservação de energia e 3) conservação de momento linear. Como este trabalho não envolve a transferência de calor, o foco estará na conservação de massa e do momento linear.

3.3.1 Conservação de Massa

A equação da continuidade expressa a conservação de massa, estabelecendo que a taxa de variação da massa dentro de um volume de controle deve ser igual ao fluxo de massa que sai. Para escoamentos incompressíveis, onde a massa específica ρ é contante, a equação se simplifica para a equação (3.2),

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0. \quad (3.2)$$

Onde $\mathbf{v}$ é o vetor velocidade do fluido. Isso implica que o escoamento não apresenta variação do volume do fluido em qualquer ponto do domínio, garantindo a conservação de massa no regime incompressível (WHITE, 2018).

3.3.2 Conservação de Momento Linear

A conservação do momento linear é descrita pelas equações de Navier-Stokes, que levam em consideração as forças internas, como a viscosidade, e as forças externas, como a pressão e a gravidade. Conforme apresentado em (CENGEL; CIMBALA, 2018), a equação geral para um fluido Newtoniano é dada por:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}. \quad (3.3)$$

Onde p é a pressão, μ é a viscosidade dinâmica do fluido e $\mathbf{f}$ representa as forças externas aplicadas ao fluido, como a gravidade. A equação (3.3) expressa a relação entre a variação temporal do momento, a convecção de momento e as forças que atuam sobre o fluido.

Até o momento neste capítulo, foram abordadas as propriedades e classificações dos escoamentos, fundamentais para a análise do comportamento dos fluidos em sistemas aerodinâmicos. A compreensão das diferentes categorias de escoamento, como laminar e turbulento, estabelece a base para o estudo dos modelos que descrevem a turbulência. A turbulência será explorada detalhadamente na próxima seção, onde os principais modelos de turbulência e sua aplicação em simulações de escoamento serão abordados com maior rigor teórico.

3.4 Turbulência

A turbulência é um estado tridimensional e caótico do escoamento de fluidos, caracterizado por movimentos irregulares e altamente sensíveis a condições iniciais. Esse fenômeno surge quando o número de Reynolds (Re) representado pela equação (3.1), que relaciona as forças inerciais às forças viscosas, ultrapassa um limiar crítico (POPE, 2000). A transição do regime laminar para o turbulento é um tema central em diversas áreas da engenharia, sendo particularmente relevante em aplicações aeroespaciais, como o desempenho de asas, fuselagens e turbinas de motores. Para altos valores de Re , as forças inerciais predominam, levando ao surgimento de estruturas turbulentas multi-escalares. Essas estruturas impactam diretamente a resistência aerodinâmica, a transferência de calor e eficiência de sistemas aeronáuticos e industriais (WILCOX, 2006).

O estudo da turbulência baseia-se nas equações de Navier-Stokes e nos princípios de dinâmica dos fluidos. Vale salientar que no regime turbulento, as equações de Navier-

Stokes exibem uma complexidade computacional significativa devido à presença de estruturas de vórtices em múltiplas escalas, o que requer a utilização de modelos numéricos (POPE, 2000).

3.4.1 Abordagens para a Modelagem de Turbulência

3.4.1.1 Simulação Direta de Turbulência

A Simulação Direta de Turbulência, do inglês *Direct Numerical Simulation* (DNS) resolve diretamente todas as escalas de movimento, desde as maiores, escalas de energia, até as menores, escalas dissipativas. Embora forneça alta precisão, é computacionalmente inviável para números de Reynolds elevados devido ao alto custo computacional (SAGAUT, 2006). Dessa forma, é amplamente utilizada em estudos acadêmicos e validação de modelos para escoamentos em baixas escalas de Reynolds, como demonstrado no estudo *Direct numerical simulation of turbulent flow in pipes with realistic large roughness at the wall* (MAIO et al., 2023).

3.4.1.2 Simulação de Grandes Escalas

Na simulação de Grandes Escalas, do inglês *Large Eddy Simulation* (LES), apenas as escalas maiores de movimento são resolvidas diretamente, enquanto as escalas menores são modeladas, permitindo um equilíbrio entre precisão e custo computacional (SAGAUT, 2006). Essa abordagem pode ser aplicada em simulações de escoamento em motores a jato e combustores, como no trabalho de computação do ruído irradiado por um jato subsônico usando uma metodologia implícita para simulação de grandes escalas (MOSER; MEDEIROS; SILVESTRINI, 2013).

3.4.1.3 Modelos Médios de Reynolds

Os Modelos Médios de Reynolds, do inglês *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS), são uma abordagem amplamente utilizada na simulação numérica de escoamentos turbulentos. Essa metodologia baseia-se na decomposição do campo de velocidade em uma média temporal e uma componente flutuante, permitindo reformular as equações de Navier-Stokes de forma a eliminar a necessidade de resolver diretamente todas as escalas da turbulência (WILCOX, 2006).

Ao aplicar a média de Reynolds nas equações de Navier-Stokes, surgem termos adicionais conhecidos como tensores de Reynolds, que representam a contribuição das flutuações turbulentas ao transporte de quantidade de movimento. Como esses termos adicionais introduzem um número maior de incógnitas do que equações disponíveis, torna-se necessário empregar modelos de fechamento, os chamados modelos de turbulência, para estimar o comportamento desses efeitos turbulentos (POPE, 2000).

Os modelos RANS podem ser classificados em diferentes categorias, sendo as mais comuns:

- Modelos de uma equação de transporte, como o Spalart-Allmaras, que resolve uma única equação para a viscosidade turbulenta e é amplamente utilizado em aplicações aerodinâmicas de baixa complexidade computacional (SPARLAT; ATKINS, 1994).
- Modelos de duas equações de transporte, como o $k - \epsilon$ e o $k - \omega$, que resolvem equações adicionais para variáveis como a energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação turbulenta (ϵ) ou a taxa de dissipação específica (ω), permitindo maior flexibilidade e precisão em diferentes condições de escoamento (WILCOX, 2006).
- Modelos de tensão de Reynolds (RSM - Reynolds Stress Model), que resolvem um conjunto de equações diferenciais para cada componente do tensor de Reynolds, oferecendo maior precisão em escoamentos altamente anisotrópicos, mas com um custo computacional mais elevado (LAUNDER; REECE; RODI, 1975).

A abordagem RANS é amplamente utilizada na engenharia devido à sua eficiência computacional, sendo aplicada em diversas áreas, como aerodinâmica de veículos, turbomáquinas e análise de escoamentos em turbinas eólicas e hidrocinéticas. Apesar das limitações em capturar estruturas turbulentas altamente dinâmicas, sua relação custo-benefício faz com que seja a opção mais viável para simulações de engenharia de grande escala (MENTER, 1994).

3.5 Modelos de Turbulência

A modelagem de turbulência é essencial para a dinâmica dos fluidos computacional, dado que a maioria dos escoamentos reais apresenta comportamento turbulento. Modelos de turbulência permitem a resolução de problemas complexos sem a necessidade de capturar todas as escalas turbulentas (WILCOX, 2006). Para a modelagem numérica, uma abordagem amplamente utilizada é a formulação das equações de Navier-Stokes médias de Reynolds (RANS), que busca representar os efeitos da turbulência sobre o escoamento médio. Entre os modelos baseados nas equações RANS, destacam-se os modelos $k - \epsilon$, $k - \omega$ e a formulação SST (Shear Stress Transport), que combinam as vantagens dessas abordagens.

3.5.1 Modelo $k - \epsilon$

O modelo $k - \epsilon$ é amplamente utilizado devido à sua robustez e simplicidade, sendo adequado para escoamentos externos e internos de alto Reynolds (WILCOX, 2006). Ele se baseia na resolução de duas equações: a da energia cinética turbulenta (k), expressa

por (3.4), e a taxa de dissipação turbulenta expressa pela 3.6 (POPE, 2000). A equação de transporte de k é definida em (3.4), onde σ_k é o parâmetro de difusão de k e P_k é a produção de energia cinética turbulenta descrita pela equação 3.5 (WILCOX, 2006),

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla k = P_k - \epsilon + \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right], \quad (3.4)$$

$$P_k = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \epsilon = C_1 \frac{\epsilon}{k} P_k - C_2 \epsilon^2 + \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right]. \quad (3.6)$$

Embora seja eficaz para escoamentos com separação mínima e baixa curvatura, o modelo $k - \epsilon$ tem limitações em regiões próximas a paredes devido à dificuldade em capturar efeitos viscosos dominantes.

3.5.2 Modelo $k - \omega$

O modelo $k - \omega$ é mais adequado para regiões próximas às paredes, onde os gradientes de velocidade são mais intensos (ANDERSON, 1995). Ele também utiliza duas equações, sendo a primeira uma variação da equação do k , conforme (3.7), e a segunda envolvendo o parâmetro ω , que representa a taxa de dissipação específica (MENTER, 1994),

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla k = P_k - \beta^* k \omega + \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right]. \quad (3.7)$$

O modelo $k - \omega$ apresenta melhor desempenho para escoamentos com separação de camada limite e curvatura (MENTER, 1994).

3.5.3 Modelo *Shear Stress Transport*

O modelo SST (*Shear Stress Transport*) é uma combinação dos modelos de turbulência $k - \omega$ e $k - \epsilon$. Ele foi introduzido por (MENTER, 1994) para aproveitar as vantagens de ambos, superando suas limitações individuais. A abordagem SST permite melhorar a precisão na modelagem de escoamentos que envolvem gradientes de pressão adversos e separações de camada limite, características comuns em diversas aplicações aerodinâmicas e turbomáquinas.

O modelo SST se caracteriza por sua abordagem híbrida adaptativa, utilizando o modelo $k - \omega$ próximo às paredes, onde a precisão é crítica, e transita para o modelo $k - \epsilon$ em regiões afastadas das paredes (MENTER, 1994). Essa estratégia resolve as deficiências

de cada modelo individual, proporcionando um desempenho superior em condições de separação e transição de fluxo. Além disso, a combinação desses modelos torna o SST uma escolha preferida para escoamentos com características complexas como turbulência com separação de camada limite, frequentemente observada em turbinas de fluxo livre.

3.6 Modelo RANS-SST no *Ansys CFX*

A modelagem numérica no *Ansys CFX* utiliza o modelo RANS-SST (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes* com *Shear Stress Transport*) para resolver problemas de dinâmica dos fluidos envolvendo escoamentos turbulentos. O modelo SST, implementado no *Ansys CFX*, é utilizado neste trabalho devido à sua capacidade de capturar efeitos de separação de camada limite, que são de particular interesse na análise do escoamento ao redor de turbinas de fluxo livre.

As equações de Navier-Stokes médias de Reynolds (RANS) são a base para descrever escoamentos turbulentos, obtida pela decomposição de Reynolds de variáveis do escoamento, conforme mostrado em (3.8), onde $\bar{u}_i$ e $\bar{p}$ representam as componentes médias da velocidade e da pressão, enquanto u'_i e p' são as flutuações associadas à turbulência.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad p = \bar{p} + p', \quad (3.8)$$

As equações RANS para a conservação de massa e momento são descritas em (3.9), onde $\bar{\rho}$ é a massa específica média, μ é a viscosidade dinâmica e $-\bar{\rho}u'_i u'_j$ representa o tensor de tensões de Reynolds, que modela os efeitos da turbulência no escoamento médio.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \bar{\rho} u'_i u'_j \right], \quad (3.10)$$

Para capturar a influência da turbulência no escoamento médio, o modelo SST adota equações de transporte para a energia cinética turbulenta (k) e para a taxa específica de dissipação (ω), garantindo uma abordagem híbrida que combina os modelos $k - \omega$ e $k - \epsilon$.

3.6.1 Equações de Transporte do Modelo RANS-SST

A equação de transporte para a energia cinética turbulenta (k) é expressa pela equação (3.11).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \quad (3.11)$$

onde τ_{ij} é o tensor de tensões turbulentas, μ_t é a viscosidade turbulenta, β^* é um coeficiente empírico e σ_k é o coeficiente de difusão para k ,

A equação de transporte para a taxa específica de dissipação (ω) é dada pela equação (3.12).

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]. \quad (3.12)$$

Essas equações são ajustadas por coeficientes empíricos como α , β e σ_ω , que são ajustáveis conforme a aplicação.

O modelo SST realiza a transição entre os modelos $k-\omega$ e $k-\epsilon$, por meio da função de mistura F_1 , conforme definido na equação (3.13), onde ϕ representa os coeficientes ou termos das equações de transporte,

$$\phi = F_1 \phi_{k-\omega} + (1 - F_1) \phi_{k-\epsilon}. \quad (3.13)$$

Além disso, o modelo limita o cálculo de tensões de cisalhamento turbulento para evitar superestimações com a equação (3.14).

$$\tau_{ij} = \min \left(\frac{\rho k}{\omega}, \frac{a_1 \rho k}{\sqrt{S}} \right), \quad (3.14)$$

onde S é a taxa de deformação média e a_1 é um coeficiente empírico.

3.6.2 Parâmetros do Modelo

Os valores típicos para os parâmetros do modelo SST são:

- $\beta^* = 0.09$;
- $\beta = 0.075$;
- $\sigma_k = 0.85$;
- $\sigma_\omega = 0.5$;
- $\sigma_{\omega 2} = 0.856$;
- $\gamma = 0.52$;
- $a_1 = 0.31$.

O modelo RANS-SST apresenta uma abordagem robusta para a modelagem de escoamentos turbulentos, combinando a precisão do modelo $k - \omega$ nas proximidades da parede com a estabilidade do modelo $k - \epsilon$ nas regiões afastadas, garantindo uma melhor representação da separação da camada limite e dos efeitos de turbulência em escoamentos complexos. A transição entre esses modelos, governada pela função de mistura F_1 , e a limitação das tensões de cisalhamento turbulento tornam o modelo SST adequado para aplicações em turbinas eólicas, onde a interação entre a camada limite e a esteira desempenha um papel fundamental na extração de potência.

No contexto deste estudo, a escolha desse modelo visa capturar com maior precisão os efeitos aerodinâmicos ao redor das pás da turbina, contribuindo para uma melhor estimativa do coeficiente de potência (C_p). No entanto, a eficácia da modelagem depende diretamente do refinamento da malha, especialmente na resolução da camada limite, evidenciando a importância de um controle adequado do parâmetro adimensional y^+ . Esse parâmetro é essencial para garantir a correta aplicação das funções de parede e minimizar erros numéricos, assegurando que a malha seja suficientemente refinada para capturar os efeitos viscosos sem comprometer a estabilidade da solução.

4 Teoria do Disco Atuador

A Teoria do Disco Atuador (TDA) é amplamente utilizada para modelar turbinas eólicas, fornecendo uma abordagem simplificada e eficaz para avaliar seu desempenho aerodinâmico. Ela fornece uma base analítica sólida para a análise preliminar do desempenho de turbinas eólicas, sendo fundamental na determinação dos limites teóricos de eficiência de conversão de energia.

4.1 Fundamentos da Teoria do Disco Atuador

Inicialmente proposta por (BETZ, 1920), a TDA modela o rotor como um disco que reduz a velocidade do ar ao atravessá-lo, sem a necessidade de considerar sua geometria real ou as complexidades do fluxo tridimensional. Seus principais pressupostos incluem:

- O escoamento é unidimensional e incompressível.
- O disco atua como um elemento dissipador de energia.
- O campo de velocidade é simétrico ao longo do eixo da turbina.

A teoria descreve a interação entre o rotor e o vento por meio das variações de velocidade e pressão no escoamento do ar.

4.2 Modelagem do Escoamento

Na TDA, o escoamento é dividido em três regiões:

- **Região a montante** - O escoamento do ar se aproxima do rotor com velocidade V_∞ .
- **Região do disco** - Ocorre a desaceleração para a velocidade V_d .
- **Região a jusante (esteira)** - A velocidade final na esteira é V_t .

4.3 Conservação de Massa aplicada a Teoria do Disco Atuador

De acordo com a conservação de massa, o escoamento do ar que atravessa o disco atuador deve ser contínuo, ou seja, a quantidade de ar que entra e sai do disco deve ser

a mesma. Para isso, a equação de conservação de massa é expandida conforme mostrado em expressa por (4.1),

$$\dot{m} = \rho A_d V_d = \rho A_\infty V_\infty = \rho A_t V_t, \quad (4.1)$$

onde A_d é a área do disco, A_∞ é a área a montante e A_t é a área a jusante (BURTON et al., 2011).

4.4 Conservação de Momento Linear aplicada a Teoria do Disco Atuador

A conservação do momento linear descreve a força exercida no disco devido à diferença de pressão entre a frente e a traseira do disco. A força gerada pela diferença de pressão é responsável pela mudança na velocidade do ar. A equação que descreve essa relação é dada em (4.2),

$$F = (p_1 - p_2)A_d = \dot{m}(V_\infty - V_t), \quad (4.2)$$

onde p_1 e p_2 são as pressões nas faces a montante e a jusante, respectivamente (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2010).

4.5 Conservação de Energia aplicada a Teoria do Disco Atuador

A potência extraída do vento é a taxa de trabalho realizado pela força sobre o disco. A equação para a potência extraída é dada por (4.3).

$$P = F \cdot V_d = \frac{1}{2} \rho A_d (V_\infty^2 - V_t^2) V_d. \quad (4.3)$$

A equação (4.3) descreve como a energia do vento é convertida em energia mecânica através da interação do rotor com o escoamento do ar.

4.6 O Limite Teórico de Betz

O limite de Betz é obtido considerando a indução axial, a , que relaciona a velocidade do ar no disco com a velocidade do vento a montante. A velocidade do ar no disco é dada por $V_d = V_\infty(1 - a)$ e a velocidade na esteira a jusante é $V_t = V_\infty(1 - 2a)$.

Maximizando a potência extraída em função de a , encontra-se o valor máximo do coeficiente de potência:

$$C_{p,máx} = \frac{16}{27} \approx 0,593. \quad (4.4)$$

O valor apresentado em (4.4) é o limite de Betz, e representa a máxima eficiência teórica para uma turbina eólica ideal. Na prática, turbinas reais atingem valores de C_p que variam entre 0,3 e 0,4, dependendo do design e das condições operacionais (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2010).

4.7 Coeficiente de Potência

O coeficiente de potência (C_p) mede a eficiência da conversão de energia do vento em energia mecânica, conforme descrito em (4.5),

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AV_\infty^3}. \quad (4.5)$$

Onde P é a potência extraída pelo rotor, ρ a massa específica do ar, A a área varrida pelo rotor e V_∞ a velocidade do vento incidente.

4.8 Razão de Velocidade de Ponta

A razão de velocidade de ponta (TSR , do inglês *Tip Speed Ratio*) é um parâmetro importante na análise do desempenho de turbinas eólicas. Definida como a razão entre a velocidade angular da turbina (ω) e a velocidade do vento (V_∞), a TSR é expressa pela equação (4.6),

$$TSR = \frac{\omega R}{V_\infty}, \quad (4.6)$$

onde ω é a velocidade angular da turbina, R o raio do rotor e θ o ângulo de inclinação da trajetória da ponta da pá em relação ao vento incidente (BURTON et al., 2011).

4.9 Limitações da Teoria do Disco Atuador

Embora a Teoria do Disco Atuador seja útil para análises iniciais, desconsidera efeitos tridimensionais, viscosidade e detalhes geométricos do rotor. Métodos avançados, como simulações CFD (*Computational Fluid Dynamics*) complementam suas limitações (VERMEER; SØRENSEN; CRESPO, 2003).

5 Dinâmica dos Fluidos Computacional

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*) é uma ferramenta essencial para a análise numérica de escoamentos, permitindo a resolução computacional das equações governantes dos fluidos. Originada de avanços na matemática aplicada e na física dos fluidos, a CFD tornou-se indispensável em diversas áreas da engenharia, como aeroespacial, mecânica e de energia (FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2002).

5.1 Origens e Aplicações da CFD

A história da CFD remonta às primeiras tentativas de resolver numericamente as equações de Navier-Stokes, no início do século XX. O progresso significativo no campo ocorreu com o advento dos computadores digitais nas décadas de 1950 e 1960, viabilizando a solução de problemas antes impossíveis por métodos puramente experimentais ou analíticos (ANDERSON, 1995). Desde então, a CFD evoluiu o desenvolvimento de algoritmos mais eficientes e o aumento do poder computacional teve um papel importante neste processo.

Entre suas aplicações, destacam-se:

- **Aerodinâmica** - Estudos de escoamento de ar sobre aeronaves e automóveis (ANDERSON, 1995).
- **Energia** - Análise de turbinas eólicas e hidrocínéticas (FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2002).
- **Estudos Ambientais** - Modelagem atmosférica e previsão de condições climáticas (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).
- **Engenharia Biomédica** - Simulação de fluxos sanguíneos e ventilação pulmonar (WILCOX, 2006).

5.2 Etapas de uma Simulação CFD

A simulação CFD é composta por três etapas fundamentais: pré-processamento, solução numérica e pós-processamento.

5.2.1 Pré-processamento

Nesta etapa, define-se o problema a ser analisado, incluindo a geometria do domínio, condições de contorno e propriedades do fluido. A malha computacional é gerada para discretizar o domínio, podendo ser estruturada ou não estruturada (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

A escolha da malha influencia diretamente a precisão e o custo computacional. Uma malha muito grossa pode não capturar as variações de pressão e velocidade necessárias, enquanto uma malha excessivamente refinada pode aumentar o tempo computacional sem melhorar significativamente a precisão.

5.2.2 Solução Numérica

As equações governantes do movimento do fluido, geralmente as equações de Navier-Stokes, são resolvidas numericamente por métodos iterativos, como o método de volumes finitos, que envolve a discretização das equações em volumes controlados no domínio (FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2002).

Os algoritmos numéricos são desenvolvidos para resolver essas equações em cada célula ou volume da malha, levando em conta as interações entre as variáveis de interesse, como a velocidade e a pressão do fluido. Programas de CFD como *Ansys Fluent*, *Ansys CFX* e *OpenFOAM* utilizam esses métodos para resolver problemas complexos de escoamento (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

5.2.3 Pós-processamento

Após a obtenção dos resultados numéricos, são analisados parâmetros como campos de velocidade, pressão e turbulência. Esta etapa é essencial para verificar a validade dos resultados e extrair informações úteis para a análise do fenômeno físico estudado (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Técnicas de visualização incluem mapas de contorno e linhas de corrente, permitindo a interpretação do fenômeno estudado (FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2002).

Além disso, a validação dos resultados é uma parte crítica do pós-processamento, onde os resultados da simulação são comparados com dados experimentais, se disponíveis, para garantir a precisão do modelo numérico (ANDERSON, 1995).

5.3 Geração de Malha no *Ansys CFX*

A malha computacional influencia diretamente a precisão, estabilidade e tempo de convergência da solução CFD (FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2002).

A geração da malha é um passo fundamental no pré-processamento de uma simulação CFD. Uma malha de boa qualidade deve atender a critérios como:

- Refinamento adequado nas regiões de interesse;
- Baixo índice de distorção dos elementos;
- Crescimento suave do tamanho dos elementos;
- Número de elementos suficiente para capturar as características do escoamento, sem comprometer o custo computacional.

A escolha do tipo de malha depende da complexidade geométrica e do modelo físico adotado. No *Ansys Meshing* diferentes abordagens podem ser utilizadas para gerar malhas estruturadas ou não estruturadas, cada uma com vantagens e desvantagens ([ANDERSON, 1995](#)). A seguir observa-se as principais:

- **Malha Estruturada** - composta por elementos hexaédricos organizados de forma regular. Oferece alta precisão e eficiência computacional, mas pode ser difícil de gerar para geometrias complexas.
- **Malha Não Estruturada** - composta por elementos tetraédricos, prismáticos ou poliédricos dispostos de maneira mais flexível. Facilita a discretização de geometrias complexas, mas pode resultar em maior custo computacional.
- **Malha Híbrida** - combina elementos estruturados e não estruturados para equilibrar precisão e eficiência computacional.
- **Malha Adaptativa** - permite o refinamento dinâmico da malha durante a simulação, garantindo maior resolução onde necessário.

5.3.1 Criação e Refinamento da Malha

No *Ansys CFX*, a criação da malha é realizada no módulo *Ansys Meshing*, que permite configurar parâmetros como tamanho dos elementos, refinamento local e critérios de qualidade. Entre as técnicas utilizadas, destaca-se o *Patch Independent*, que permite gerar uma malha robusta e flexível, independente da complexidade da geometria. O método *Patch Independent* é baseado na abordagem de elementos não estruturados que busca garantir um controle refinado sobre o tamanho e distribuição dos elementos, sem a necessidade de dependência direta das superfícies da geometria original. O método reduz problemas de distorção e melhora a qualidade da malha em regiões de alta curvatura ou pequenos detalhes. Essa abordagem é particularmente útil quando se deseja um refinamento progressivo e uniforme ao longo do domínio de escoamento ([ANSYS, 2021](#)).

Para avaliar a independência da malha, são realizados estudos de refinamento, onde a resolução da malha é progressivamente aumentada até que os resultados da simulação não sofram variações significativas. Esse processo é essencial para garantir a convergência da solução e a confiabilidade dos resultados obtidos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

5.3.2 Parâmetros de Qualidade da Malha

A qualidade da malha impacta diretamente a precisão da simulação CFD. No *Ansys*, alguns dos principais critérios de qualidade incluem:

- **Qualidade Ortogonal** - Mede o grau de alinhamento dos elementos em relação às superfícies e vizinhos. Valores mais altos indicam melhor qualidade.
- **Razão de Aspecto** - Mede a proporção entre o maior e o menor comprimento dos elementos. Valores muito altos podem indicar distorções excessivas.
- **Assimetria** - Mede o desvio da forma ideal dos elementos. Quanto menor a assimetria melhor a qualidade da malha.

Estes critérios são analisados para garantir que a malha não apresente elementos altamente distorcidos, o que pode comprometer a estabilidade e precisão da simulação.

5.3.3 Parâmetro y^+

O parâmetro adimensional y^+ é fundamental para a correta resolução da camada limite em simulações CFD que utilizam modelos de turbulência como o SST (ANSYS, 2024a). O valor de y^+ define a adequação da malha à formulação da equação da viscosidade turbulenta e deve ser ajustado com base na abordagem utilizada:

- Para modelos de parede resolvida, onde encontra-se um baixo número de Reynolds, o y^+ deve estar próximo de 1 garantindo que a primeira célula esteja dentro da subcamada viscosa.
- Para modelos de parede modelada, onde encontra-se altos valores de Reynolds, y^+ pode estar entre 30 e 300 permitindo o uso de funções de parede.

No presente trabalho, optou-se por um refinamento que buscasse uma qualidade adequada, no entanto, apesar de realizada a observação do y^+ , este não foi um critério base para os refinamentos aplicados as malhas.

6 Metodologia

A metodologia deste trabalho tem como principal objetivo avaliar a convergência e sensibilidade da malha na simulação de uma turbina horizontal HK10 em escala 1:10, utilizando o software *Ansys CFX*. Para isso, foram geradas 31 malhas com diferentes níveis de refinamento na região próxima a turbina, variando o tamanho do elemento no *body sizing* de 5 mm a 2 mm, com o intuito de verificar a estabilidade dos resultados e garantir que o coeficiente de potência (C_p) se aproxime do valor máximo reportado na literatura de $0,254 \pm 007$ (MENDES, 2020).

A abordagem metodológica seguiu diretrizes consolidadas na literatura de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), enfatizando a relevância da qualidade da malha para a precisão dos resultados (FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2002; VERSTEEG; MALASEKERA, 2007). A malha foi gerada no *Ansys Meshing* utilizando o método *Patch Independent*, que possibilita uma discretização mais uniforme e robusta, independentemente da complexidade geométrica da turbina (ANSYS, 2021). O modelo de turbulência adotado foi o *Shear Stress Transport (SST)*, devido à sua capacidade de capturar fenômenos como separação de escoamento e gradientes de velocidade acentuados, características comuns em turbinas eólicas (MENTER, 1994; WILCOX, 2006).

O estudo foi conduzido em cinco etapas principais:

1. Definição da geometria e domínio computacional, assegurando dimensões adequadas para evitar influências artificiais das fronteiras.
2. Geração das 31 malhas e refinamento progressivo, aplicando o método *Patch Independent* para controle preciso do tamanho dos elementos.
3. Configuração das condições de contorno, incluindo a velocidade de entrada baseada na razão de velocidade de ponta.
4. Simulação e análise de convergência da malha, avaliando a estabilidade dos valores de C_p com o refinamento.
5. Comparação dos resultados com a literatura, verificando a proximidade dos valores de C_p obtidos com o valor experimental que varia entre $0,254 \pm 007$ (MENDES, 2020).

Essa metodologia permite avaliar a influência do refinamento da malha na solução numérica e garantir a confiabilidade dos resultados, fornecendo uma base sólida para estudos futuros sobre o comportamento aerodinâmico da turbina HK10.

6.1 Geometria da Turbina

A turbina HK10, objeto de estudo, é um dispositivo hidrocínético de eixo horizontal projetado para a conversão de energia de correntes de água. Na escala adotada de 1:10, a turbina possui um diâmetro de 220 mm e é composta por quatro pás aerodinamicamente projetadas para otimizar a extração de energia. Sua geometria foi modelada com precisão para assegurar que os efeitos do escoamento sobre as pás sejam corretamente capturados na simulação. A Figura 2 apresenta a representação da turbina HK10, utilizada como base para a geração da malha e posterior análise aerodinâmica.

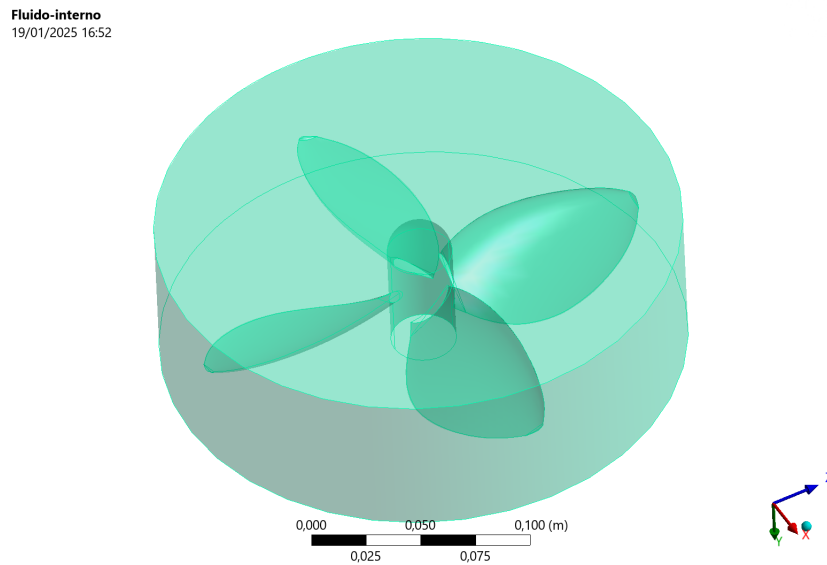


Figura 2 – Geometria HK10.

6.2 Geração da Malha

A geração da malha influencia diretamente a precisão dos resultados, a estabilidade numérica e o tempo de convergência da solução. Neste estudo, foram geradas 31 malhas distintas, variando o refinamento dos elementos na região próxima a turbina para avaliar a convergência e sensibilidade da malha em relação ao coeficiente de potência (C_p).

A malha foi gerada utilizando a abordagem *Patch Independent*, permitindo um melhor controle da distribuição dos elementos. O refinamento foi aplicado principalmente nas pás da turbina, onde ocorrem os maiores gradientes de velocidade e pressão.

6.2.1 Critério de Refinamento e Parâmetro y^+

Para garantir a estabilidade da solução, foram adotados critérios de qualidade da malha, como razão de aspecto, assimetria e qualidade ortogonal. Além disso, o parâmetro adimensional y^+ foi observado para avaliar a correta resolução da camada limite nas

simulações aqui realizadas visto sua importância para o modelo de turbulência adotado SST ([ANSYS, 2024a](#)).

6.2.2 Comparação entre malhas a partir do refinamento.

A Figura 3 apresenta a malha mais refinada (2 mm), enquanto a Figura 4 exibe a malha menos refinada (5 mm) na região da turbina.

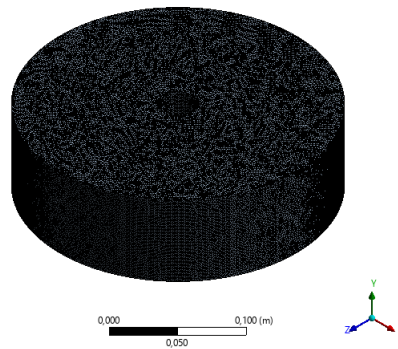


Figura 3 – Malha mais refinada (2 mm).

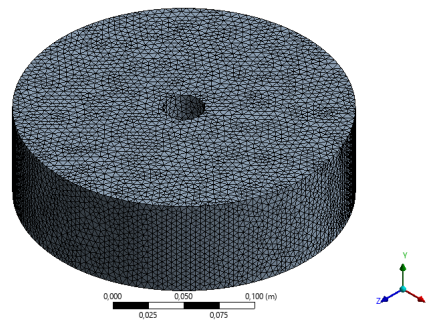


Figura 4 – Malha menos refinada (5 mm).

Nota-se que a malha refinada apresenta maior densidade de elementos na região das pás, permitindo melhor captura dos gradientes. No entanto, o aumento da quantidade de elementos impacta diretamente no custo computacional, exigindo um equilíbrio entre precisão e viabilidade computacional.

Para ilustrar essa diferença, as Figuras 3 e 4 apresentam a malha na região da turbina com elementos de 2 mm e 5 mm, respectivamente. Observa-se que a malha refinada possui uma distribuição mais homogênea dos elementos e uma melhor resolução nas regiões críticas, enquanto a malha menos refinada apresenta uma menor densidade de elementos, o que pode comprometer a precisão dos resultados.

Além disso, as Figuras 5, 6, 7 e 8 mostram um zoom na região das pás do rotor para destacar as diferenças no refinamento. A malha mais refinada ($2mm$) evidencia uma melhor captura da curvatura e dos detalhes geométricos da pá, fator essencial para representar corretamente os gradientes de pressão e velocidade. Já a malha menos refinada ($5mm$) apresenta elementos maiores e menos adaptados à complexidade da geometria, o que pode impactar a modelagem do escoamento ao redor das pás.

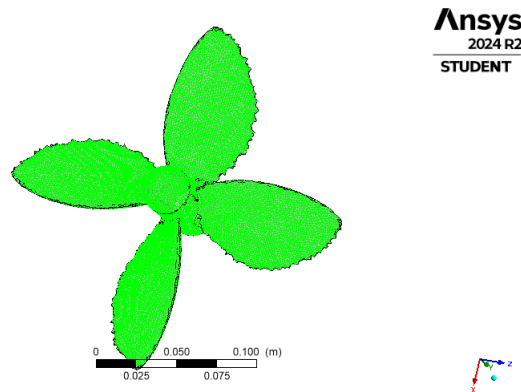


Figura 5 – Visualização na turbina da malha mais refinada (2 mm).

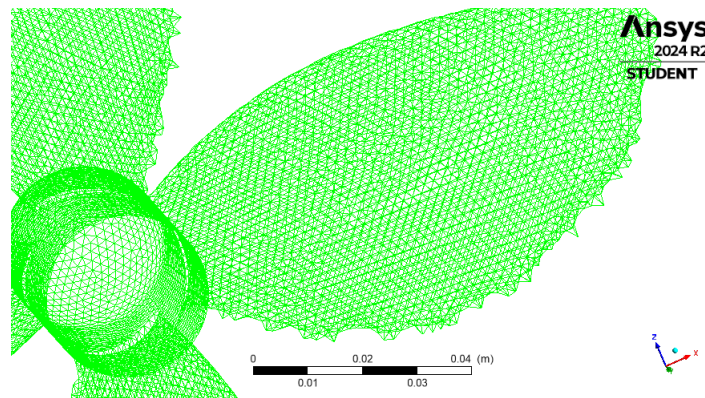


Figura 6 – Visualização na turbina da malha mais refinada (2 mm) com zoom na pá.

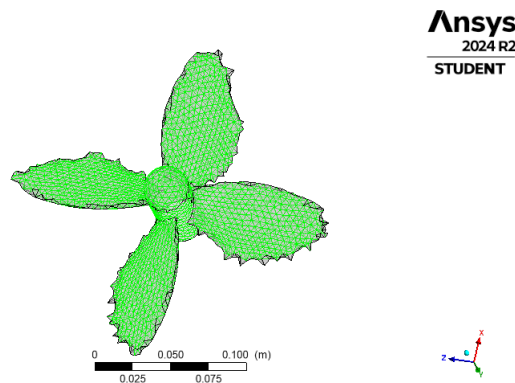


Figura 7 – Visualização na turbina da malha menos refinada (5 mm).

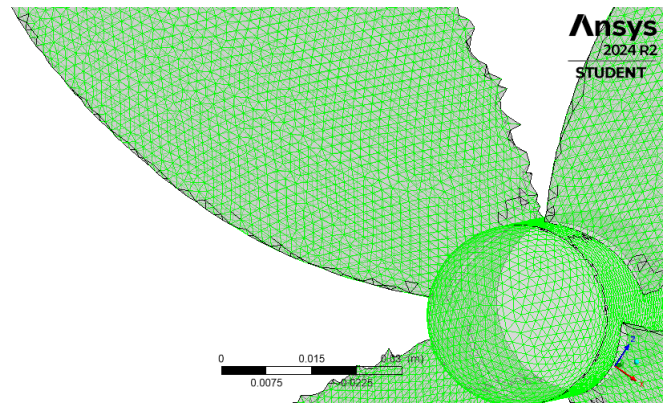


Figura 8 – Visualização na turbina da malha menos refinada (5 mm), com zoom na pá.

6.3 Malha do Volume de Controle

Além da malha na região da turbina, a qualidade da discretização do volume de controle é um fator determinante para a correta captura da esteira aerodinâmica e dos efeitos induzidos pelo escoamento. Neste estudo, a malha do volume de controle não passou por um processo de refinamento, sendo gerada de forma a garantir um custo computacional viável sem comprometer a estabilidade da simulação.

A Tabela 2 apresenta as principais informações estruturais da malha do volume de controle, incluindo o número total de nós e elementos. Os elementos gerados são predominantemente tetraédricos, garantindo flexibilidade na adaptação ao domínio computacional.

Tabela 2 – Características gerais da malha do volume de controle

Parâmetro	Valor
Número de nós	6.135
Número de elementos (tetraédricos)	32.888

A qualidade da malha foi avaliada com base nos parâmetros de assimetria, razão de aspecto, qualidade ortogonal e qualidade dos elementos. Os valores médios desses parâmetros estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Métricas de qualidade da malha do volume de controle (valores médios)

Parâmetro	Valor Médio
Assimetria (<i>Skewness</i>)	0,24044
Razão de Aspecto (<i>Aspect Ratio</i>)	1,8639
Qualidade ortogonal (<i>Orthogonal Quality</i>)	0,7584

Os valores médios indicam que a malha apresenta qualidade aceitável para a simulação, conforme os critérios estabelecidos na literatura (FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2002; VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Para ilustrar a distribuição dos elementos no domínio computacional, a Figura 9 apresenta a malha utilizada para o volume de controle. Nota-se que a ausência de refinamento na esteira pode impactar a precisão na captura dos gradientes de velocidade e pressão, o que reforça a importância de estudos futuros voltados à otimização dessa região.

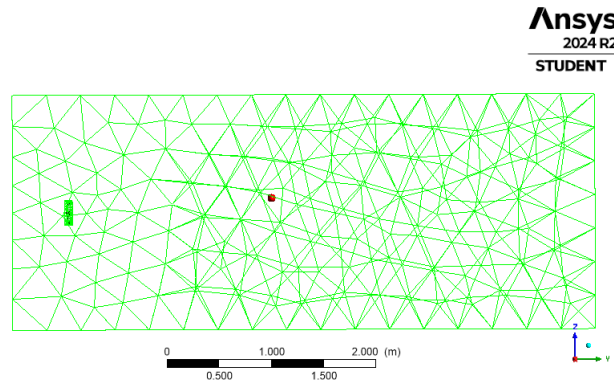


Figura 9 – Malha do volume de controle utilizada na simulação.

6.4 Estudo de Sensibilidade e Convergência da Malha

A influência da malha nos resultados numéricos é um aspecto crítico em estudos de Dinâmica dos Fluidos Computacional. Para assegurar a confiabilidade das soluções obtidas, é essencial verificar a convergência da malha e avaliar a sensibilidade dos resultados em relação ao refinamento adotado. Esta seção descreve a abordagem utilizada nos estudos de convergência e sensibilidade da malha, considerando um conjunto de 31 malhas progressivamente refinadas.

6.4.1 Estudo de Convergência da Malha

O estudo de convergência da malha tem como objetivo avaliar se a solução numérica obtida se aproxima de um valor assintótico à medida que a malha é refinada (FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2002). Para isso, analisa-se a variação do coeficiente de potência (C_p) ao longo do refinamento das 31 malhas geradas.

A convergência é avaliada a partir da análise da estabilidade dos valores de C_p conforme a resolução da malha aumenta. Espera-se que, à medida que a malha se torna mais refinada, as variações entre refinamentos sucessivos diminuam, indicando que a solução está convergindo para um valor independente da malha (ROACHE, 1998). Caso os valores apresentem oscilações significativas pode ser um indicativo de que a malha ainda não é suficientemente refinada para capturar corretamente os fenômenos físicos do escoamento.

Fatores como o refinamento inadequado da camada limite podem impactar a convergência da solução. Embora o parâmetro adimensional y^+ tenha sido obtido, ele não foi utilizado como critério base para o refinamento da malha. A correta resolução da camada limite é um fator relevante para garantir que os gradientes de velocidade próximos às pás sejam bem representados (MENTER, 1994).

6.4.2 Estudo de Sensibilidade da Malha

O estudo de sensibilidade da malha busca quantificar o impacto das variações no refinamento sobre os resultados numéricos (CELIK, 2008). Essa análise é fundamental para avaliar a influência da discretização e determinar a necessidade de refinamentos adicionais ou ajustes nos parâmetros de modelagem.

A sensibilidade é analisada comparando-se as variações no coeficiente de potência (C_p) entre malhas consecutivas e verificando como pequenas mudanças no refinamento influenciam os resultados globais e locais (PATANKAR, 1980). Se as soluções apresentarem grandes discrepâncias entre malhas, isso indica que o escoamento é sensível à discretização e que refinamentos adicionais podem ser necessários para garantir maior confiabilidade nos resultados.

Com base nesses estudos, é possível determinar a malha mais apropriada para a simulação, equilibrando precisão e custo computacional (ROACHE, 1998). Os critérios adotados para avaliar a adequação das malhas foram:

- Qualidade da Malha - análise de assimetria, razão de aspecto e qualidade ortogonal (ANSYS, 2021).
- Custo Computacional - avaliação do tempo de processamento em relação ao nível de refinamento, garantindo um compromisso entre eficiência e precisão dos resultados.

6.5 Configuração da Simulação e Condições de Contorno

A correta definição das condições de contorno e da configuração da simulação é essencial para garantir a fidelidade dos resultados da análise numérica, reduzindo incertezas e aproximando os valores obtidos daqueles esperados experimentalmente. Para a simulação da turbina HK10, foram adotadas condições de contorno compatíveis com a literatura de Dinâmica dos Fluidos Computacional (FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2002; VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007), assegurando uma modelagem adequada do escoamento ao redor da turbina.

6.5.1 Domínio Computacional

O domínio computacional foi definido de forma a minimizar efeitos indesejados das fronteiras sobre o escoamento, como recirculações artificiais e reflexões de onda. O volume de controle foi estruturado considerando diretrizes propostas na literatura (MENDES, 2020), sendo composto por:

- **Entrada do escoamento** - posicionada a 3 diâmetros $3D$ à montante da turbina, garantindo um escoamento bem desenvolvido antes de atingir a região de interesse.
- **Saída do escoamento** - localizada a 27 diâmetros $27D$ à jusante, permitindo o desenvolvimento adequado da esteira aerodinâmica antes de atingir a fronteira de saída.
- **Paredes laterais e superior** - situadas a 4 diâmetros $4D$ da turbina, reduzindo a interferência das fronteiras no escoamento.
- **Região de refinamento local** - aplicada nas proximidades das pás para capturar gradientes acentuados de velocidade e pressão com maior precisão.

A Figura 10 apresenta a turbina em meio ao domínio computacional adotado que foi descrito nos itens anteriormente listados.

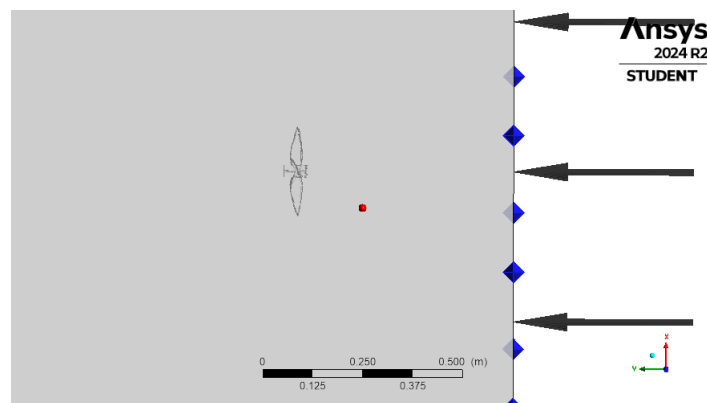


Figura 10 – Turbina no interior do domínio computacional adotado.

6.5.2 Condições de Contorno

As condições de contorno foram definidas de forma a representar um escoamento realista ao redor da turbina, considerando sua operação em ambiente atmosférico:

6.5.2.1 Entrada do Escoamento (*Inlet*)

A entrada do domínio foi modelada como uma entrada de velocidade (*velocity inlet*), com velocidade média determinada a partir da razão de velocidade de ponta (*Tip*

Speed Ratio - TSR). Essa abordagem é comum em estudos de turbinas eólicas e permite uma melhor caracterização do regime de escoamento (BURTON et al., 2011).

- Velocidade de entrada (V_∞) - correspondente ao valor necessário para atingir o TSR desejado que no caso aqui apresentado é de $8m/s$, onde o fluido de operação é o ar.
- Perfil de turbulência na entrada - definido a partir de um valor de 1% de intensidade de turbulência, conforme recomendação de (POPE, 2000).

6.5.2.2 Saída do Escoamento (*Outlet*)

A condição de saída foi definida como pressão ambiente, assumindo pressão relativa zero ($p = 0$ Pa). Essa escolha evita reflexões artificiais na saída, garantindo que o escoamento se desenvolva naturalmente antes de deixar o domínio (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

6.5.2.3 Superfícies Laterais

As fronteiras laterais foram tratadas como paredes impenetráveis de forma a evitar a formação de camadas limites que poderiam influenciar nos resultados. (FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2002).

6.5.2.4 Pás da Turbina

O escoamento foi modelado em regime permanente, e o movimento rotativo das pás foi modelado pela técnica *Frozen Rotor* que permite uma análise eficiente das interações aerodinâmicas no domínio rotativo.

6.5.3 Modelagem do Escoamento e Configuração da Simulação

A formulação adotada baseia-se nas equações de Navier-Stokes médias de Reynolds (RANS), utilizando o modelo de turbulência *Shear Stress Transport (SST)*, amplamente empregado em aplicações aerodinâmicas devido à sua capacidade de capturar efeitos de separação e gradientes acentuados de velocidade (MENTER, 1994; WILCOX, 2006).

A Figura 11 contempla o domínio computacional mostrando suas condições de contorno conforme a descrição realizada nesta seção.

6.5.4 Configuração do Solver

A simulação foi conduzida utilizando o solver de fluxo incompressível estacionário baseado na formulação de volumes finitos, com os seguintes parâmetros:

- Modelo de turbulência - RANS - SST

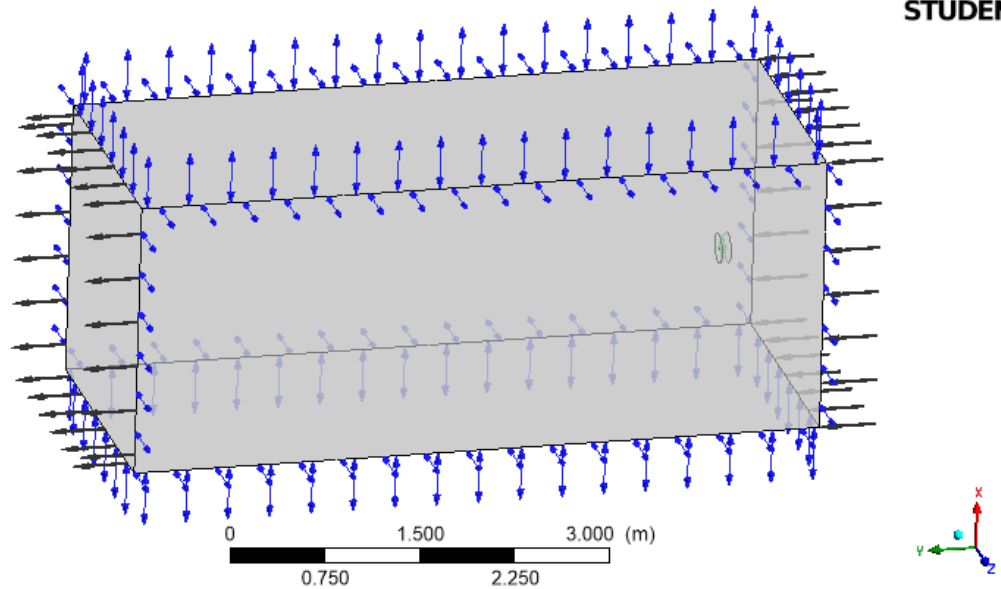


Figura 11 – Turbina no interior do domínio computacional adotado.

- Esquema de discretização - primeira ordem para termos advectivos.

Essa configuração visa garantir que os resultados obtidos sejam confiáveis e representativos da física do problema, possibilitando uma análise precisa do desempenho aerodinâmico da turbina HK10.

7 Resultados e discussões

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das simulações numéricas realizadas para a turbina HK10 em escala reduzida.

As simulações numéricas realizadas neste estudo foram executadas ao longo de 248 horas de processamento, utilizando uma máquina com a seguinte configuração:

- Processador Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHz, 1800 MHz, 4 núcleos e 8 processadores lógicos;
- Memória RAM de 16,0 GB;
- SSD para o armazenamento de 512 GB

Esta configuração possibilitou o processamento eficiente das várias malhas utilizadas nas simulações.

O objetivo principal deste estudo foi avaliar a influência do refinamento da malha na estimativa do coeficiente de potência (C_p), garantindo que os resultados obtidos estivessem dentro de uma margem de erro aceitável em relação ao valor de referência apresentado (MENDES, 2020). Vale destacar que, segundo a referência experimental, o C_p máximo da turbina na escala 1:10 foi de $0,254 \pm 0,007$. Contudo, é importante observar que os resultados obtidos neste estudo tendem a ser maiores, uma vez que a simulação não levou em consideração a haste da turbina, um componente presente na análise experimental.

A seguir, são apresentadas as curvas C_p x TSR obtidas a partir das simulações. Foram geradas 31 malhas distintas, com variação *body sizing* em incrementos de 0,1 mm, no intervalo de 2mm a 5mm. As Figuras 12, 13 e 14 reúnem todas as curvas em um único gráfico, permitindo uma análise mais clara das diferenças entre elas, enquanto que a Figura 15 exibe as curvas individualmente para cada malha.

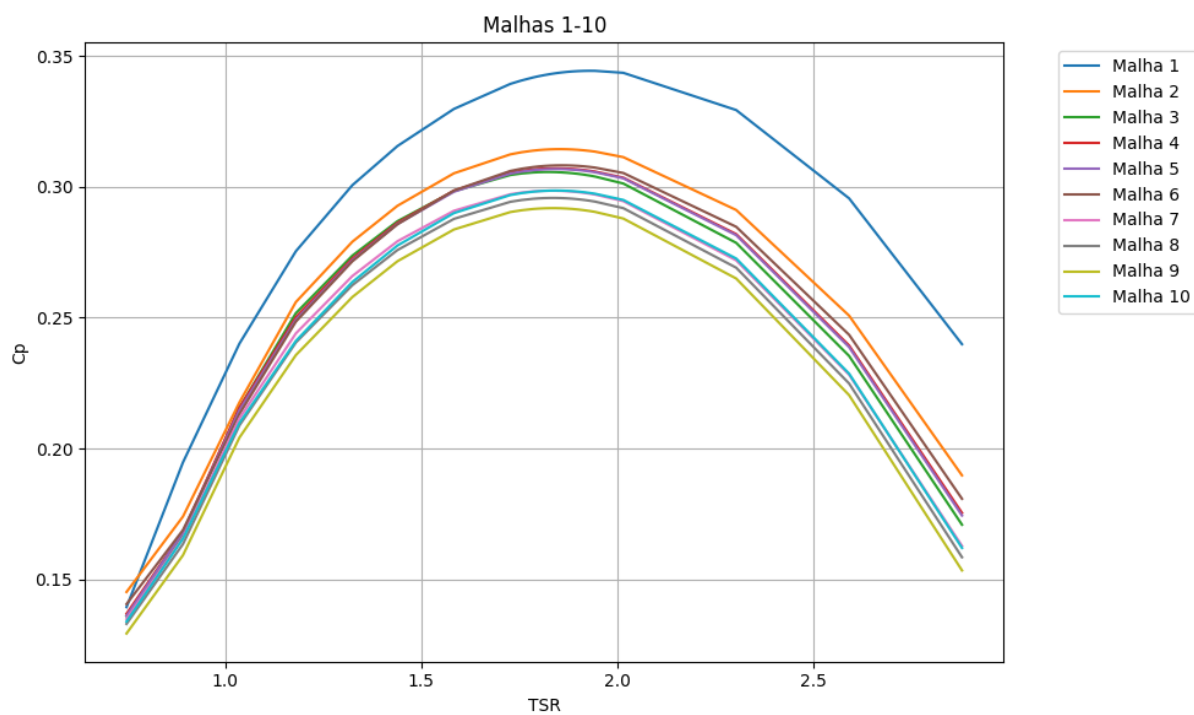


Figura 12 – Convergência de Malha - Malhas 1 - 10.

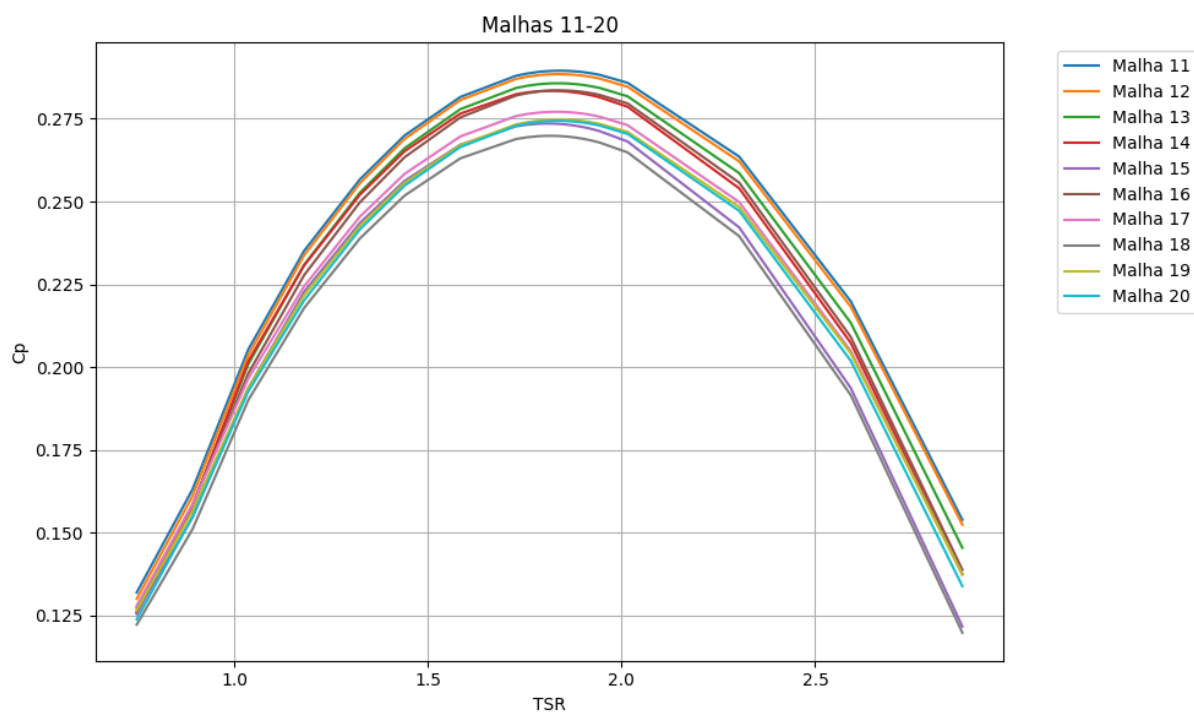


Figura 13 – Convergência de Malha - Malhas 11 - 20.

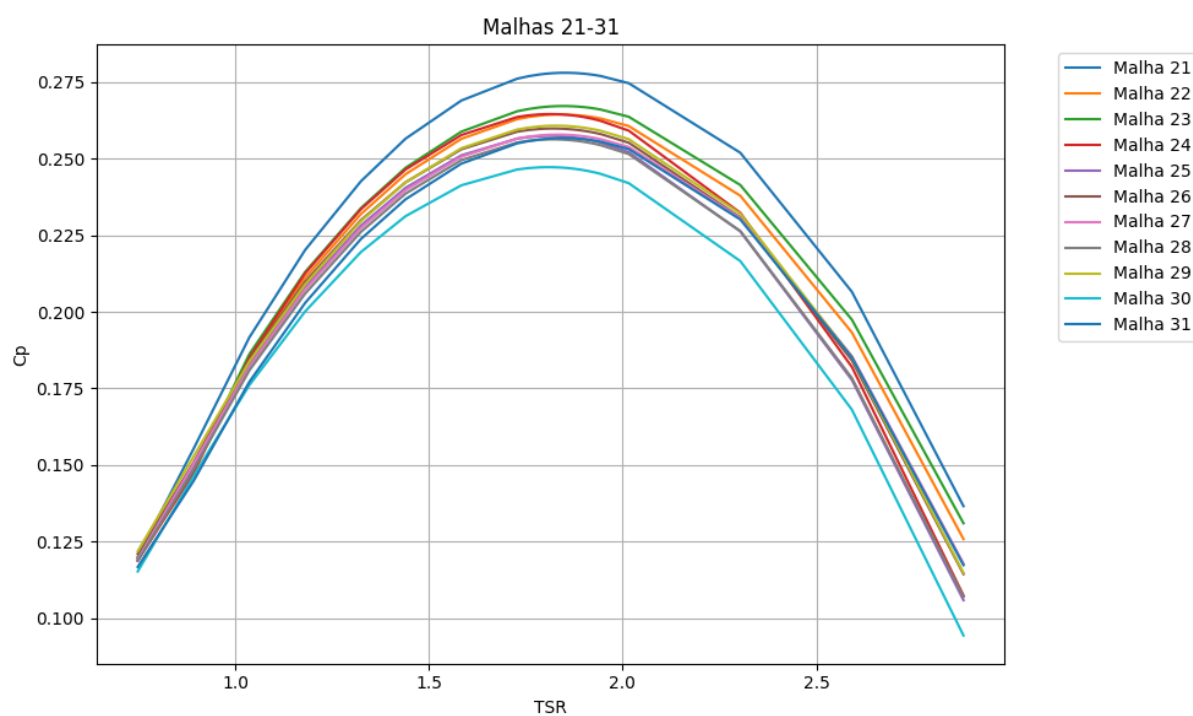


Figura 14 – Convergência de Malha - Malhas 21 - 31.

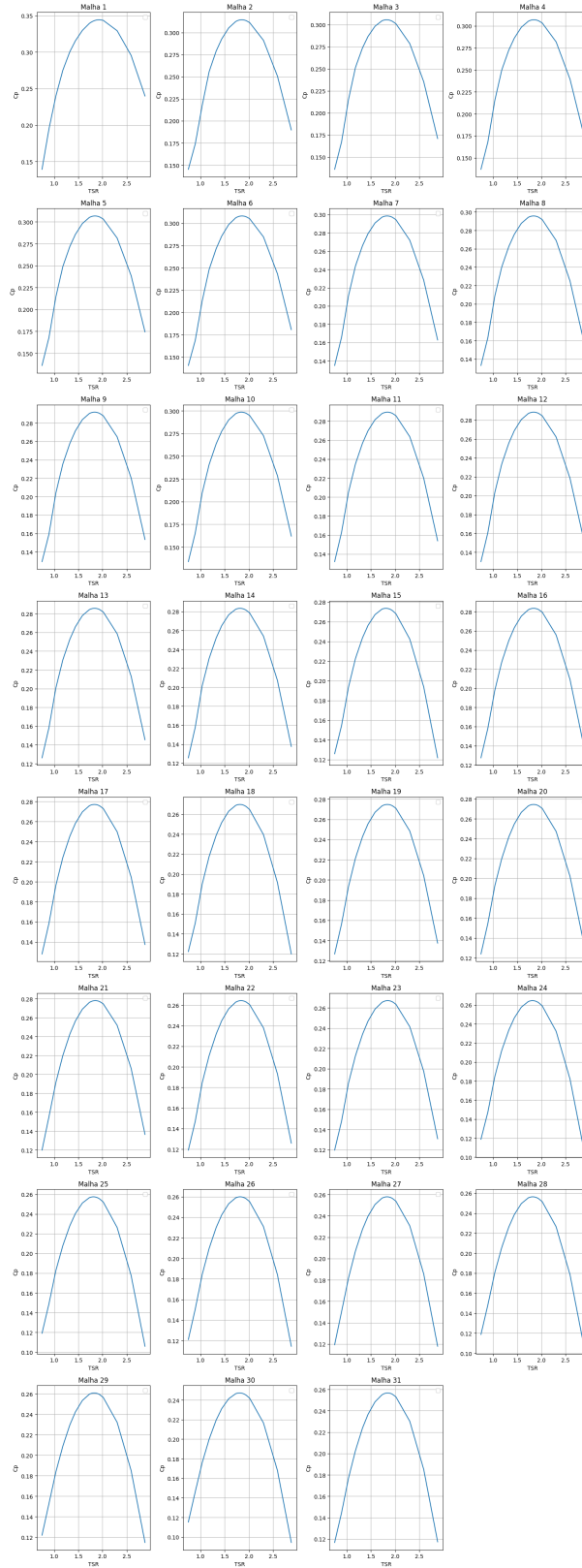


Figura 15 – Curvas do Coeficiente de Potência para cada *Tip Speed Ratio* em visualização unificada.

Para facilitar a percepção dos valores apresentados nas figuras 12, 13, 14 e 15, a tabela 4 irá apresentar os valores obtidos para cada malha de *body sizing*, número de

elementos, nós e o coeficiente de potência máxima para cada uma das malhas.

Tabela 4 – Tabela de Malhas e suas características

Malha	<i>Body Sizing</i> (mm)	Nós	Elementos	C_p max
1	2.0	959859	5577143	0.344285
2	2.1	826124	4791558	0.314366
3	2.2	732260	4243771	0.305629
4	2.3	632485	3659388	0.307023
5	2.4	568365	3274483	0.306743
6	2.5	504047	2907954	0.308181
7	2.6	437197	2516293	0.298488
8	2.7	392147	2252903	0.295717
9	2.8	352221	2021698	0.291818
10	2.9	316940	1814119	0.298535
11	3.0	284466	1626946	0.289512
12	3.1	266728	1524989	0.288482
13	3.2	243185	1383251	0.285720
14	3.3	216974	1236203	0.283438
15	3.4	196443	1115615	0.273564
16	3.5	187226	1059543	0.283587
17	3.6	167487	949295	0.277110
18	3.7	158818	899552	0.269857
19	3.8	145028	815877	0.274752
20	3.9	137902	774609	0.274361
21	4.0	123459	695619	0.278027
22	4.1	117867	663203	0.264413
23	4.2	106673	598410	0.267176
24	4.3	103051	575396	0.264556
25	4.4	91909	514180	0.257422
26	4.5	87836	491257	0.259839
27	4.6	84038	469709	0.257852
28	4.7	76383	424818	0.256307
29	4.8	74053	410368	0.260755
30	4.9	71342	394126	0.247233
31	5.0	63215	350426	0.256709

Para garantir que os resultados estão dentro de uma margem aceitável, foram analisados três aspectos principais: (i) a convergência da malha, por meio da variação do erro percentual entre as diferentes configurações; (ii) o erro do C_p máximo em relação ao valor esperado; e (iii) a sensibilidade da malha, avaliando a relação entre o refinamento e a estabilização dos resultados. Além disso, discute-se a relação entre o C_p e a razão de velocidade de ponta (TSR) para diferentes configurações de malha.

A simulação numérica de turbinas requer a definição de uma malha adequada para garantir a precisão dos resultados. Este estudo investiga a relação entre o refinamento da malha e a precisão do coeficiente de potência (C_p), comparando os valores obtidos com a

referência experimental de $C_p = 0,254 \pm 007$ (MENDES, 2020). Como resultante observa-se a Figura 16 que ilustra as observações obtidas neste estudo. A relação entre as malhas e o coeficiente de potência máximo traz uma correlação entre o refinamento da malha.

Em complemento à Tabela 4, a Figura 16 apresenta de maneira gráfica a variação do coeficiente de potência máximo em função de diferentes malhas utilizadas nas simulações, permitindo observar de maneira mais visual as oscilações dos valores ao longo das mudanças de malha aplicadas no trabalho.

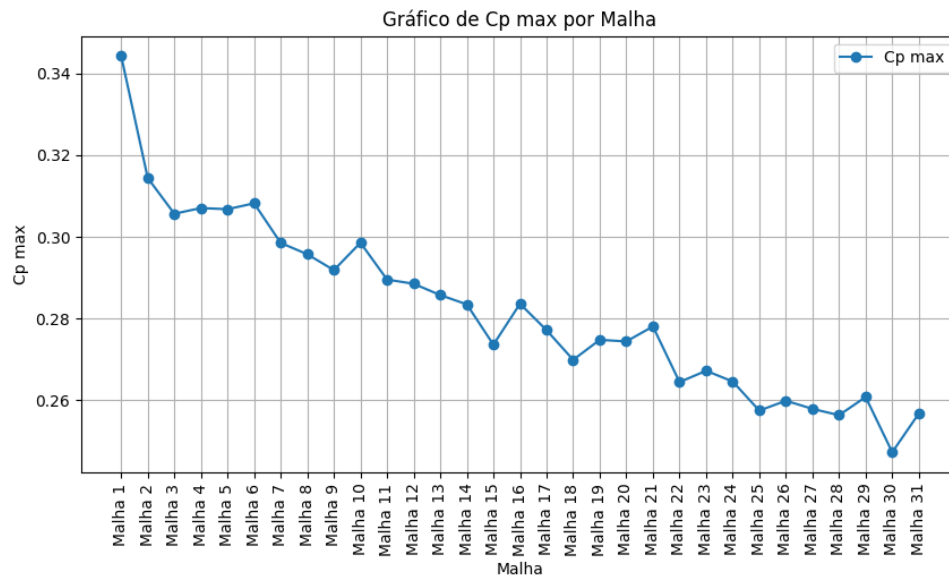


Figura 16 – Gráfico de Coeficiente de Potência máximo com relação a malha.

Ao analisar a Figura 16 e a Tabela 4, é possível observar que as malhas 1 e 2, as mais refinadas, apresentaram os maiores valores de C_p , na casa de 0,3. Essa tendência sugere uma forte influência do refinamento da malha no valor do coeficiente de potência. Além disso, percebe-se a presença de pequenas oscilações no gráfico, principalmente entre as malhas 10 e 20. Esse comportamento, evidencia uma relação inversamente proporcional entre o elemento de malha e o C_p calculado, reforçando a importância de um refinamento adequado.

Vale destacar que as malhas menos refinadas que já estão na faixa de valores de C_p obtidos experimentalmente em túnel de vento (MENDES, 2020), sugerem uma aproximação aos resultados reais. No entanto devido à ausência da haste da turbina nas simulações realizadas neste estudo, espera-se que os resultados do coeficiente de potência obtidos aqui sejam, em termos gerais, superiores aos valores experimentais.

De modo geral, os resultados apresentados na Tabela 4 e o comportamento observado na Figura 16 são consistentes, evidenciando que o refinamento da malha impacta significativamente o valor do C_p . Isso confirma a sensibilidade do coeficiente de potência em relação ao tipo e ao grau de refinamento da malha, destacando a importância do ajuste

adequado desses parâmetros para garantir a precisão dos resultados.

7.1 Análise da Qualidade da Malha

A qualidade da malha é um fator crucial na precisão das simulações numéricas, especialmente em problemas de Dinâmica dos Fluidos Computacional. Uma malha de alta qualidade assegura que os resultados da simulação sejam confiáveis e representem com precisão o comportamento físico do sistema em estudo.

A Tabela 5 apresenta os valores de três métricas importantes para a avaliação da qualidade da malha: assimetria média, razão de aspecto média e a qualidade ortogonal média dos elementos.

A assimetria mede o desvio da forma de um elemento da malha em relação a um elemento ideal (equilátero ou cúbico) (ANSYS, 2024b). Valores baixos de assimetria indicam elementos mais regulares, enquanto valores altos indicam elementos distorcidos. Para garantir a precisão dos resultados, recomenda-se que a assimetria média da malha seja inferior a 0,2, com valores ainda mais restritos sendo necessários em regiões críticas, como próximas a superfície da turbina.

A razão de aspecto é a relação entre a maior e a menor dimensão de um elemento da malha (ANSYS, 2024b). Valores elevados de razão de aspecto indicam elementos alongados, o que pode levar a erros na interpolação e dificultar a convergência da solução numérica.

A qualidade ortogonal é uma métrica normalizada entre 0 e 1, sendo que valores mais altos indicam elementos bem configurados para o cálculo numérico. Em geral, recomenda-se que a qualidade ortogonal média da malha seja superior a 0,8 para garantir resultados confiáveis (ANSYS, 2024b).

Os resultados da Tabela 5 mostraram que, para todas as configurações de malha, a assimetria média é inferior a 0,2, o que indica uma boa qualidade geral da malha (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Além disso, a razão de aspecto variou entre 1,1715 e 1,6623, valores considerados aceitáveis para o estudo da turbina em questão. A qualidade ortogonal média foi superior a 0,8, o que sugere que os elementos apresentam boa conformidade geométrica, permitindo a utilização das malhas nas análises subsequentes.

Tabela 5 – Qualidade da Malha para Diferentes Refinamentos

Malha	Assimetria Média	Razão de Aspecto Média	Qualidade Ortogonal Média
1	0.088573	1.5946	0.91131
2	0.090232	1.5983	0.90963
3	0.094975	1.6077	0.90487
4	0.091866	1.6009	0.90801
5	0.096087	1.6121	0.90370
6	0.101700	1.6215	0.89809
7	0.094945	1.6074	0.90490
8	0.096377	1.6103	0.90345
9	0.097571	1.6124	0.90226
10	0.080478	1.6140	0.90161
11	0.100070	1.1715	0.89973
12	0.107880	1.6337	0.89187
13	0.105560	1.6322	0.89410
14	0.103150	1.6231	0.89665
15	0.105400	1.6287	0.89434
16	0.109230	1.6395	0.89043
17	0.106030	1.6288	0.89376
18	0.115420	1.6484	0.88447
19	0.108870	1.6356	0.89086
20	0.118490	1.6545	0.88118
21	0.097744	1.6384	0.88881
22	0.119600	1.6567	0.88008
23	0.114750	1.6469	0.88495
24	0.119760	1.6603	0.87988
25	0.115930	1.6490	0.88377
26	0.118320	1.6537	0.88137
27	0.127750	1.6731	0.89353
28	0.120010	1.6569	0.87966
29	0.124030	1.6701	0.87548
30	0.132160	1.6814	0.86746
31	0.123000	1.6623	0.87668

7.1.1 Análise do Parâmetro y^+

O parâmetro adimensional y^+ é essencial para a modelagem adequada da camada limite em simulações CFD, uma vez que influencia diretamente a precisão da resolução dos efeitos viscosos nas proximidades das superfícies da turbina (POPE, 2000). No caso do modelo de turbulência *Shear Stress Transport* (SST), utilizado neste estudo, é recomendado que o valor de y^+ esteja na faixa de 1 a 5 para garantir a captura correta da camada limite sem a necessidade de funções de parede (MENTER, 1994).

A Tabela 6 apresenta os valores de y^+ obtidos para diferentes refinamentos da malha.

Tabela 6 – Valores de $y+$ para Diferentes Refinamentos

Malha	<i>Body Sizing</i> (mm)	$y+$
1	2.0	34.6989
2	2.1	32.1214
3	2.2	34.4167
4	2.3	37.9122
5	2.4	38.7016
6	2.5	41.1760
7	2.6	49.6637
8	2.7	44.1021
9	2.8	42.3265
10	2.9	45.9864
11	3.0	42.1727
12	3.1	46.1586
13	3.2	45.7811
14	3.3	46.7352
15	3.4	47.9493
16	3.5	52.1031
17	3.6	53.8941
18	3.7	49.3368
19	3.8	51.7109
20	3.9	52.2054
21	4.0	53.3988
22	4.1	53.0378
23	4.2	55.7477
24	4.3	53.5790
25	4.4	58.3649
26	4.5	57.1213
27	4.6	58.8382
28	4.7	64.7526
29	4.8	59.7173
30	4.9	63.8478
31	5.0	62.7872

Os resultados mostram que há uma redução significativa de aproximadamente 50% nos valores de $y+$ entre a malha menos refinada (*Body Sizing* = 5.0; $y+$ = 62.7872) e a mais refinada (*Body Sizing* = 2.0; $y+$ = 34.6989). Esse comportamento é esperado, pois o refinamento da malha reduz a altura da primeira camada de elementos junto à superfície, permitindo uma melhor resolução da camada limite (FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2002).

Entretanto, mesmo com essa redução, os valores obtidos ainda se encontram acima da faixa recomendada de 1 a 5, indicando que o refinamento realizado não foi suficiente para capturar com precisão os efeitos viscosos da camada limite sem o uso de funções de parede. Para atingir essa faixa ideal, seria necessário um refinamento ainda maior na região próxima à superfície da turbina. No entanto, esse aumento no refinamento poderia elevar consideravelmente o custo computacional, tornando necessário um compromisso entre a

precisão dos resultados e a viabilidade da simulação (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Dessa forma, para futuras análises, recomenda-se a adoção de uma análise mais aprofundada do comportamento do $y+$, de tal forma que permita um controle mais preciso da espessura da primeira camada de elementos na malha, reduzindo $y+$ (WILCOX, 2006).

7.2 Convergência e Sensibilidade da Malha

A análise de convergência e sensibilidade da malha foi realizada para verificar a influência do refinamento na estimativa do coeficiente de potência (C_p). Os resultados foram interpretados com base no erro percentual entre as diferentes malhas, além de observar a tendência do C_p máximo em relação ao valor de referência da literatura.

A Tabela 7 apresenta a evolução do refinamento da malha, destacando o número de elementos e nós, o valor máximo de C_p obtido, os erros relativos em relação à malha imediatamente anterior e os erros experimentais, que são calculados com base no valor de referência de $C_p = 0,254 \pm 007$.

A tabela 7 apresenta os resultados da análise de convergência da malha para diferentes níveis de refinamento, com intuito de avaliar como o tamanho dos elementos afeta a precisão do cálculo do coeficiente de potência máximo (C_p) da turbina HK10. A análise foi conduzida variando o parâmetro *body sizing* que controla o tamanho dos elementos mais próximos à superfície da turbina, de $2.0mm$ (malha mais refinada) a $5.0mm$ (malha menos refinada).

Observa-se que, à medida que o *body sizing* aumenta (resultando em um número menor de nós e elementos), o valor do coeficiente de potência máximo tende a diminuir. Esse comportamento é consistente com a teoria, que sugere que o refinamento da malha é fundamental para capturar com precisão os fenômenos aerodinâmicos complexos em torno da turbina (ANDERSON, 1995).

Além disso, os erros relativos em relação à malha anterior aumentam conforme o *body sizing* se torna maior. No entanto, os valores de erro experimental tendem a crescer com o refinamento da malha, um fenômeno que pode ser atribuído à ausência da consideração da haste da turbina no modelo de simulação.

7.2.1 Erro Percentual entre Malhas

A Figura 17 apresenta o erro percentual da malha atual com relação a malha imediatamente anterior. O gráfico mostra que em geral o erro percentual do C_p diminui à medida que o número de elementos da malha aumenta.

Tabela 7 – Evolução da Convergência da Malha.

<i>Body Sizing</i> (mm)	Nós	Elementos	C_p Max	Erro Relativo	Erro Experimental
2.0	959859	5577143	0.3443	-	35.55%
2.1	826124	4791558	0.3144	8.69%	23.77%
2.2	732260	4243771	0.3056	2.78%	20.33%
2.3	632485	3659388	0.3070	0.46%	20.88%
2.4	568365	3274483	0.3067	0.09%	20.76%
2.5	504047	2907954	0.3082	0.47%	21.33%
2.6	437197	2516293	0.2985	3.15%	17.51%
2.7	392147	2252903	0.2957	0.93%	16.42%
2.8	352221	2021698	0.2918	1.32%	14.89%
2.9	316940	1814119	0.2985	2.30%	17.53%
3.0	284466	1626946	0.2895	3.02%	13.98%
3.1	266728	1524989	0.2885	0.36%	13.58%
3.2	243185	1383251	0.2857	0.96%	12.49%
3.3	216974	1236203	0.2834	0.80%	11.59%
3.4	196443	1115615	0.2736	3.48%	7.70%
3.5	187226	1059543	0.2836	3.66%	11.65%
3.6	167487	949295	0.2771	2.28%	9.10%
3.7	158818	899552	0.2699	2.62%	6.24%
3.8	145028	815877	0.2748	1.81%	8.17%
3.9	137902	774609	0.2744	0.14%	8.02%
4.0	123459	695619	0.2780	1.34%	9.46%
4.1	117867	663203	0.2644	4.90%	4.10%
4.2	106673	598410	0.2672	1.04%	5.19%
4.3	103051	575396	0.2646	0.98%	4.16%
4.4	91909	514180	0.2574	2.70%	1.35%
4.5	87836	491257	0.2598	0.94%	2.30%
4.6	84038	469709	0.2579	0.76%	1.52%
4.7	76383	424818	0.2563	0.60%	0.91%
4.8	74053	410368	0.2608	1.74%	2.66%
4.9	71342	394126	0.2472	5.19%	2.66%
5.0	63215	350426	0.2567	3.83%	1.07%

A partir de 10^6 elementos, a curva de erro confere uma estabilidade, indicando que as malhas estão entrando em uma região de convergência. No entanto, percebe-se que a curva de erro não é suave apresentando flutuações que pode ser pelos efeitos numéricos e pelas características da modelagem, o uso do *Patch Independent* pode ter trazido essas inconsistências por não levar em consideração a complexidade da geometria.

7.2.2 Erro do C_p Máximo em Relação ao Valor de Referência

A Figura 18 apresenta a evolução do erro percentual do C_p máximo obtido em relação ao valor de referência da literatura ($C_p = 0,254 \pm 007$), em função do número de elementos das malhas utilizadas nas simulações numéricas aqui apresentadas.

Observa-se que, de maneira clara, o erro tende a aumentar à medida que o número

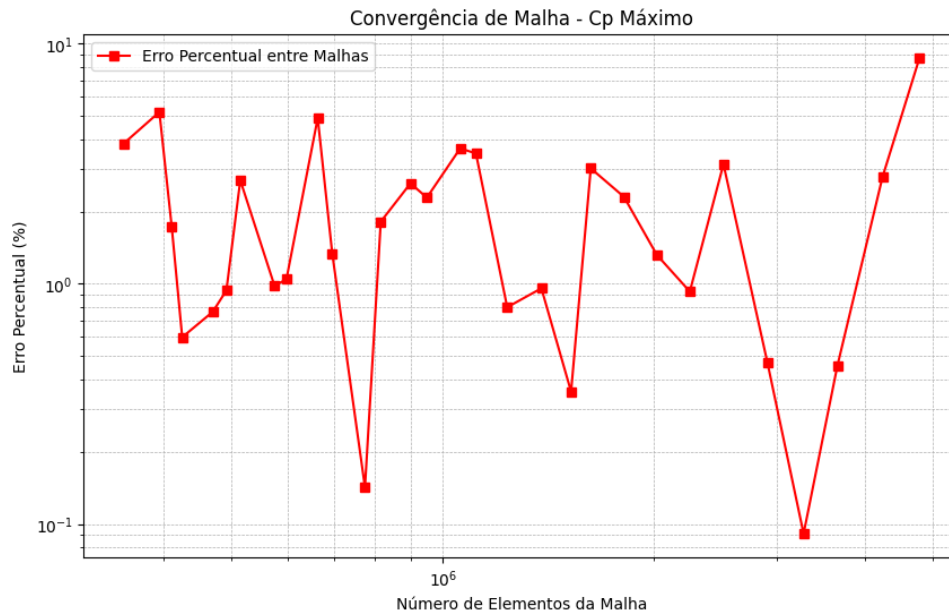


Figura 17 – Convergência de Malha - Erro Percentual entre Malhas.

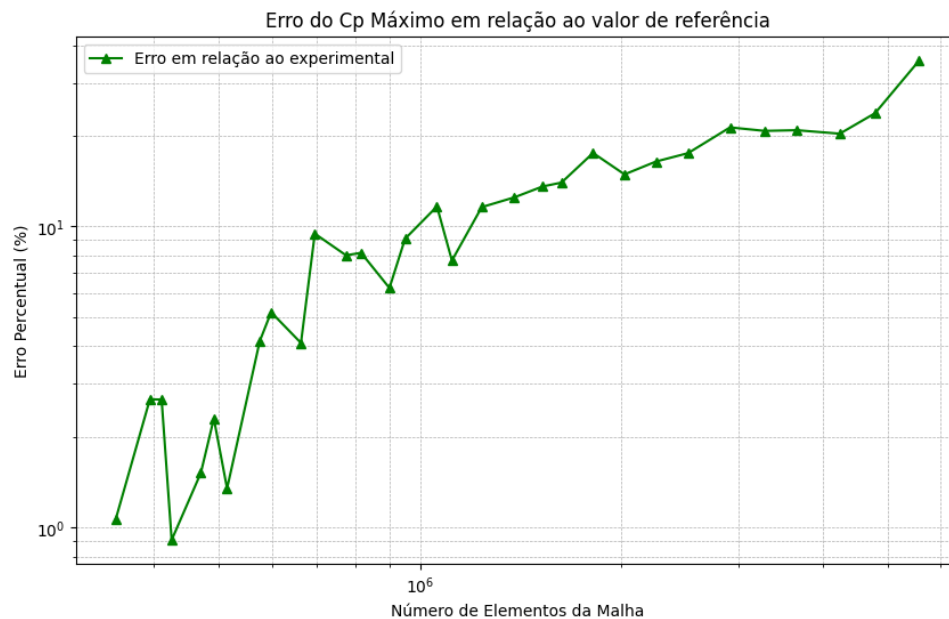


Figura 18 – Erro do C_p Máximo em Relação ao Valor de Referência.

de elementos da malha cresce. Isso indica que o refinamento da malha resulta em valores de C_p mais distantes do valor de referência. Como já discutido anteriormente, esse comportamento está fortemente relacionado ao fato de a turbina estar sendo simulada sem a haste, o que provoca uma redução no valor máximo de C_p devido ao impacto dessa parte da geometria. Além disso, vale destacar que ocorre uma diminuição do valor do y^+ , o que indica que ele se aproxima mais das características de uma camada limite, podendo influenciar os resultados de C_p .

Assim como no gráfico anterior, observa-se que, a partir de 10^6 elementos a curva de erro traz o indicativo de estar entrando em uma região de convergência. A partir desse ponto, um aumento adicional no número de malha não deveria gerar melhorias significativas na precisão do coeficiente de potência, especialmente quando se considera o aumento do custo computacional associado ao refinamento da malha.

7.2.3 Sensibilidade da Malha

A Figura 19 apresenta a evolução do C_p máximo em função do número de elementos da malha. Ao analisar a sensibilidade do coeficiente de potência C_p em função do aumento do número de elementos na malha, observa-se uma tendência clara: à medida que o número de elementos cresce, o valor de C_p também aumenta. Esse comportamento sugere uma relação direta entre o refinamento da malha e a precisão na captura dos fenômenos aerodinâmicos ao redor da turbina.

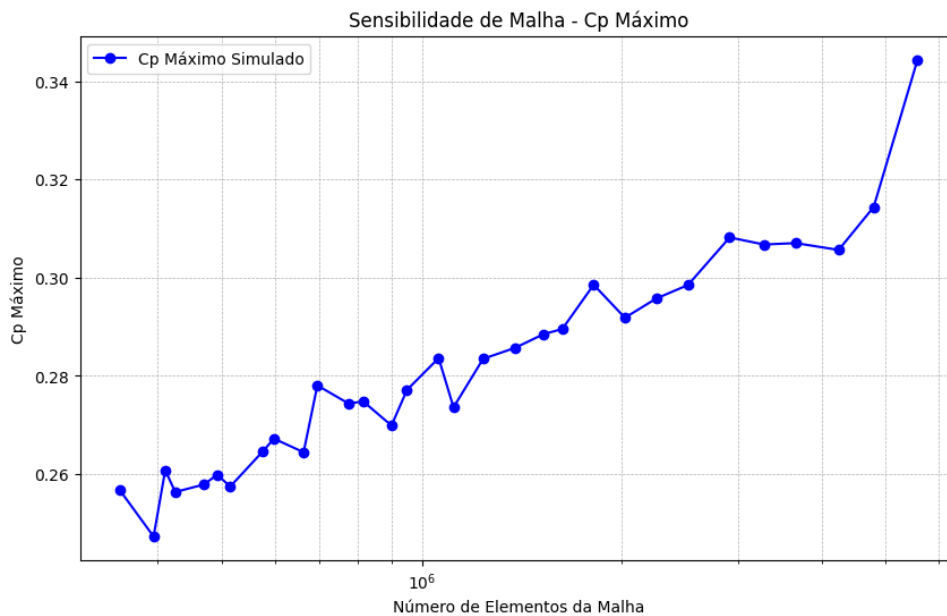


Figura 19 – Sensibilidade da Malha - C_p Máximo.

O aumento do número de elementos pode resultar em uma representação mais detalhada da geometria da turbina e dos fluxos de ar, o que, teoricamente, permite uma modelagem mais precisa dos efeitos de viscosidade e turbulência. Esse refinamento possibilita uma melhor resolução da camada limite e dos gradientes de pressão próximos à superfície da turbina, áreas cruciais para a determinação do C_p máximo.

Entretanto, essa sensibilidade também aponta para uma possível sobrestimação do valor de C_p à medida que a malha se refina excessivamente, uma vez que a resolução adicional pode não refletir mais fielmente o comportamento real da turbina sem a haste. Esse fenômeno é reforçado pela observação de que, com o aumento do número de

elementos, o erro relativo entre as malhas anteriores tende a aumentar, afastando-se do valor de referência. Esse comportamento sugere que, além de considerar a precisão da malha, outros fatores, como a presença de partes essenciais da geometria (como a haste da turbina), devem ser levados em conta para evitar distorções nos resultados.

Portanto, a análise de sensibilidade indica que, embora o aumento do número de elementos na malha proporcione um maior valor de C_p , é importante considerar que a convergência ideal não se dá apenas pelo refinamento contínuo da malha. Existe um ponto em que a adição de elementos não traz mais ganhos significativos na precisão do coeficiente de potência, sendo mais vantajoso, do ponto de vista computacional, manter um número de elementos que balanceie a precisão e o custo computacional.

7.3 Discussão dos Resultados e Possíveis Melhorias

Os resultados obtidos demonstram que o refinamento progressivo da malha influencia significativamente o coeficiente de potência (C_p), indicando que a resolução da malha tem um papel crucial na precisão da simulação. No entanto, diferentemente do esperado, o refinamento não levou à convergência dos valores de C_p para o valor de referência experimental, $C_p = 0,254 \pm 007$. Essa discrepância pode ser explicada, em parte, pelo fato de que o valor experimental inclui os efeitos da haste da turbina, um elemento estrutural ausente na modelagem numérica utilizada. Quando se considera o C_p máximo da turbina em escala real (1:1), o valor esperado é de 0,39 de acordo com (MENDES, 2020), o que reforça a necessidade de uma avaliação criteriosa sobre as diferenças entre os cenários numérico e experimental.

Apesar de não atingir a convergência para o valor experimental, a análise das malhas mostra uma tendência de redução dos valores de y^+ com o refinamento da malha. Esse comportamento é esperado, uma vez que células menores na região da camada limite proporcionam uma melhor resolução dos gradientes de velocidade e, consequentemente, impactam a modelagem da turbulência (MENTER, 1994). Entretanto, mesmo nas malhas mais refinadas, os valores de y^+ permanecem acima da faixa ideal para a correta aplicação do modelo de turbulência SST, sugerindo que a representação dos efeitos viscosos do escoamento pode ainda não estar suficientemente precisa.

Além disso, o refinamento progressivo da malha impactou diretamente o comportamento do C_p , evidenciando a sensibilidade desse parâmetro à qualidade da malha. No entanto, as malhas mais refinadas não resultaram necessariamente em uma melhoria significativa na precisão dos resultados em comparação com as malhas intermediárias. Considerando o custo computacional associado ao refinamento, observa-se que as malhas menos refinadas já fornecem um compromisso adequado entre acurácia e eficiência computacional, o que é um fator essencial em estudos de engenharia aplicada.

7.3.1 Possíveis Fontes de Erro

Um dos principais fatores que podem ter contribuído para a diferença entre os valores simulados e experimentais está relacionado à influência da haste da turbina na simulação em túnel de vento. A presença desse elemento modifica o escoamento na região anterior às pás da turbina, alterando a distribuição da velocidade relativa e, consequentemente, o desempenho aerodinâmico da máquina. Como o modelo numérico não inclui essa estrutura, é possível que parte da discrepância observada seja resultado dessa diferença geométrica entre os casos.

Outro aspecto relevante é o refinamento da malha na região de esteira da turbina. A esteira aerodinâmica é caracterizada por intensos gradientes de velocidade e estruturas turbulentas complexas, cuja dissipação de energia influencia diretamente o desempenho da turbina e a distribuição do C_p . Em simulações numéricas, a qualidade da malha nessa região é determinante para a correta captura dos vórtices desprendidos das pás e do comportamento global do escoamento. Se a resolução espacial na esteira for insuficiente, a dissipação numérica pode suavizar essas estruturas turbulentas, reduzindo artificialmente a interação entre os vórtices e comprometendo a fidelidade dos resultados (POPE, 2000). Isso pode explicar, em parte, a tendência de aumento do erro experimental do C_p máximo nas malhas mais refinadas, já que um refinamento inadequado da região de esteira pode levar a uma perda de energia no escoamento simulada de forma não física.

Além do refinamento da malha, a escolha dos esquemas numéricos para a solução das equações governantes também exerce um impacto significativo nos resultados. Esquemas de primeira ordem são mais dissipativos e podem suavizar gradientes de velocidade, enquanto esquemas de ordem superior melhoram a precisão, mas podem introduzir oscilações espúrias se não forem bem controlados (FERZIGER; PERIĆ; STREET, 2002). A escolha inadequada desses esquemas pode comprometer a captura dos fenômenos físicos envolvidos e contribuir para as discrepâncias observadas entre os valores simulados e experimentais.

7.3.2 Influência do Refinamento da Malha na Modelagem da Turbulência

A modelagem da turbulência na região da camada limite é outro fator que pode estar influenciando os resultados. Como os valores de y^+ obtidos ainda estão acima da faixa ideal, mesmo nas malhas mais refinadas, é possível que a interação entre a camada limite e o escoamento principal não esteja sendo representada com precisão suficiente. Modelos de turbulência baseados em equações de fechamento, como o SST, dependem da correta aplicação das funções de parede para capturar os efeitos viscosos em escoamentos turbulentos (MENTER, 1994). Se a malha não estiver adequadamente refinada para que essas funções sejam aplicadas corretamente, os resultados podem ser afetados, comprometendo a estimativa do C_p .

Além disso, como mencionado anteriormente, a região da esteira aerodinâmica apresenta uma elevada complexidade devido à presença de estruturas turbulentas de grande escala. Se a malha não for suficientemente refinada para capturar esses fenômenos, a dissipação numérica pode afetar a modelagem da separação e da dissipação da energia cinética turbulenta. Isso sugere que um refinamento localizado na região posterior às pás da turbina poderia melhorar a precisão da simulação, garantindo uma modelagem mais fiel da dissipação energética e da interação entre os vórtices (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

7.4 Conclusão

Os resultados apresentados evidenciam que o refinamento da malha tem um impacto direto sobre o coeficiente de potência da turbina, mas não levou à convergência dos valores simulados para o referencial experimental, como observado na Figura 17. A análise dos valores de $y+$ demonstra que, apesar da redução progressiva com o refinamento da malha, ainda há uma limitação na correta modelagem da camada limite, como observado na Tabela 6. Além disso, a ausência da haste da turbina na simulação pode ser uma das razões para a diferença entre os valores simulados e os obtidos em túnel de vento.

A relação entre custo computacional e qualidade dos resultados mostra que malhas menos refinadas já oferecem um desempenho razoável, como observado na Figura 18, reforçando a necessidade de um refinamento criterioso que leve em conta a eficiência da simulação. Um aprimoramento da discretização na região da esteira aerodinâmica pode contribuir para uma melhor representação da dissipação energética e das interações turbulentas, reduzindo a influência da dissipação numérica sobre os resultados do C_p .

Dessa forma, recomenda-se que estudos futuros explorem a inclusão da haste da turbina na modelagem geométrica para avaliar sua influência na distribuição do escoamento. Além disso, um refinamento localizado na região da esteira, aliado a ajustes na modelagem da turbulência, pode contribuir para uma melhoria na fidelidade dos resultados, garantindo uma representação mais precisa dos fenômenos aerodinâmicos envolvidos.

8 Considerações finais

Neste trabalho, foi realizado um estudo sobre a influência do refinamento de malha na estimativa do coeficiente de potência (C_p) de uma turbina de eixo horizontal, utilizando simulações numéricas no software *Ansys CFX*. O principal objetivo foi avaliar a correlação entre o nível de refinamento da malha e a precisão dos resultados, buscando garantir que os valores obtidos estivessem dentro de uma margem aceitável em relação aos valores de referência disponíveis na literatura.

Os resultados obtidos demonstraram que o refinamento da malha tem um impacto significativo sobre os valores estimados para o coeficiente de potência, evidenciando a sensibilidade do modelo numérico à discretização espacial. A análise da convergência da malha indicou que, embora a redução do tamanho dos elementos tenha levado a uma maior estabilidade nos resultados, os valores de C_p não convergiram para o referencial experimental disponível ($C_p = 0,254 \pm 007$). Essa diferença pode ser explicada, em parte, pela ausência da haste da turbina na modelagem numérica, um componente presente no experimento em túnel de vento e que influencia diretamente o escoamento e o não refinamento da região de esteira da simulação.

Além disso, a análise da qualidade da malha foi conduzida com base em métricas como assimetria, razão de aspecto e a qualidade ortogonal, garantindo que a malha gerada estivesse dentro dos padrões recomendados para simulações CFD. Entretanto, observou-se que o uso do método *Patch Independent* pode ter introduzido variações na curva de erro, sugerindo que outras estratégias de geração de malha podem ser exploradas para obter uma distribuição mais uniforme dos elementos e minimizar a dissipação numérica.

Um fator adicional que se mostrou relevante ao longo da análise foi o comportamento da variável adimensional y^+ , amplamente utilizada para avaliar a adequação da malha na captura dos efeitos da camada limite turbulenta (MENTER, 1994). Conforme esperado, observou-se uma tendência de redução de y^+ com o refinamento da malha, indicando um maior detalhamento na região próxima às pás da turbina. No entanto, mesmo nas malhas mais refinadas, os valores de y^+ ainda permaneceram distantes da faixa ideal para a correta aplicação do modelo de turbulência SST. Essa limitação pode ter impactado diretamente a precisão dos resultados, uma vez que as funções de parede utilizadas para modelar a interação entre a camada limite e o escoamento podem não ter sido aplicadas em sua faixa ótima de validade. Assim, é recomendável que futuros estudos aprofundem a análise da resolução da camada limite, garantindo que os valores de y^+ estejam adequados ao regime de escoamento modelado.

Outro aspecto relevante identificado foi a influência do refinamento da malha na

região da esteira da turbina. Observou-se que, em malhas mais grosseiras, a dissipação numérica pode ter levado a uma subestimação dos efeitos aerodinâmicos na esteira, resultando em uma menor extração de potência. Dessa forma, um refinamento localizado da malha nessa região pode ser uma estratégia eficiente para melhorar a resolução das estruturas turbulentas, sem comprometer excessivamente o custo computacional da simulação.

Apesar da coerência geral dos resultados, algumas discrepâncias indicam a presença de possíveis fontes de erro, as quais podem ser exploradas em estudos futuros. Entre elas, destacam-se:

- A influência do modelo de turbulência escolhido, que pode impactar a precisão da estimativa de C_p devido às limitações associadas à modelagem da camada limite e ao fechamento das equações de Reynolds;
- O impacto da discretização numérica e das condições de contorno na estabilidade da solução, uma vez que diferentes esquemas de interpolação e técnicas de solução podem alterar a representação do escoamento;
- A necessidade de um refinamento localizado da malha na região de esteira, visando melhorar a resolução das estruturas turbulentas e reduzir a dissipação numérica;
- A inadequação dos valores de y^+ , pode indicar a necessidade de ajustes no refinamento próximo às superfícies sólidas da turbina.

Dessa forma, este estudo contribui para o entendimento da influência do refinamento da malha na simulação de turbinas de fluxo livre, fornecendo diretrizes para a escolha de configurações que garantam um equilíbrio entre precisão e custo computacional. Para trabalhos futuros, sugere-se a exploração de diferentes modelos de turbulência, a implementação de técnicas de refinamento adaptativo e a realização de estudos de análise de sensibilidade para quantificar a influência de cada parâmetro sobre os resultados. Além disso, a inclusão da haste da turbina na modelagem pode representar um avanço na fidelidade da simulação, permitindo uma comparação mais direta com os dados experimentais disponíveis.

Referências

- ANDERSON, J. Fundamentals of aerodynamics. In: *Aeronautical and Aerospace Engineering Series*. [S.l.: s.n.], 2001. Citado na página 23.
- ANDERSON, J. D. *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. [S.l.], 1995. Citado 5 vezes nas páginas 27, 34, 35, 36 e 57.
- ANSYS. *Ansys CFX-Solver Theory Guide*. [S.l.], 2021. Citado 3 vezes nas páginas 36, 38 e 44.
- ANSYS. *ANSYS CFX-Solver Modeling Guide*. Canonsburg, Pennsylvania, USA, 2024. Disponível em: <https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=//Views/Secured/corp/v242/en/cfx_mod/cfx_mod.html>. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 40.
- ANSYS. *ANSYS Meshing User Guide*. Canonsburg, Pennsylvania, USA, 2024. Disponível em: <https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=//Views/Secured/corp/v242/en/wb_msh/msh_book_wb.html>. Citado na página 54.
- BETZ, A. Das maximum der theoretisch möglichen ausnutzung des windes durch windmotoren. *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen*, v. 26, p. 307–309, 1920. Citado na página 31.
- BURTON, T. et al. *Wind Energy Handbook*. [S.l.], 2011. Citado 5 vezes nas páginas 16, 19, 32, 33 e 46.
- CELIK, I. B. *Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications*. [S.l.], 2008. v. 130. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.2960953>>. Citado na página 44.
- CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações*. [S.l.], 2018. Citado 3 vezes nas páginas 19, 22 e 24.
- EASA., E. U. A. S. A. "Drones eVTOL Designs.". [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/drones-evtol-designs>>. Citado na página 16.
- FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M.; STREET, R. L. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 4. ed. Switzerland: Springer Cham, 2002. XVIII, 596 p. ISBN 978-3-319-99693-6. Citado 9 vezes nas páginas 34, 35, 38, 42, 43, 44, 46, 56 e 62.
- GUIMARÃES, P. V.; SILVA, T. R.; OLIVEIRA, M. J. Aerodynamic optimization of free-flow turbines for urban applications. In: *Journal of Aerospace Engineering*, 35(1), 50-65. [S.l.: s.n.], 2021. Citado na página 20.
- HEIER, S. *Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems*. [S.l.], 2014. Citado na página 20.

- LAUNDER, B. E.; REECE, G. J.; RODI, W. *Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure*. [S.l.], 1975. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/S0022112075001814>>. Citado na página 26.
- MAIO, M. D. et al. *Wind Tunnel Testing and Aerodynamic Characterization of a QuadPlane Uncrewed Aircraft System*. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/direct-numerical-simulation-of-turbulent-flow-in-pipes-with-realistic-large-roughness-at-the-wall/726303C37EA0B878C4ABBB791FC95A70>>. Citado na página 25.
- MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. [S.l.], 2010. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- MENDES, R. C. F. *Interação entre Esteiras Aerodinâmicas de Turbinas de Eixo Horizontal em Arranjos*. [S.l.], 2020. Citado 8 vezes nas páginas 16, 20, 21, 38, 45, 48, 53 e 61.
- MENTER, F. R. *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications*. [S.l.], 1994. Disponível em: <<https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.12149>>. Citado 9 vezes nas páginas 26, 27, 38, 44, 46, 55, 61, 62 e 64.
- MOSER, C. A.; MEDEIROS, M. A.; SILVESTRINI, J. H. *Computação do Ruído Irrradiado por um Jato Subsônico Usando uma Metodologia Implícita para Simulação de Grandes Escalas*. [S.l.], 2013. Disponível em: <<https://repositorio.pucrs.br/dspace/handle/10923/12567>>. Citado na página 25.
- PATANKAR, S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. [S.l.], 1980. Citado na página 44.
- POPE, S. B. *Turbulent Flows*. [S.l.], 2000. Citado 6 vezes nas páginas 24, 25, 27, 46, 55 e 62.
- ROACHE, P. *Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies*. [S.l.], 1998. v. 36, 696–702 p. Disponível em: <<https://doi.org/10.2514/2.457>>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.
- SAGAUT, P. *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows*. [S.l.], 2006. Citado na página 25.
- SPARLAT, P. R.; ATKINS, E. *A one-equation turbulence model for aerodynamic Flows*. [S.l.], 1994. Disponível em: <https://turbmodels.larc.nasa.gov/Papers/RechAerosp_1994_SpalartAllmaras.pdf>. Citado na página 26.
- SØRENSEN, J. N. *Aerodynamic Aspects of Wind Energy Conversion*. [S.l.], 2015. Citado na página 16.
- VERMEER, L.; SØRENSEN, J.; CRESPO, A. Wind turbine wake aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, v. 39, n. 6-7, p. 467–510, 2003. Citado na página 33.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. [S.l.], 2007. Citado 11 vezes nas páginas 16, 34, 35, 37, 38, 42, 44, 46, 54, 57 e 63.

WHITE, F. M. *Mecânica dos Fluidos*. [S.l.], 2018. Citado 4 vezes nas páginas 19, 22, 23 e 24.

WILCOX, D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. [S.l.], 2006. Citado 8 vezes nas páginas 24, 25, 26, 27, 34, 38, 46 e 57.

Anexos

ANEXO A – Primeiro Anexo

A.1 Código para gerar o gráfico de C_p vs TSR dividido em três grupos

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

file_path = 'cpxtsr.xlsx'
df = pd.read_excel(file_path, index_col=0)

malhas_10 = df.index[:10]
malhas_20 = df.index[10:20]
malhas_31 = df.index[20:]

def criar_figura(malhas, titulo, nome_arquivo):
    plt.figure(figsize=(10, 6))
    for malha in malhas:
        plt.plot(df.columns, df.loc[malha], label=malha)
    plt.title(titulo)
    plt.xlabel('TSR')
    plt.ylabel('Cp')
    plt.grid(True)
    plt.legend(bbox_to_anchor=(1.05, 1), loc='upper left')
    plt.tight_layout()
    plt.show()
    plt.close()

criar_figura(malhas_10, 'Malhas 1-10', 'malhas_1_10.png')
criar_figura(malhas_20, 'Malhas 11-20', 'malhas_11_20.png')
criar_figura(malhas_31, 'Malhas 21-31', 'malhas_21_31.png')
```

A.2 Código para gerar os gráficos de C_p vs TSR de forma individual

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

file_path = 'cpxtsr.xlsx'

df = pd.read_excel(file_path, index_col=0)

num_malhas = len(df.index)
ncols = 4
nrows = (num_malhas // ncols) + (num_malhas % ncols != 0)

fig, axes = plt.subplots(nrows, ncols, figsize=(15, 5 * nrows))

plt.tight_layout()

for i in range(num_malhas, nrows * ncols):
    fig.delaxes(axes.flatten()[i])

for i, (malha, ax) in enumerate(zip(df.index, axes.flatten())):
    ax.plot(df.columns, df.loc[malha])
    ax.set_title(f'{malha}')
    ax.set_xlabel('TSR')
    ax.set_ylabel('Cp')
    ax.grid(True)

    ax.legend()

plt.tight_layout()
plt.show()
```

ANEXO B – Segundo Anexo

B.1 Código para análise de convergência e sensibilidade de malha

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

arquivo = "elementosecp.xlsx"
df = pd.read_excel(arquivo)

num_elementos = df["Elements"].values
cp_max = df["Cp max"].values

cp_ref = 0.254

erro_percentual_malha = np.abs(np.diff(cp_max) / cp_max[:-1]) * 100

erro_referencia = np.abs((cp_max - cp_ref) / cp_ref) * 100

### Sensibilidade de Malha
plt.figure(figsize=(10,6))
plt.plot(num_elementos, cp_max, marker='o', linestyle='--', color='b',
label="Cp Máximo Simulado")
plt.xscale('log')
plt.xlabel("Número de Elementos da Malha")
plt.ylabel("Cp Máximo")
plt.title("Sensibilidade de Malha - Cp Máximo")
plt.grid(True, which="both", linestyle="--", linewidth=0.5)
plt.legend()
plt.show()

### Convergência de Malha (Erro percentual)
plt.figure(figsize=(10,6))
plt.plot(num_elementos[1:], erro_percentual_malha, marker='s',
linestyle='--', color='r', label="Erro Percentual entre Malhas")
plt.xscale('log')
```

```

plt.yscale('log')
plt.xlabel("Número de Elementos da Malha")
plt.ylabel("Erro Percentual (%)")
plt.title("Convergência de Malha - Cp Máximo")
plt.grid(True, which="both", linestyle="--", linewidth=0.5)
plt.legend()
plt.show()

### Erro em relação ao valor de referência
plt.figure(figsize=(10,6))
plt.plot(num_elementos, erro_referencia, marker='^', linestyle='-', color='g',
label="Erro em relação a 0,39")
plt.xscale('log')
plt.yscale('log')
plt.xlabel("Número de Elementos da Malha")
plt.ylabel("Erro Percentual (%)")
plt.title("Erro do Cp Máximo em relação ao valor de referência")
plt.grid(True, which="both", linestyle="--", linewidth=0.5)
plt.legend()
plt.show()

r = num_elementos[1:] / num_elementos[:-1]
p = np.log(np.abs(np.diff(cp_max))) / np.log(r)

```

B.2 Código para análise de C_p por malha

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

file_path = "cpxmalha.xlsx"
df = pd.read_excel(file_path)

plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(df["Malha"], df["Cp max"], marker='o', linestyle='-', label="Cp max")

```

```
plt.xlabel("Malha")
plt.ylabel("Cp max")
plt.title("Gráfico de Cp max por Malha")
plt.xticks(rotation=90)
plt.legend()
plt.grid(True)

plt.show()
```