

**ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE A INFLUÊNCIA DA ALTURA DO  
ROTOR EM RELAÇÃO AO SOLO E A RUGOSIDADE DO TERRENO  
NO DESEMPENHO DE TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL**

**GUILHERME TABATINGA MEDEIROS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE INFLUENCE OF ROTOR  
HEIGHT IN RELATION TO THE GROUND AND TERRAIN  
ROUGHNESS ON THE PERFORMANCE OF HORIZONTAL AXIS  
TURBINES**

**GUILHERME TABATINGA MEDEIROS**

**ORIENTADOR: Taygoara Felamingo de Oliveira, Dr.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS  
MECÂNICAS**

**PUBLICAÇÃO: PCMEC.TD-001/11**

**BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO - 2023**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE A INFLUÊNCIA DA ALTURA DO  
ROTOR EM RELAÇÃO AO SOLO E A RUGOSIDADE DO TERRENO  
NO DESEMPENHO DE TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL**

**GUILHERME TABATINGA MEDEIROS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Dr. Jerson Rogério Pinheiro Vaz – ENM/Universidade Federal do Pará  
Membro Externo à Instituição**

---

**Prof. Dr. Rafael Castilho Faria Mendes – FGA/Universidade de Brasília  
Membro Externo ao Programa**

---

**Prof. Dr. Taygoara Felamingo de Oliveira – ENM/Universidade de Brasília  
Orientador**

**BRASÍLIA, 17 DE FEVEREIRO DE 2023.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

MEDEIROS, GUILHERME

Estudo experimental sobre a influência da altura do rotor em relação ao solo e a rugosidade do terreno no desempenho de turbinas de eixo horizontal [Distrito Federal] 2023.

xiii, 79p., 210 x 297 mm (EME/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2023).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica

1. Turbinas de eixo horizontal

2. Altura da torre

3. Rugosidade do terreno

4. Anemometria de fio quente

I. EME/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MEDEIROS, G. (2023). Estudo experimental sobre a influência da altura do rotor em relação ao solo e a rugosidade do terreno no desempenho de turbinas de eixo horizontal . Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação PCMEC.TD-001/11, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 79p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Guilherme Tabatinga Medeiros

TÍTULO: Estudo experimental sobre a influência da altura do rotor em relação ao solo e a rugosidade do terreno no desempenho de turbinas de eixo horizontal .

GRAU: Mestre ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Guilherme Tabatinga Medeiros

Departamento de Engenharia Mecânica (EME) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

*Dedico este trabalho às pessoas que acreditaram, que fizeram parte e que apoiaram a minha trajetória.*

## ACKNOWLEDGMENTS

*Agradeço a Deus pelo dom da vida, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades impostas até aqui e por ter me proporcionado momentos de muita satisfação no decorrer da minha formação.*

*A minha esposa, Ana Luiza, que, com seu admirável jeito de viver a vida, me proporcionou momentos ímpares nessa trajetória, sendo a principal responsável por me dar uma diretriz em vários momentos difíceis, apoiando-me e aconselhando-me nas minhas principais decisões. Também a minha família, pelo apoio incondicional aos meus projetos, no qual, mesmo em meio a tantas dificuldades, me incentivaram a correr em busca dos meus sonhos.*

*Agradeço ao professor Taygoara Felamingo pelos prazerosos momentos de incentivo e intensos conhecimentos divididos, no qual, com muita sabedoria e maestria, instruiu-me na tentativa de tornar-me um pesquisador melhor, e ao professor Antonio Brasil, pelas catedráticas aulas e seus conselhos pontuais e certos.*

*Agradeço ao constante suporte dos meus companheiros de laboratório Rafael, Reginaldo, Matheus e Ramiro, que, com enorme paciência, ajudaram-me com os infinitos problemas relacionados a experimentação e incentivaram-me a persistir. Não poderia deixar de mencionar os inúmeros momentos engrandecedores de cafezinhos e almoços divididos com meus colegas de laboratório Wesly, Marcela, Isadora, Tainara, Hugo, Miguel, Eugênia, Edgar e muitos outros que passaram na minha vida e tornaram a trajetória mais suave.*

*Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Serra do Facão Energia S.A. por fornecer apoio financeiro para o desenvolvimento desse trabalho. E por fim, mas não menos importante, agradeço ao professor Sanderson Macedo, que, em meio a pandemia, confiou-me o projeto mecânico do primeiro protótipo de ventilador pulmonar desenvolvido pela UnB, aproveitando e reconhecendo minhas habilidades de projetista pesquisador.*

## RESUMO

Nos escoamentos através de turbinas eólicas de eixo horizontal, dois elementos que afetam as condições de conversão de energia são a altura do rotor em relação ao solo e a rugosidade do terreno. O presente trabalho apresenta um estudo experimental sobre a influência desses dois fatores na curva de potência de modelos em escala reduzida de turbinas de eixo horizontal. Os experimentos foram realizados no túnel de vento do Laboratório de Energia e Ambiente da UnB. São avaliadas três alturas diferentes e duas condições de rugosidade da superfície da seção de testes. A técnica de anemometria de fio quente é utilizada para determinar o perfil de velocidade longitudinal média e intensidade de turbulência em regiões específicas de interesse no escoamento. Para simular um terreno rugoso, correntes foram instaladas sobre a superfície originalmente lisa da seção de testes do túnel. Observou-se que, para a superfície lisa, existe a influência simultânea de dois mecanismos concorrentes em relação à geração de potência pelo rotor: o confinamento parcial do escoamento, observado à medida que o rotor se aproxima da superfície, com tendência de elevar o coeficiente de potência; e o déficit de velocidade média na camada limite sobre a superfície do túnel, que tende a reduzir o coeficiente de potência. Identificou-se que quando a altura da turbina é próxima da mínima altura possível em relação à superfície, o confinamento parcial do escoamento eleva a velocidade média através do rotor, resultando em um expressivo aumento do coeficiente de potência, em comparação ao caso em que a turbina está livre da influência do solo. Por outro lado, em alturas intermediárias, o déficit de velocidade do escoamento na camada limite prevalece e uma redução do coeficiente de potência é observada. O estudo considerando uma superfície rugosa indicou que a rugosidade pode alterar de maneira significativa a dinâmica observada na situação em que a superfície é lisa. Quando há rugosidade, a elevação de potência para o caso com menor altura não foi observada nos mesmos níveis. Todos os resultados são discutidos em articulação com os campos de velocidade média e intensidade de turbulência do escoamento a montante e a jusante do rotor. Conclui-se, do presente estudo, que o uso de turbinas eólicas com torres muito altas, para isolar o rotor da influência do terreno, não é necessariamente vantajosa, quando apenas a geração de energia é considerada.

**Palavras-chave:** Turbinas de eixo horizontal, Altura da torre, Rugosidade do terreno, Anemometria de fio quente.

## **ABSTRACT**

In horizontal-axis wind turbines, two elements that influence energy conversion are the height of the rotor in relation to the ground and the roughness of the terrain. The present work presents an experimental study on the influence of these two factors on the power curve of small-scale models of horizontal axis turbines. The experiments were carried out in the wind tunnel of the Laboratory of Energy and Environment at UnB. Three different heights and two surface roughness conditions are evaluated. The hot wire anemometry technique is used to determine the mean longitudinal velocity and turbulence intensity in specific regions of interest in the flow. To simulate a rough terrain, chains were installed over the originally smooth surface of the wind tunnel test section. We have noticed that, for the smooth surface, two competing mechanisms which alter power generation by the rotor take place: the partial confinement of the flow, observed as the rotor approaches the surface, with a tendency to increase the power coefficient; and the velocity deficit in the boundary layer over the tunnel surface, which tends to reduce the power coefficient. It was identified that when the height of the turbine is close to the minimum possible height in relation to the surface, the partial confinement of the flow increases the average velocity through the rotor, resulting in an expressive power coefficient elevation, compared to the case in which the turbine is in the far field from the ground. On the other hand, at intermediary heights, the flow velocity deficit in the boundary layer overcame the flow confinement and leads to a reduction of the power coefficient. The study considering a rough ground surface indicated that roughness can significantly change the dynamics observed in a situation where the surface is smooth. When there is roughness, the power elevation observed for the case with lower height does not occur at the same levels. All results are discussed in conjunction with fields of flow average velocity and turbulence intensity upstream and downstream rotor. The present study leads to the conclusion that using very high towers to isolate the rotor from the ground's influence is not necessarily beneficial when only energy generation is considered.

**Keywords:** horizontal-axis turbines, tower height, ground roughness, hot-wire anemometry.

## SUMÁRIO

---

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
1.3	OBJETIVOS .....	10
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>11</b>
2.1	TURBULÊNCIA .....	11
2.1.1	DECOMPOSIÇÃO DE REYNOLDS .....	12
2.1.2	EQUAÇÕES MÉDIAS DE REYNOLDS .....	13
2.2	DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DE TURBULÊNCIA .....	16
2.2.1	MÉDIA .....	16
2.2.2	FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE .....	17
2.2.3	MOMENTOS ESTATÍSTICOS DE SEGUNDA ORDEM.....	18
2.2.4	MOMENTO ESTATÍSTICO DE TERCEIRA ORDEM .....	18
2.2.5	INTENSIDADE DE TURBULÊNCIA E ENERGIA CINÉTICA DE TURBULÊNCIA .....	19
2.3	DINÂMICA DE TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL.....	21
2.3.1	TEORIA DO DISCO ATUADOR .....	21
2.3.2	TEORIA DO MOMENTO ANGULAR.....	24
2.3.3	LIMITE DE BETZ .....	25
2.3.4	COEFICIENTE DE POTÊNCIA .....	26
2.3.5	ESTEIRA .....	27
2.3.6	CONFINAMENTO DE ROTORES E EFEITO DE BLOQUEIO .....	28
2.4	RUGOSIDADE .....	30
2.4.1	PARÂMETRO DE RUGOSIDADE MÉDIA (RA) .....	31
2.4.2	PARÂMETRO DE PROFUNDIDADE DA RUGOSIDADE (RT).....	31
2.4.3	PARÂMETRO DE ALTURA MÁXIMA (RZ) .....	31
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>33</b>
3.1	FLUXOGRAMA EXPERIMENTAL.....	33
3.2	BANCADA E INSTRUMENTOS.....	33
3.2.1	TÚNEL DE VENTO .....	33
3.2.2	MODELO DE TURBINA .....	35
3.2.2.1	CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO MODELO DE TURBINA.....	36
3.2.3	SUORTE DE AJUSTE DA ALTURA DA TORRE .....	37
3.2.4	POSICIONADOR DA Sonda .....	38

3.3 ANEMOMETRIA A FIO QUENTE .....	39
3.3.1 SONDA.....	40
3.4 PROCEDIMENTOS .....	42
3.4.1 ARRANJOS EXPERIMENTAIS .....	42
3.4.2 ENSAIO DO COEFICIENTE DE POTÊNCIA .....	44
3.4.3 COLETA DE DADOS DE VELOCIDADE .....	45
3.4.4 CALIBRAÇÃO DE VELOCIDADE .....	46
3.5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	48
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>50</b>
4.1 DESENVOLVIMENTO DA CAMADA LIMITE.....	50
4.2 RAZÃO DE BLOQUEIO (BR) .....	51
4.3 CARACTERIZAÇÃO DA RUGOSIDADE .....	52
4.4 ESCOAMENTO A MONTANTE .....	52
4.5 COEFICIENTE DE POTÊNCIA.....	54
4.6 ESCOAMENTO A JUSANTE SEM RUGOSIDADE .....	58
4.7 ESCOAMENTO A JUSANTE COM RUGOSIDADE .....	63
4.8 COMPARAÇÃO ENTRE OS ARRANJOS I E II.....	68
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>70</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>72</b>
<b>A APÊNDICE .....</b>	<b>79</b>
A.1 CÓDIGOS DE ANÁLISE E PROCESSAMENTO DISPONÍVEIS EM: .....	79
A.2 DADOS DE ANEMOMETRIA E $C_p$ DESTES TRABALHOS DISPONÍVEIS EM: .....	79
A.3 GRÁFICOS E FIGURAS QUE NÃO FORAM UTILIZADOS NO TEXTO:.....	79

## LISTA DE FIGURAS

---

1.1	Canal a jusante da Usina Hidrelétrica Serra do Facão em Catalão-GO.....	3
1.2	(a) Fotografias do túnel de vento com os modelos de rugosidade intermediária e densa; (b) dimensões básicas do modelo de aerogerador e da árvore; (c) visão lateral dos cenários; (d) vista de cima da disposição geométrica dos arranjos arbóreos. Retirado de Cheng et al.[1] .....	8
2.1	Esquemático da decomposição de Reynolds em um escoamento com direção preferencial adaptado de Tennekes e Lumley[2].....	13
2.2	Distribuição da densidade de probabilidade de uma senoide, modificado [2]. ..	17
2.3	Sinal de velocidade com assimetria positiva, modificado [2]. .....	19
2.4	Tubo de Corrente para uma turbina Fonte: Burton, Jenkins e Sharpe[3].....	21
2.5	Extração de energia do Disco atuador no tubo de corrente. Adaptado [3].....	22
2.6	Trajetória de uma partícula fluida passando através do disco atuador. Adaptado de Burton, Jenkins e Sharpe[3] .....	24
2.7	Distribuição espacial das regiões de esteira próxima, intermediária e distante. Adaptado [4].....	28
2.8	Disco atuador para turbinas confinadas em canais[5].....	29
2.9	Parâmetro de amplitude $R_a$ [6].....	31
2.10	Parâmetro de altura total $R_t$ [6]. .....	32
2.11	Parâmetro de altura máxima $R_z$ [6]. .....	32
3.1	Fluxograma de organização experimental. ....	33
3.2	Dimensões do túnel de vento do Laboratório de Energia e Ambiente da Faculdade de Tecnologia da UnB [7]. ....	34
3.3	Imagem do túnel de vento do LEA-UnB.....	34
3.4	Foto do rotor utilizado nos ensaios em túnel de vento desenvolvido por Junior et al.[8]. ....	35
3.5	Modelo em escala de aproximadamente 1/10 da turbina hidrocínética Hydro-K, unidades em mm. ....	36
3.6	Suporte para variar altura da torre apontado pela seta branca e ampliado em perspectiva.....	37
3.7	Dimensões do suporte para variar altura da torre. ....	38
3.8	Sistema Posicionador da Sonda dentro do Túnel. Adaptado de Mendes[9].....	39
3.9	Esquemático da cadeia de equipamentos para o sistema de aquisição. Adaptado [10], pg. 6. ....	40
3.10	Arranjos Uni, Bi e Tridimensionais de Sondas Fonte: [10] .....	41

3.11	Decomposição das componentes cartesianas de velocidades incidentes na sonda unidimensional. Fonte: [10].....	41
3.12	Procedimento de solda do filamento na sonda.....	42
3.13	Foto do arranjo 2 para uma posição $h_1$ mais próxima da superfície.....	43
3.14	Esquema da disposição das correntes no túnel de vento, com dimensões em milímetro. ....	44
3.15	Grade de pontos de aquisição do anemômetro para os arranjos experimentais (a) com superfície lisa e (b) com superfície rugosa. ....	45
3.16	Tubo de pitot (Esquerda) e manômetro de coluna inclinada (Direita) .....	46
3.17	Curva de calibração que o programa de calibração automaticamente produziu em um dos ensaios realizados neste trabalho. ....	48
4.1	Gráfico da estimativa da camada limite ao longo da seção de testes onde foram realizados os experimentos. O posicionamento do rotor foi indicado apenas como referência e não foi considerado na estimativa .....	51
4.2	Gráfico da análise dos dados de anemometria feitos a montante do rotor. $X/D = 0$ é a posição em que o rotor foi instalado e os valores negativos correspondem a pontos antes do rotor. (–) Perfil de velocidade.....	53
4.3	Gráfico da análise dos dados de anemometria feitos a montante do rotor para a superfície rugosa. $X/D = 0$ é a posição em que o rotor foi instalado e os valores negativos correspondem a pontos antes do rotor. (–) Perfil de velocidade. ....	54
4.4	Gráfico experimental da curva de coeficiente de potência para os arranjos em superfície lisa com a condição do rotor na altura $h_2$ . (–.–) Linha de tendência média. ....	55
4.5	Gráfico de coeficiente de potência para os arranjos em superfície lisa com as barras de erro na direção Y, o erro na direção X foi suprimido para uma melhor visualização. ....	56
4.6	Gráfico de coeficiente de potência para as alturas em superfície lisa. As barras de erro foram ocultadas com a intensão de melhor visualização e interpretação dos dados. ....	57
4.7	Gráfico de coeficiente de potência para as alturas em superfície rugosa. As barras de erro foram ocultadas com a intensão de melhor visualização e interpretação dos dados. ....	57
4.8	Gráfico de contorno de velocidade ( $U/U_\infty$ ) numa superfície lisa para altura $H1$ . (–.–) representa o eixo do rotor. O desenho do rotor é meramente ilustrativo com função de orientação.....	58

4.9	Gráfico de contorno de velocidade ( $U/U_\infty$ ) numa superfície lisa para altura H2. (—) representa o eixo do rotor. O desenho do rotor é meramente ilustrativo com função de orientação.....	59
4.10	Gráfico de perfis da posição $h_1$ a jusante com superfície lisa. $X/D = 0$ é a posição em que o rotor foi instalado e os valores positivos correspondem a pontos após o rotor. (—) Perfil de velocidade e (+) intensidade de turbulência.	60
4.11	Gráfico de perfis da posição $h_2$ a jusante com superfície lisa. $X/D = 0$ é a posição em que o rotor foi instalado e os valores positivos correspondem a pontos após o rotor. (—) Perfil de velocidade e (+) intensidade de turbulência.	61
4.12	Gráfico de intensidade de turbulência ( $\frac{\sigma_{u'}}{U}$ ) numa superfície lisa. (—) representa o eixo do rotor. O desenho do rotor é meramente ilustrativo com função de orientação.....	62
4.13	Gráfico de energia cinética turbulenta ( $\frac{u'^2}{2}$ ) numa superfície lisa. (—) representa o eixo do rotor. O desenho do rotor é meramente ilustrativo com função de orientação.....	62
4.14	Gráfico de contorno de velocidade ( $U/U_\infty$ ) numa superfície rugosa para altura H1. (—) representa o eixo do rotor. O desenho do rotor é meramente ilustrativo com função de orientação.....	63
4.15	Gráfico de contorno de velocidade ( $U/U_\infty$ ) numa superfície rugosa para altura H2. (—) representa o eixo do rotor. O desenho do rotor é meramente ilustrativo com função de orientação.....	64
4.16	Gráfico de perfis para $h_1$ a jusante com superfície rugosa. $X/D = 0$ é a posição em que o rotor foi instalado e os valores positivos correspondem a pontos após o rotor. (—) Perfil de velocidade e (+) intensidade de turbulência.	65
4.17	Gráfico de perfis para $h_2$ a jusante com superfície rugosa. $X/D = 0$ é a posição em que o rotor foi instalado e os valores positivos correspondem a pontos após o rotor. (—) Perfil de velocidade e (+) intensidade de turbulência.	66
4.18	Gráfico de intensidade de turbulência ( $\frac{\sigma_{u'}}{U}$ ) numa superfície rugosa. (—) representa o eixo do rotor. O desenho do rotor é meramente ilustrativo com função de orientação.....	67
4.19	Gráfico de energia cinética turbulenta ( $\frac{u'^2}{2}$ ) numa superfície rugosa. (—) representa o eixo do rotor. O desenho do rotor é meramente ilustrativo com função de orientação.....	67
4.20	Gráfico de $C_p$ vs TSR para os arranjos I e II na posição $h_1$ .	68
4.21	Gráfico de $C_p$ vs TSR para os arranjos I e II na posição $h_2$ .	69

## LISTA DE TABELAS

---

3.1	Características geométricas e condição de operação do modelo em escala e do protótipo real. ....	36
3.2	Alturas do eixo do rotor em relação a superfície.....	43
3.3	Parâmetros do plano de aquisição .....	46
4.1	Parâmetros de Rugosidade .....	52

# 1 INTRODUÇÃO

---

*Este capítulo apresenta a contextualização do problema, juntamente com a justificativa e a revisão bibliográfica sobre o tema. Estão presentes também os objetivos.*

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As contradições entre o crescente esgotamento dos combustíveis fósseis e demandas crescentes de energia começaram a se tornar agudas [11]. Provocou-se uma urgência entre os profissionais que se dedicam ao desenvolvimento de tecnologias ou políticas para o uso de fontes renováveis de energia para procurar recursos energéticos alternativos para atender às necessidades energéticas futuras. Uma pesquisa recente feita pela Organização dos Países Exploradores de Petróleo (OPEC[12]) relata aumento de 35% no consumo de energia primária até 2040, enquanto prevê um declínio considerável na produção de petróleo ao mesmo tempo [12]. A produção de energia por via convencional de usinas termelétricas deixam pegadas ambientais. Apesar deste fato, continuam sendo as principais contribuintes para a geração de energia mundial [12, 13, 14]. Espera-se que haja um crescimento da energia renovável limpa, abundante e sustentável, e domine o futuro do mercado de energia. Para tanto, a captação de energia através do vento tem se mostrado um potencial e espera-se que as instalações futuras cresçam a uma taxa de 5% ao ano [15].

No cenário de crise atual, está mais claro do que nunca que a dependência de combustíveis fósseis ainda é dominante em relação a outras fontes. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), em 2019, a participação na geração de energia a partir de combustíveis fósseis no mundo foi de 63,2 % do total de 26935,9 TWh produzidos [16]. A participação das fontes renováveis na geração global de eletricidade atingiu quase 29% em 2020, um aumento anual recorde de dois pontos percentuais [16]. No entanto, a menor demanda de eletricidade provocada pelo abrandamento da atividade econômica e da mobilidade da Covid-19 é uma das principais razões para este registro. No Brasil, em 2021, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a matriz energética apresentava-se como mais renovável do que a mundial [17], sendo que 48,4% do consumo de energia elétrica é de fontes renováveis contra a matriz do mundo que representa 15,0%. Quando trata-se de fontes de energia, o Brasil possuía quase 83% de sua matriz elétrica de fontes renováveis enquanto o mundo possuía 28,6%, em 2021. Dentre as fontes, o Brasil possui quase 11% da energia advinda da geração eólica e 56,8% da geração hidráulica [16, 18, 19]. A aposta no avanço tecnológico, na otimização de sistemas e no aproveitamento de fontes renováveis é o que move pesquisas no mundo para melhorar esse tipo de geração, como é o caso da área de projetos envolvendo turbinas de eixo horizontal, que podem ser utilizadas em vários cenários de geração [16, 18, 19].

No campo de energia eólica, dependendo das condições do vento, grandes usinas eólicas no passado foram implantadas em locais remotos, em terra ou ao longo da costa marítima. Porém, as adversidades e as necessidades atuais exigem que essas tecnologias sejam melhores aproveitadas [20, 21, 11]. Com o recente sucesso do conceito de fazenda flutuante, que é a disposição de um parque eólico com turbinas flutuantes em alto mar, a comunidade de energia eólica está mais inclinada para o máximo aproveitamento possível de uma tecnologia [22, 23, 24, 25]. Em relação às aplicações de pequena escala, fortes evidências, como por exemplo os estudos realizados por Siddiqui, Rasheed e Kvamsdal[24] e por Chamorro e Porté-Agel[26], tipificam o uso dessas turbinas eólicas em um contexto urbano, no fundo de rios em atuação hidrocínética e até mesmo em regiões com florestas, no qual a estrutura do fluxo de vento é complexa e é atribuída por alta variabilidade direcional, grandes ângulos de inclinação, com alto conteúdo turbulento.

Alguns dos desafios atuais são as reduções de custos, os avanços na tecnológicas e a implementação rápida. São algumas necessidades para a geração eólica ou hidrocínética, nos quais os dois tipos de geração podem utilizar turbinas de eixo horizontal como elemento de conversão de energia mecânica, porém um utiliza como fluido de trabalho o vento e o outro o fluxo de água, por exemplo [27]. Tratando-se de melhorias tecnológicas para a implantação de turbinas, o setor de pesquisa e desenvolvimento está cada vez mais atualizado e com propostas eficientes, nas quais pequenas modificações como, por exemplo, entender o ambiente no qual se instala uma turbina em relação ao solo, ou até mesmo, estudar a interação da altura do rotor com a superfície, podem apresentar ganhos de geração. Um exemplo de estudo na tentativa de entender o ambiente local foi uma pesquisa recente feita por Zendeabad, Chokani e Abhari[28], que estudou o efeito da instalação de uma turbina próximo a uma floresta de eucaliptos. Nesse estudo, algumas de suas principais conclusões foi que a instalação de turbinas de eixo horizontal a uma distância da floresta de cinco vezes o diâmetro do rotor pode diminuir o rendimento de geração, aumentar a intensidade de turbulência no rotor e as deflexões da torre, diminuindo o tempo entre as manutenções periódicas.

Mesmo com os avanços significativos no projeto aerodinâmico de aerogeradores de eixo horizontal, as interações na esteira da turbina ainda apresentam lacunas de conhecimento devido à sua complexidade e fenômenos altamente turbulentos. Quando tais fenômenos são estudados, é possível extrair características importantes para a construção de aerogeradores [29]. No artigo de revisão escrito por Porté-Agel, Bastankhah e Shamsoddin[30], relata-se que, do ponto de vista da Mecânica dos Fluidos, um dos principais efeitos estudados é a turbulência nos fluxos de esteiras de turbinas, pois pode ser a responsável por consideráveis perdas de potência na turbina e aumento das cargas de fadiga na estrutura.

O presente trabalho foi desenvolvido dentro do projeto de pesquisa Lambari, em parceria com a companhia Serra do Facão S.A., visando o desenvolvimento de metodologias para avaliação do potencial de energia hidrocínética no fluxo de saída de reservatórios de usinas

hidroelétricas, no qual o reservatório analisado é mostrado na Figura 1.1. Neste contexto, foi observado que um estudo sobre a interação de uma turbina de eixo horizontal em relação à altura do solo e do tipo de solo pudesse esclarecer, de maneira inicial, o que poderia acontecer num canal de saída de reservatório como o do projeto, sendo importante para estabelecer possibilidades de instalações de geradores hidrocínéticos a jusante de usinas hidroelétricas.



Figura 1.1 – Canal a jusante da Usina Hidrelétrica Serra do Facão em Catalão-GO.

Somado a este contexto, o presente trabalho busca compreender, de uma maneira experimental, a relação de geração de energia com o posicionamento de um rotor perante à superfície, também podendo-se variar o tipo de solo, utilizando-se um rotor em escala, no qual foi projetado no processo de desenvolvimento do projeto Hydro-k [8, 31] realizado pelo Laboratório de Energia e Ambiente da Universidade de Brasília, do tipo hélice, com quatro pás. Esse projeto, apesar de concluído, vem sendo otimizado e impulsionado a ser utilizado em situações diversas de funcionamento com a finalidade de refinamento das tecnologias empregadas.

Na Universidade de Brasília, O Laboratório de Energia e Ambiente tem conduzido projetos de pesquisa sobre a tecnologia de turbinas hidrocínéticas de eixo horizontal. Dois exemplos desse tipo de iniciativa são o projeto Hydro-K e o projeto Lambari. O projeto Hydro-K [8, 31], financiado pela AES Corporation [32], dedicou-se ao desenvolvimento de uma composição triangular de turbinas que resultou em uma combinação sinérgica das unidades, de forma que as três turbinas operando juntas convertem mais energia do que a soma de três turbinas idênticas operando isoladas. Já o projeto Lambari, desenvolvido em parceria com a SERRA DO FACÃO ENERGIA S.A. (SEFAC), investigou o potencial do canal de jusante da usina hidrelétrica Serra do Facão para converter energia hidrocínética em energia

elétrica. Nesses dois projetos, a distâncias dos rotores em relação ao fundo do rio e a rugosidade do leito são elementos importantes para a definição precisa dos sítios de instalação das turbinas. A presente dissertação de mestrado insere-se em um contexto amplo, relativo às soluções de aproveitamento de energia cinética dos escoamentos, formado pelas tecnologias de turbinas de eixo horizontal eólicas ou hidrocinéticas. Mais especificamente, as investigações realizadas aqui visam a produção de conhecimento útil para a elevação da eficiência de conversão de energia desse tipo de equipamento, considerando que a proximidade da turbina em relação ao solo afeta o escoamento através do rotor. Portanto, a rugosidade do terreno e a altura da turbina são parâmetros relevantes para a potência final produzida.

## 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos projetos de rotores de turbinas de eixo horizontal existem duas características a serem observadas nas esteiras, e que são de considerável interesse prático: déficit de velocidade, que está associado à perda de energia da turbina; e níveis de turbulência, que podem afetar as cargas do rotor induzidas pelo escoamento em outras turbinas localizadas a favor do vento, ou mesmo pela rugosidade do solo a montante do rotor [33, 26, 34]. Vale ressaltar que a conversão de energia pela turbina eólica é realizada pelos mesmos princípios da turbina hidrocinética, porém, a essência física do escoamento é diferente, na qual o escoamento hidrocinético é mais regular e previsível devido à natureza das correntes de água.

Informações detalhadas sobre as propriedades da esteira de turbina, incluindo características de fluxo médio e estruturas de turbulência, são de grande importância para otimizar a localização da turbina e maximizar a produção de energia [35]. As esteiras de turbinas de eixo horizontal são caracterizadas por estruturas complexas de fluxo turbulento com movimento rotacional induzido pelas pás da turbina, com gradientes de pressão longitudinais e radiais, e vórtices espirais originados de vórtices de ponta lançados pelas pás [26].

Para entender esses efeitos, modelos em escala podem ser usados. Para turbinas hidrocinéticas, por exemplo, argumentos de escala demonstram que é possível obter parâmetros de desempenho adimensionais sob um conjunto de condições de similaridade (geométricas, cinemáticas e dinâmicas) usando fluxo de ar e, por fim, transpor os resultados do modelo para dimensionar o protótipo real em fluxo de água. Em casos que não é possível afirmar que todas as condições de similaridade são satisfeitas, algumas metodologias de transposição podem ser propostas, como é o caso realizado por Macias et al.[36], no qual uma metodologia é proposta para extrapolar resultados experimentais em túneis de vento com modelo de pequena escala para uma turbina hidrocinética de tamanho real.

É importante compreender o ambiente onde as turbinas são instaladas. Um exemplo disso é o estudo experimental realizado por Zhang, Markfort e Porté-Agel[37], no qual analisou-se

como a instabilidade térmica altera as propriedades da camada limite atmosférica turbulenta e, por sua vez, afeta o comportamento das turbinas eólicas. Nesse estudo, utilizou-se um rotor de 3 pás numa turbina de eixo horizontal, no qual sua altura estava dentro do terço inferior da camada limite. A superfície do túnel de vento estava aquecida a 75 graus Celsius e o vento a 15 graus Celsius. Utilizando velocimetria de imagem de partículas e fio triplo de anemometria, concluiu-se que, em comparação com a esteira da mesma turbina eólica em uma camada limite neutra (sem efeitos térmicos), um déficit de velocidade menor (cerca de 15% no centro da esteira) é observado no caso com convecção, no qual um transporte de momento radial aprimorado leva a uma recuperação de momento mais rápida, particularmente na parte inferior da esteira.

De acordo com um estudo realizado por Siddiqui et al.[38], existe uma tendência em aproveitar lugares urbanos para a instalação de turbinas eólicas e aumentar a geração de energia, como por exemplo a instalação de turbinas em telhados de edifícios. Nesse caso trata-se de uma turbina de eixo vertical, no qual realizou-se uma simulação colocando o rotor em cinco alturas diferentes em relação ao solo do telhado, com isso, os resultados apontaram para uma perda da performance do rotor de 30,1% para a posição em que a ponta da pá do rotor está mais próxima do solo. Afirma-se que o melhor resultado para a potência é quando a pá está a uma distância razoável do solo, longe dos efeitos que poderiam influenciar, como a camada limite ou o efeito de confinamento do rotor em relação a superfície, o que talvez poderia apresentar-se com um comportamento diferente em se tratando de turbinas de eixo horizontal. Uma das principais conclusões é que o desempenho da turbina poderia ser aprimorado com a montagem em uma altura ideal que oferece significativamente menos efeitos de cisalhamento do solo.

Em um estudo realizado por John, Vaz e Wood[39], analisou-se o efeito de bloqueio através de uma investigação do desempenho aerodinâmico de um moinho de vento com múltiplas pás. Assim, o desempenho de um modelo de aerogerador de 0,68 m de diâmetro com  $3 \leq N \leq 24$  pás idênticas foi investigado em dois túneis de vento de fluxo aberto, com diferentes tamanhos de seção de teste: um com alto bloqueio de 36,3% e outro com bloqueio insignificante de 4,5%. Esse estudo revela que o alto bloqueio afeta significativamente o desempenho do rotor e é uma função de  $N$ . No geral, o experimento obteve uma melhor performance, destacando a importância de contabilizar a solidez na previsão de desempenho aerodinâmico.

Já em outro estudo proposto por John, Wood e Vaz[40], utilizando também um rotor de eixo horizontal com múltiplas pás, realizou-se testes em túnel de vento em um modelo de rotor com 3, 6, 12 e 24 pás com corda constante. Este artigo descreve o uso da teoria do vórtice helicoidal (HVT) e da análise do momento do elemento da pá (BEM) para prever o impulso, o torque e a potência extraída do moinho de vento. Em todos os números de pás, o torque do rotor medido excedeu as previsões do BEM nas taxas de velocidade de ponta

mais baixas, indicando atraso de estol que se tornou mais importante (e mais benéfico para o desempenho do moinho de vento) à medida que o número de pás aumentava. Este é um dos exemplos em que o estol não é adiantado, e não possui perda de potência, sendo diferente de um caso com uma turbulência considerável capaz de acelerar o estol.

Utilizando simulações numéricas da esteira hidrocínética de turbinas com eixo horizontal realizadas por Britto et al.[31], nos quais o rotor simulado é o mesmo utilizado nesse trabalho, visando a obter informações de esteira que passam por um arranjo linear não confinado, observou-se que o comportamento da esteira indica que a turbulência começa mais vigorosa na parte central do rotor, com lenta expansão lateral, e a contribuição das pás auxilia no aumento da área de esteira e na dissipação turbulenta no escoamento. A turbulência diminui sua intensidade expandindo-se lateralmente à medida que se distancia do rotor.

Análogo aos estudos experimentais realizados neste trabalho, buscando a interação do rotor com o solo, mas voltados para o impacto de geração de energia para turbinas instaladas perto de florestas, observou-se em alguns estudos que o principal impacto no déficit de velocidade no rotor, em que diminui a energia gerada, está em função da extensão de floresta a montante [25, 28, 1]. Observou-se também que a densidade da floresta, o que poderia ser definido como a densidade do elemento rugoso, não induziu efeitos dominantes nas características do volume da esteira; no entanto, uma recuperação mais rápida do fluxo, principalmente na esteira intermediária, ocorreu no caso de floresta menos densa, caracterizada por um espaçamento maior entre os elementos que produzem a rugosidade.

Através de simulações utilizando modelos computacionais de Dinâmica dos Fluidos Sogachev et al.[41] e Rodrigo, Beeck e Dezsö-Weidinger[42], impuseram ao escoamento condições semelhantes às observadas quando florestas ou elevada rugosidade do terreno estão presentes no escoamento a montante de turbinas. Em ambos os estudos, os autores verificaram que o efeito combinado de ganho e perda de energia devido a proximidade do rotor com o solo deve ser considerado cuidadosamente antes da colocação da turbina. Nota-se que entre as pesquisas existe uma preocupação com a camada limite a montante, independente do agente que produz rugosidade ou não, pois é necessário estudar o quão prejudicial/benéfica essa interação pode ser para a geração de energia [33, 41, 42].

Em uma pesquisa realizada por Chamorro e Porté-Agel[26], estudou-se a interação do solo com a esteira de turbina para superfícies rugosas e lisas. Nesse experimento utilizou-se um rotor com três pás e correntes dispostas igualmente em fileiras perpendiculares ao escoamento para funcionar como elemento gerador de rugosidade. Anemometria por fio quente foi utilizada para obter as velocidades do escoamento em túnel de vento. Observou-se uma esteira não axissimétrica da esteira em ambos os tipos de rugosidade, em resposta à entrada de fluxo não uniforme da camada limite e efeitos de superfície. Para esses mesmos perfis, o déficit de velocidade em relação ao perfil de velocidade de chegada é quase axissimétrico, exceto próximo ao solo na esteira distante, no qual ela interage com a superfície. Obser-

vou se neste estudo que a não simetria axial da distribuição da intensidade de turbulência da esteira é considerada alta na superfície rugosa, onde a vazão é menos uniforme ao nível da turbina.

Em um estudo realizado por Ryi et al.[43], discutiu-se o procedimento de um método de correção do efeito de bloqueio, envolvendo dados experimentais de rotores de turbinas eólicas em pequena escala. Um rotor de pequena escala foi testado sob as mesmas condições de operação, ou seja, a mesma taxa de avanço, velocidade de rotação, torque do rotor e velocidade do túnel de vento. O rotor de turbina eólica de pequena escala tem um diâmetro de 1,408 m e uma velocidade de rotação de acordo com a relação de velocidade de ponta. Em cada caso, o efeito da taxa de bloqueio e as características aerodinâmicas são determinados usando resultados de teste de túnel de vento e com um método de correção analítica simples. Os resultados do método de correção modificado mostram que os níveis de desempenho aerodinâmico durante um teste de túnel de vento são eliminados pelo efeito de bloqueio.

Em um estudo experimental em túnel de vento realizado por Cheng et al.[1], no qual é apresentado na figura 1.2, objetivou-se explorar a interação entre a esteira de uma turbina eólica modelo de eixo horizontal e o fluxo da camada limite sobre copas semelhantes a florestas e a modulação da densidade da floresta na troca turbulenta. Os experimentos foram realizados em um túnel de vento totalmente coberto com modelos de árvore de altura  $H/z_{hub} = 0,36$ , no qual  $z_{hub}$  é a altura do cubo da turbina, que foram colocados em um padrão escalonado compartilhando espaçamento transversal. Os resultados mostram uma modulação significativa da copa da floresta nas características de esteira em relação a um caso sem rugosidade provocada pela floresta. A densidade da floresta não induziu efeitos dominantes nas características do volume da esteira, no entanto, uma recuperação mais rápida do fluxo, principalmente na esteira intermediária, ocorreu no caso de floresta menos densa. Nesse, e em outros estudos já citados, houve uma preocupação em ocasionar a turbulência devido a uma rugosidade a montante, porém não evidenciaram, ou se preocuparam em relatar qual a influência em posicionar o rotor com a pá mais próximo, ou mais distante do solo.

Uma análise detalhada realizada em um estudo feito por Neunaber et al.[44], foram reveladas quatro regiões de esteira a jusante, cuja extensão depende da turbulência de afluência, que pôde ser identificada em todos os cenários com uma investigação apenas da linha central, através da velocidade média, da variância, da intensidade de turbulência, do espectro de energia, de escalas integrais e outros parâmetros.

Interessante mencionar que a maioria dos trabalhos já citados analisaram características físicas da esteira do rotor, como velocidade e intensidade de turbulência, para avaliar a interação da turbina com o solo, tanto para superfície lisa quanto rugosa, não posicionaram o rotor a uma altura suficiente próxima da superfície no qual a ponta da pá pudesse sofrer alguma influência do efeito de confinamento, e em alguns momentos, afirmando que é in-

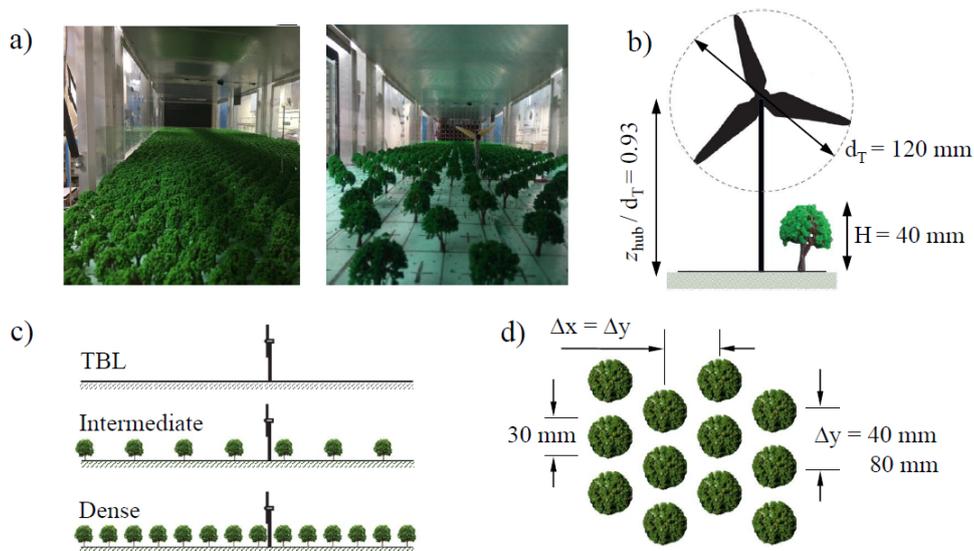


Figura 1.2 – (a) Fotografias do túnel de vento com os modelos de rugosidade intermediária e densa; (b) dimensões básicas do modelo de aerogerador e da árvore; (c) visão lateral dos cenários; (d) vista de cima da disposição geométrica dos arranjos arbóreos. Retirado de Cheng et al.[1]

interessante isolar a turbina dos efeitos viscosos de parede [35, 37, 45, 46, 47, 48]. Porém, outros já apresentam uma possível interação entre a esteira e o efeito de parede provocado pelo confinamento da turbina o mais próximo da superfície, no qual possuem resultados interessantes que podem influenciar o coeficiente de potência [44, 49, 50]. Algo semelhante pode ser observado para as turbinas hidrocinéticas de eixo horizontal, que podem ser posicionadas em rios rasos, nas quais é possível que a esteira da turbina seja influenciada pelo solo. A superfície lisa permite uma entrada de fluxo laminar, que pode ser usada como referência.

Alguns experimentos e simulações, que estão relacionados de alguma forma com o estudo do efeito da turbulência em rotores com difusor, adotaram uma metodologia de posicionar o rotor em condições isoladas de fronteiras, ou tomando providências explícitas para que isso fosse o caso. Em alguns momentos validam o efeito da superfície para o que acontecia na esteira, não preocupando-se com os efeitos dessa aproximação do solo com a potência [51, 52, 53].

Nesse trabalho foi realizado experimento de túnel de vento com um rotor, de quatro pás, em três alturas diferentes, variando também a rugosidade do solo, com a colocação de correntes na superfície, com o intuito de intensificar a turbulência a montante do rotor. Com a variação da rugosidade, ocorreu-se uma variação da espessura da camada limite de forma substancial na posição do rotor. Avaliou-se a curva de coeficiente de potência da turbina as condições do escoamento em relação à velocidade média e intensidade de turbulência antes e depois do rotor nessas situações, quais sejam alturas diferentes numa situação de superfície lisa e outra com rugosidade. Com isso, foi identificado que a interação da camada limite turbulenta com o rotor de turbina axial de eixo horizontal reduz a potência, por outro

lado, também foi identificado que os resultados experimentais indicam que quando não há interação entre as camadas limites, como acontece com o a superfície lisa, a aproximação do rotor em relação ao solo pode ocasionar uma elevação da potência da curva de CP, ao que se atribui a um aumento da vazão devido a um efeito de confinamento. Observou-se que esses dois efeitos concorrentes podem atuar simultaneamente num mesmo rotor a depender das condições de escoamento, da espessura da camada limite (turbulenta ou não) e da altura do rotor em relação a superfície, de forma a variar expressivamente a curva de potência da turbina em relação a curva de potência nominal, que é experimentada sem o efeito de aproximação do solo e sem o efeito de interação da camada limite.

O presente trabalho dedica-se a entender a influência da altura da turbina em relação ao solo e da rugosidade do terreno na potência convertida por turbinas livres de eixo horizontal. Para isso, foram realizados experimentos em um túnel de vento fechado empregando modelos operacionais de turbinas de eixo horizontal, equipados com sistemas de controle de velocidade de rotação, e instrumentação para medição de torque e velocidade angular. A rugosidade da seção de testes foi variada pela instalação de correntes aderentes a superfície inferior do túnel de vento. Curvas de coeficiente de potência em função da velocidade de rotação adimensionalizada pela velocidade de ponta de pá (Tip Speed Ratio – TSR) foram determinadas para diferentes alturas do rotor com o fundo liso (sem correntes) e rugoso (com correntes). Adicionalmente, perfis de velocidade média e intensidade de turbulência do escoamento a montante e a jusante do rotor foram medidos usando anemometria de fio quente. Verificou-se que com o fundo liso, a turbina posicionada o mais próximo possível do solo apresenta coeficiente de potência superior ao da turbina em altura elevada, para toda a faixa de rotação estudada, com um aumento do máximo coeficiente de potência de 20 %. Verificou-se ainda que a rotação em que o máximo coeficiente de potência ocorre é menor em relação à observada no caso com altura elevada. Atribui-se esse aumento de potência ao efeito de confinamento parcial do escoamento, devido à proximidade entre o solo e o rotor. Essa explicação é suportada pelos perfis de velocidade obtidos usando o anemômetro de fio quente. No caso com fundo rugoso, observou-se uma maior espessura da camada limite a montante, de forma que o déficit de velocidade do escoamento domina o efeito de confinamento e o coeficiente de potência diminui para a turbina mais próxima do solo. O principal resultado da dissertação é a identificação de que a combinação do mecanismo de elevação da velocidade média, pelo efeito de confinamento, com a déficit de velocidade média, pelo espessamento da camada limite, pode ser determinante para a definição da altura do rotor que maximize a potência convertida.

### **1.3 OBJETIVOS**

Com a necessidade de entender a influência da altura do rotor em relação ao solo e da rugosidade do terreno no desempenho de turbinas de eixo horizontal, o objetivo deste trabalho é estudar os fenômenos físicos que ocorrem no escoamento desses arranjos experimentalmente. Realizar os experimentos em condições de regime permanente, em superfícies lisa e rugosa, para três alturas diferentes do rotor em relação à superfície, com o intuito de estudar os efeitos devido à proximidade das pás em relação ao solo e a rugosidade em um escoamento médio resultante. Estabelecer uma comparação entre as alturas de rotor diferentes para cada tipo de superfície separadamente. Investigar os possíveis fenômenos físicos que podem modificar os coeficientes de potência.

# 2 REFERENCIAL TEÓRICO

---

*Esse capítulo apresenta conteúdos com o intuito de revisitar as fundamentações teóricas que poderão auxiliar na compreensão dos resultados e análises dos dados experimentais. Os temas sobre turbulência, dinâmica de turbinas de eixo horizontal e rugosidade são tratados de forma a substanciar as discussões dos resultados que serão apresentados.*

## 2.1 TURBULÊNCIA

Os escoamentos que ocorrem em aplicações naturais e técnicas são turbulentos, em sua grande maioria. Todas as áreas a jusante de objetos que se movem em meios fluidos, como carros, aviões e navios, são turbulentas. A camada limite atmosférica é turbulenta, semelhante ao movimento das nuvens. A pesquisa de turbulência é uma área de aplicação interdisciplinar [2].

Mesmo com a presença de escoamentos turbulentos nas mais diversas áreas do conhecimento, uma definição precisa sobre a natureza do escoamento turbulento é desconhecida. Sendo assim, é conveniente listar suas características para melhor caracterizar o escoamento turbulento. De acordo com Tennekes e Lumley[2], algumas das características do escoamento turbulento que poderão servir para o entendimento dos resultados obtidos são listados a seguir:

- Escoamentos turbulentos ocorrem em regimes de alto número de Reynolds, e surgem a partir de instabilidades no escoamento laminar. Tais instabilidades surgem a partir da interação entre os termos não lineares viscosos e de inércia. Sua característica randômica combinada com sua física não linear torna extremamente difícil o rastreamento temporal ou a evolução da turbulência em um escoamento.
- Escoamentos turbulentos são sempre dissipativos. As tensões viscosas cisalhantes realizam um trabalho de deformação sobre as partículas fluídas, no que resulta no aumento da energia interna do fluido, ao custo da energia cinética turbulenta do escoamento médio. A turbulência com sua característica dissipativa, necessita constantemente do fornecimento (produção) de energia para suprir a perdas pela viscosidade. Se o fornecimento da energia não se dá proporções idênticas que a dissipação, há um decaimento da turbulência do escoamento.
- A turbulência não é uma propriedade do fluido, mas sim do escoamento fluido de líquidos e gases. Ou seja, as propriedades da turbulência não são ditadas pelas propriedades moleculares do fluido.

- A turbulência é caracterizada pela presença de um grande espectro de escalas de tempo e comprimento excitadas, relacionadas às suas estruturas turbulentas. Conforme o escoamento aprecia um aumento no número de Reynolds, mais escalas surgem a partir do princípio do fluxo da energia cinética turbulenta, a cascata energética.

Como não há uma forma precisa para se descrever o escoamento turbulento, diversas metodologias de análise foram desenvolvidas. Atualmente existem três metodologias principais no estudo da turbulência: análise dimensional, invariância assintótica e invariância localizada. A análise dimensional mostra-se como uma das ferramentas mais utilizadas no estudo de escoamentos turbulentos, pois com ela é possível relacionar características da física dos escoamentos turbulentos com variáveis independentes ou parâmetros [2].

Os escoamentos turbulentos são escoamentos que possuem um vasto espectro de escalas de estruturas turbulentas. As principais escalas de estudo são as relacionadas à produção e à dissipação da energia cinética de turbulência. O fluxo da energia na turbulência através do espectro de escalas é descrito como Cascata Energética. O conceito de Cascata Energética foi introduzido por Richardson[54], no qual a energia cinética de turbulência é extraída do escoamento médio, através de mecanismos de produção pelas grandes escalas. Tomando como exemplo um escoamento sobre um degrau, o comprimento característico do degrau possui a mesma escala das maiores estruturas turbulentas produzidas, as quais são responsáveis pela transferência da energia do escoamento médio para a turbulência. A energia é transferida das grandes estruturas para as menores, as quais também estão contidas nas grandes estruturas. Desta forma a energia é continuamente transferida, até alcançar as menores estruturas turbulentas, onde a energia é dissipada em calor através da ação de viscosidade molecular [54]. As escalas de turbulência, ou comprimentos característicos do turbilhão, são uma das escalas características de fluxos turbulentos em fluidos, referindo-se à dimensão do comprimento dos turbilhonamentos (redemoinho de um fluido e a corrente criada quando o fluido flui passando em um obstáculo).

De forma mais completa, a transferência da energia para a faixa de escalas dissipativas primariamente passa pela sub faixa inercial de escalas das estruturas turbulentas. A passagem da energia cinética de turbulência por essa sub faixa inercial é a caracterização da cascata energética [55].

### 2.1.1 Decomposição de Reynolds

A decomposição aqui apresentada pode ser observada com mais detalhes na explicação feita por Tennekes e Lumley[2]. Na dinâmica de fluidos e na teoria da turbulência, tal decomposição foi proposta para separar matematicamente uma variável instantânea  $u_i$  em uma componente média  $\bar{u}_i$  e o termo de flutuação  $u'_i$ ,

$$u_i(x_i, t) = \bar{u}_i(x_i) + u'_i(x_i, t). \quad (2.1)$$

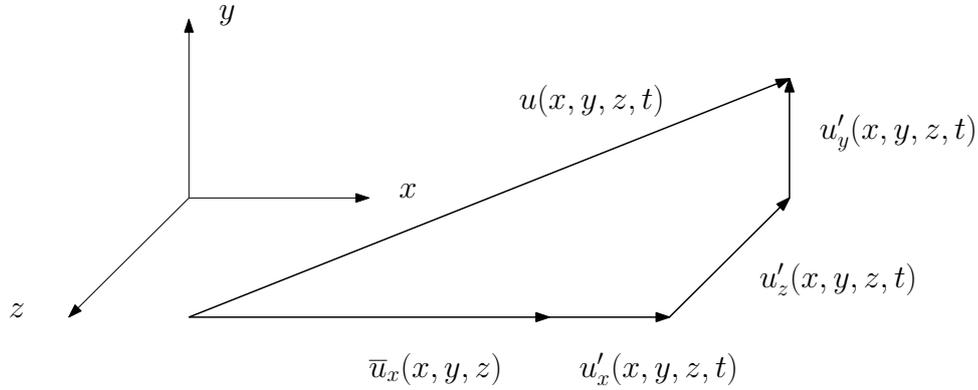


Figura 2.1 – Esquemático da decomposição de Reynolds em um escoamento com direção preferencial adaptado de Tennekes e Lumley[2]

Onde  $\bar{u}_i$  é interpretado como a média temporal, a qual é definida por,

$$\bar{u}_i = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} u_i dt, \quad (2.2)$$

Onde por definição, a média temporal das flutuações é zero.

$$\overline{u'_i} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_{t_0}^{t_0+t} (u_i - \bar{u}_i) dt \equiv 0. \quad (2.3)$$

Para que a média temporal faça sentido, as equações (2.2) e (2.3) devem ser independentes em relação ao  $t_0$ , em linhas gerais o escoamento médio tem que ser permanente.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = 0 \quad (2.4)$$

A abordagem de Reynolds para decompor a turbulência em uma parcela média invariável com o tempo e outra parcela flutuante dependente do tempo, Eq.(2.1), tem praticidade na descrição simples de um fenômeno aleatório. Porém, tal abordagem suprime o vasto espectro de escalas/frequências de turbulência em somente uma única escala.

### 2.1.2 Equações médias de Reynolds

Primeiramente consideremos a média do produto de duas e de três variáveis  $x$  e  $y$   $z$ , utilizando a decomposição de Reynolds.

$$\overline{(xy)} = \overline{(\bar{x} + x')(\bar{y} + y')} = \overline{(\bar{x}\bar{y})} + \overline{(\bar{x}y')} + \overline{(x'\bar{y})} + \overline{(x'y')}, \quad (2.5)$$

$$\overline{(xyz)} = \overline{(\bar{x} + x')(\bar{y} + y')(\bar{z} + z')} = \overline{(\bar{x}y\bar{z})} + \overline{(\bar{x}y'z')} + \overline{(\bar{x}'y\bar{z})} + \overline{(\bar{x}'y'z')} + \overline{(\bar{x}y'z')} + \overline{(\bar{x}'y\bar{z})} + \overline{(\bar{x}'y'z')} + \overline{(\bar{x}'y'z')} \quad (2.6)$$

Partindo da relação que a média de uma variável de flutuação quando aplicado ao produto de variáveis médias possui seu produto nulo.

$$\overline{(x'y)} = \overline{(\bar{x}y')} = 0, \quad (2.7)$$

$$\overline{(x'y'z)} = \overline{(\bar{x}y'z')} = \overline{(\bar{x}y'z')} = 0. \quad (2.8)$$

Assim obtemos a relação das médias de variáveis instantâneas pela decomposição de Reynolds dos produtos duplos e triplos respectivamente, e que os termos que possuem duas variáveis flutuantes são conhecidos como covariâncias.

$$\overline{(x'y)} = \overline{(\bar{x}y')} + \overline{x'y'} \quad (2.9)$$

$$\overline{(xyz)} = \overline{(\bar{x}y\bar{z})} + \overline{(\bar{x}y'z')} + \overline{(\bar{x}'y\bar{z})} + \overline{(\bar{x}'y'z')} + \overline{(\bar{x}'y'z')} \quad (2.10)$$

As quantidades  $x'$  e  $y'$  são ditas como correlacionadas se a média do produto de suas flutuações é diferente de zero  $\overline{x'y'} \neq 0$ , e são ditas como não correlacionadas quando a média do produto das flutuações é zero  $\overline{x'y'} = 0$ .

Consideremos agora as equações de conservação de massa Eq.(2.11) e quantidade de movimento Eq.(2.12a), para um escoamento incompressível,

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.11)$$

$$\underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial t}}_{\text{Variação Temporal}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j)}_{\text{Variação Advectiva}} = \underbrace{f_i}_{\text{Termo Fonte}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}}_{\text{Tensões Normais}} + 2\nu \underbrace{\frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j}}_{\text{Tensões Cisalhantes}} \quad (2.12a)$$

$$\underbrace{S_{ij}}_{\text{Tensor Taxa de Deformação}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (2.12b)$$

Usando a decomposição de Reynolds e tomando a média da equação da continuidade

instantânea obtemos a equação média da continuidade,

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0. \quad (2.13)$$

Agora realizando a média da equação de quantidade de movimento,

$$\frac{\partial}{\partial t} \overline{(u_i + u'_i)} + \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{(u_i + u'_i)(u_j + u'_j)} = \overline{(f_i + f'_i)} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \overline{(\bar{p} + p')} + 2\nu \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{(S_{ij} + S'_{ij})}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j} + \underbrace{\overline{u'_i u'_j}}) = \overline{(f_i + f'_i)} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \overline{(\bar{p} + p')} + 2\nu \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{(S_{ij} + S'_{ij})}. \quad (2.14)$$

Isolando o termo evidenciado da Eq.(2.14), temos que,

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \overline{(u_i u_j)} = \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \underbrace{\bar{u}_i \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j}}_{=0} = \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}, \quad (2.15)$$

em que o termo evidenciado da Eq.(2.15) é a equação da continuidade multiplicada pelo vetor velocidade média.

Rearranjando a equação média de quantidade de movimento da Eq.(2.14), e substituindo o tensor taxa de deformação por sua definição na Eq.(2.12b) temos que,

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \overline{(u'_i u'_j)}} = \bar{f}_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right). \quad (2.16)$$

Passando o termo de flutuações de segunda ordem evidenciado para o lado direito da equação obtemos a Equação Média de Quantidade de Movimento,

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \bar{f}_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \bar{p} \delta_{ij} + \overline{\rho u'_i u'_j} - \nu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right]. \quad (2.17)$$

Em que a quantidade  $\delta_{ij}$  é o delta de Kronecker e  $-\rho u'_i u'_j$  é o tensor de Reynolds,

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = -\rho \begin{bmatrix} \overline{u' u'} & \overline{u' v'} & \overline{u' w'} \\ \overline{v' u'} & \overline{v' v'} & \overline{v' w'} \\ \overline{w' u'} & \overline{w' v'} & \overline{w' w'} \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

O tensor de Reynolds é simétrico, assim observamos a aparecimento de seis novas va-

riáveis suplementares. O traço de um tensor está associado à pressão, ou seja, um escalar representativo do efeito médio, isotrópico, de transporte de quantidade dinâmica relacionada a aquele tensor. No caso do tensor de Reynolds, observamos que está associado a energia cinética de turbulência ( $\epsilon$ ), pois

$$\epsilon = \frac{\rho}{2} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) . \quad (2.19)$$

## 2.2 DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DE TURBULÊNCIA

### 2.2.1 Média

Uma média estatística simples é definida pela soma de todos os valores da amostra dividido pelo número de amostras  $N$ , como na equação 2.20. Para obtenção da média estatística de uma variável, é necessário um grande número de experimentos para compor a média, pois formalmente, o valor médio é definido com o limite de  $N$  tendendo ao infinito ( $N \rightarrow \infty$ ) do número de amostras. Portanto, as medições experimentais podem ser imprecisas se o tamanho da amostra for pequeno.

$$\bar{u}(x_0, t_0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (2.20)$$

Para se utilizar a média temporal as variáveis estatísticas devem ser estacionárias. Supondo uma medida da velocidade instantânea feita em um túnel de vento, o qual está em uma velocidade constante, não importa se a medida foi feita agora com uma duração de 30 segundos, ou se foi feita 10 minutos após com uma duração de 60 segundos. É esperado que o valor médio encontrado em ambas aquisições sejam idênticos  $\bar{u}(x_0, t_0) = \bar{u}(x_0, t)$  dentro do erro experimental. Tal média é expressa por

$$\bar{u}(x_0, t_0) = \frac{1}{t} \int_0^t u dt. \quad (2.21)$$

A média temporal se aplica quando escoamento turbulento médio não varia com o tempo.

Já a média espacial, é utilizada quando o escoamento turbulento é homogêneo  $\bar{u}(x_0, t_0) = \bar{u}(x, t_0)$ .

$$\bar{u}(x, t_0) = \frac{1}{x} \int_0^x u dx \quad (2.22)$$

Quando o escoamento é estacionário e homogêneo  $\bar{u}(x_0, t_0) = \bar{u}(x, t_0) = \bar{u}(x_0, t)$  diz-se

que a turbulência é Ergódica.

## 2.2.2 Função Densidade de Probabilidade

A Função Densidade Probabilidade (*FDP*)  $B(u)$  é definida como a probabilidade de encontrar a variável aleatória  $u(t)$  entre  $u$  e  $u + \Delta u$ , e é igual a proporção do tempo gasto dentro desse intervalo pela variável  $u$ .

A densidade de probabilidade de uma senoide com amplitude unitária, figura (2.2), revela que nos limites  $+1$  e  $-1$  os valores  $B(u)$  tendem ao infinito, pois para um determinado intervalo da amplitude a maior probabilidade de se encontrar os valores da senoide é encontrada próximo aos valores de pico e vale.

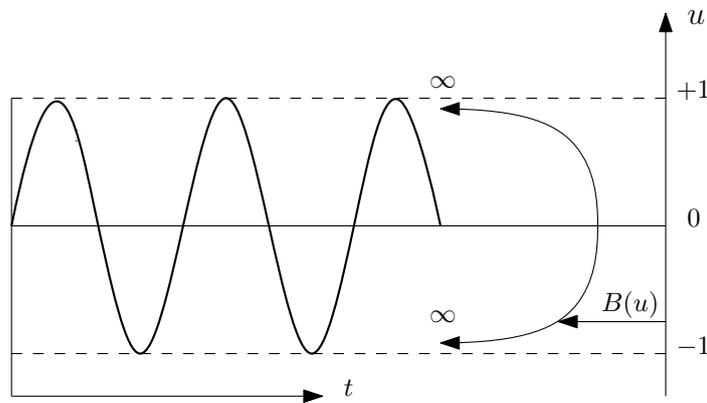


Figura 2.2 – Distribuição da densidade de probabilidade de uma senoide, modificado [2].

Com a FDP é possível realizar diversas interpretações sobre a morfologia das flutuações e como elas se dispõem em torno de seus valores médios.

Partindo da FDP é possível expressar as médias de uma função  $f(u)$  qualquer em termos de  $B(u)$ ,

$$\bar{f}(u) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_{t_0}^{t_0+t} f(u) du = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) B(u) du. \quad (2.23)$$

Os valores médios das diversas potências de  $u^n$  são chamados de momentos centrados, no qual

$$\bar{u}^n = \int_{-\infty}^{\infty} u^n B(u) du. \quad (2.24)$$

O primeiro momento centrado, em que  $n = 1$  é a própria média temporal. Os momentos de ordem superior são destinados a caracterização das flutuações turbulentas de velocidade, como essas flutuações se distribuem e comportam em torno de seus valores médios.

### 2.2.3 Momentos estatísticos de segunda ordem

Os momentos de ordem superior são destinados a caracterização das flutuações turbulentas de velocidade, como essas flutuações se distribuem e comportam em torno de seus valores médios. O Segundo momento centrado é a variância. É a média quadrática da flutuação,

$$\sigma^2 = \overline{(u')^2} \hat{i} + \overline{(v')^2} \hat{j} + \overline{(w')^2} \hat{k} \quad (2.25a)$$

$$\sigma_x^2 = \overline{u'^2} = \int_{-\infty}^{\infty} u'^2 B(u') du' \quad (2.25b)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u'_i)^2. \quad (2.25c)$$

A variância não é afetada pela falta de simetria da *FDP* em torno da origem. A raiz quadrada da variância é conhecida como desvio padrão e também como amplitude *rms* (*root mean square*), e é a medida mais conveniente para a medida da espessura da *FDP*,

$$\sigma = \sqrt{\overline{(u')^2}} \hat{i} + \sqrt{\overline{(v')^2}} \hat{j} + \sqrt{\overline{(w')^2}} \hat{k} \quad (2.26a)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\overline{(u')^2}} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} u'^2 B(u') du'} \quad (2.26b)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u'_i)^2}. \quad (2.26c)$$

O desvio padrão é uma medida da intensidade das flutuações, sendo que todas as áreas acima e abaixo da média são somadas para resultar em um valor médio da amplitude das flutuações.

### 2.2.4 Momento estatístico de terceira ordem

O terceiro momento centrado é uma medida da assimetria da *FDP*. Este é adimensionalizado pelo cubo do desvio padrão  $\sigma^3$ , assim obtemos o coeficiente de dessimetria  $D$ . Se a *FDP* é simétrica em relação à média, o coeficiente é igual a zero.

$$\overline{u'^3} = \int_{-\infty}^{\infty} (u')^3 B(u') du' \quad (2.27a)$$

$$D = \frac{\overline{(u')^3}}{\sigma^3} \quad (2.27b)$$

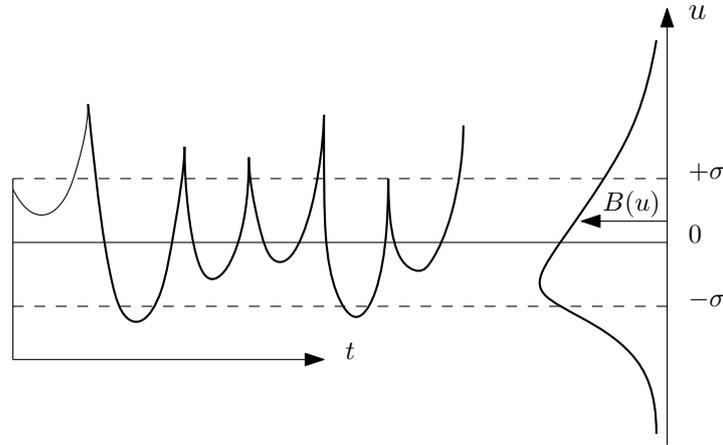


Figura 2.3 – Sinal de velocidade com assimetria positiva, modificado [2].

### 2.2.5 Intensidade de turbulência e energia cinética de turbulência

A intensidade de turbulência é uma medida do grau de intensidade das flutuações em torno da velocidade média. Quanto maior a intensidade de turbulência, maior são os valores absolutos das flutuações.

A intensidade de turbulência é adimensionalizada pela velocidade média na direção preferencial do escoamento  $\bar{u}$ , de tal forma que

$$\mathbf{I} = \frac{\sqrt{\overline{(u')^2}}}{\bar{u}} \hat{i} + \frac{\sqrt{\overline{(v')^2}}}{\bar{u}} \hat{j} + \frac{\sqrt{\overline{(w')^2}}}{\bar{u}} \hat{k}. \quad (2.28)$$

Com o intuito de aprofundar a compreensão da contribuição dos incrementos positivos e negativos de intensidade de turbulência ao escoamento pela turbina, diversos modelos foram desenvolvidos para estimar esta adição de intensidade de turbulência, como por exemplo, Chamorro e Porté-Agel[26] define essa adição de intensidade de turbulência  $I_+$  como uma função da intensidade de turbulência do escoamento antes da turbina  $I_0$  e a intensidade de turbulência na esteira  $I_{Esteira}$

$$I_+ = \sqrt{I_{Esteira}^2 - I_0^2} \quad (2.29)$$

Como há duas regiões distintas de incremento positivos e negativos da intensidade de turbulência, parte superior e inferior da esteira, Chamorro e Porté-Agel[26] propuseram dividir o termo de adição de intensidade de turbulência média  $\bar{I}_+$  em duas regiões, para melhor caracterizar sua variabilidade espacial, uma parcela para a parte superior da esteira  $\bar{I}_+^+$  e outra

para a inferior  $\bar{I}_+^-$ , acima e a baixo do eixo da turbina respectivamente.

$$\bar{I}_+^+ = \frac{1}{A_+} \int_{A_+} \sqrt{I_{Esteira}^2 - I_0^2}, \text{ para } I_{Esteira} > I_0 \quad (2.30)$$

$$\bar{I}_+^- = \frac{1}{A_-} \int_{A_-} \sqrt{I_{Esteira}^2 - I_0^2}, \text{ Para } I_{Esteira} < I_0 \quad (2.31)$$

A Energia Cinética de turbulência é uma medida da energia associada as estruturas turbulentas por unidade de massa.

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) \quad (2.32a)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \overline{(u'_i)^2} \quad (2.32b)$$

A turbina induz uma redução na magnitude da dessimetria da velocidade em relação ao escoamento livre, em que a dessimetria dentro da esteira é levemente positiva, o que difere substancialmente da dessimetria negativa medida no escoamento livre longe da superfície. A energia extraída pela turbina pode ser descrita em termos do coeficiente de dessimetria, onde a dessimetria do escoamento livre que chega à turbina pode reduzir ou aumentar a geração de energia da turbina, dependendo do sinal do coeficiente de dessimetria. A turbina remove a dessimetria negativa do escoamento não perturbado longe da superfície, mas mesmo assim, a dessimetria possui um papel pequeno quando comparado ao déficit de velocidade e a intensidade de turbulência no contexto de extração de energia do escoamento [26].

Uma outra forma de analisar a morfologia do escoamento de esteira, é por meio da análise espectral do domínio de frequências do escoamento turbulento, onde consegue-se discernir a influência de diferentes escalas de estruturas turbulentas em termos do transporte da esteira. Porém este tipo de análise apresenta desafios devido ao escoamento de CLA ser caracterizado por um vasto espectro de escalas de comprimento e uma configuração não trivial das estruturas vorticiais. As interações entre estruturas típicas da camada limite modificam o gradiente de cisalhamento do escoamento médio e a turbina impõem diversas escalas altamente não lineares ao escoamento [50].

## 2.3 DINÂMICA DE TURBINAS DE EIXO HORIZONTAL

Turbinas de eixo horizontal são dispositivos que realizam a extração da energia cinética do escoamento. A presença do rotor no escoamento, gera um distúrbio no campo de pressão a montante que induz uma redução da velocidade do escoamento, alcançando valores inferiores a velocidade do escoamento não perturbado.

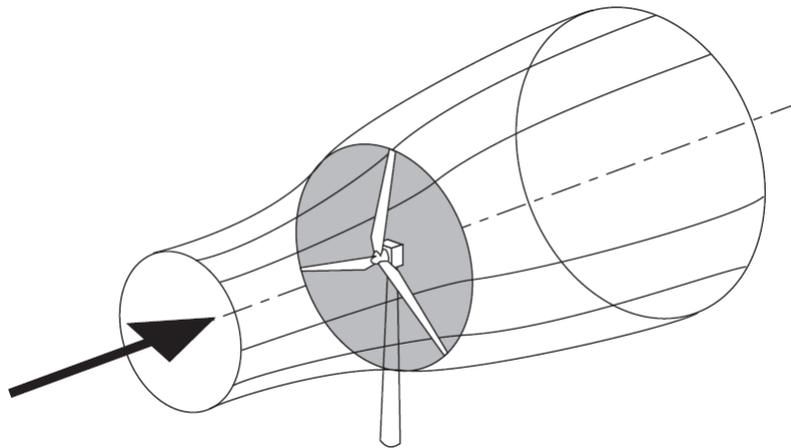


Figura 2.4 – Tubo de Corrente para uma turbina Fonte: Burton, Jenkins e Sharpe[3].

O conceito de tubo de corrente define uma região de influência da turbina. Observa-se na figura 2.4, a montante do rotor há uma expansão devido ao aumento da pressão estática. Ao passo que o escoamento passa pelo rotor, aprecia-se uma queda na pressão estática. Tal queda se dá pela absorção da energia cinética pelo rotor. Assim a região a jusante da turbina experimenta uma redução na velocidade do escoamento e uma queda da pressão inferior à pressão atmosférica, seguida de sua recuperação, essa região é denominada de esteira. Essa seção foi baseada e escrita de acordo com as apresentações dessa teoria por Burton, Jenkins e Sharpe[3].

### 2.3.1 Teoria do disco atuador

A teoria do disco atuador possibilita a análise do comportamento de turbinas eólicas e da conversão da energia cinética sem a necessidade de informações e características construtivas das pás e da turbina.

Nesta teoria, o rotor é modelado como um disco permeável, no qual o escoamento aprecia uma queda de pressão estática. O tubo de corrente a montante do disco atuador possui uma seção transversal inferior ao do próprio disco, quando a jusante, maior. O efeito por trás dessa variação de seção transversal está relacionado à continuidade do fluxo mássico no tubo de corrente, onde há uma redução na velocidade a jusante, sendo necessário que ocorra

um aumento proporcional da área de seção a jusante.

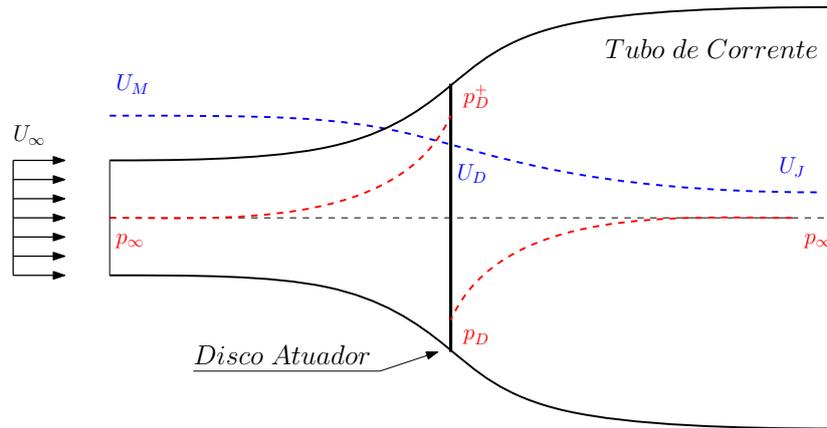


Figura 2.5 – Extração de energia do Disco atuador no tubo de corrente. Adaptado [3]

Observando a figura (2.5), percebe-se que o tubo de corrente a montante do disco atuador possui uma seção transversal inferior ao do próprio disco, quando a jusante, maior. O efeito por trás dessa variação de seção transversal está relacionado à continuidade do fluxo mássico no tubo de corrente, onde há uma redução na velocidade a jusante, sendo necessário que ocorra um aumento proporcional da área de seção a jusante.

$$\dot{m} = \underbrace{\rho A_M U_M}_{Montante} = \underbrace{\rho A_D U_D}_{Disco} = \underbrace{\rho A_J U_J}_{Jusante}$$

No qual,

$$U_M > U_D > U_J$$

$$A_M < A_D < A_J$$

Definimos o fator de indução  $a_u$  axial, valor adimensional o qual relaciona a redução da velocidade do escoamento na direção preferencial pela presença do disco atuador.

$$a_u = \frac{U_M - U_D}{U_M} \quad (2.33)$$

$$U_D = U_M(1 - a_u) \quad (2.34)$$

Da mesma forma que o escoamento aprecia uma variação na velocidade axial há uma variação no momento linear. A força que gera tal variação do momento linear está ligada à diferença de pressão através do disco atuador.

$$\text{Força} = (p_D^+ - p_D^-)A_D = (U_M - U_J)\rho A_D U_M(1 - a_u) \quad (2.35)$$

Por aplicação da equação de Bernoulli a montante e a jusante separadamente, pois o disco atuador extrai energia do escoamento, conseqüentemente os níveis energéticos a montante e jusante são diferentes. Considerando um escoamento permanente, incompressível a uma altura constante e irrotacional,

Montante:

$$\frac{1}{2}\rho U_M^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho U_D^2 + p_D^+ \quad (2.36a)$$

Jusante:

$$\frac{1}{2}\rho U_J^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho U_D^2 + p_D^- \quad (2.36b)$$

Subtraindo a Eq. (2.36a) da Eq. (2.36b), obtemos

$$(p_D^+ - p_D^-) = \frac{1}{2}\rho(U_M^2 - U_J^2) \quad (2.37)$$

Substituindo a Eq. (2.37) na Eq. (2.35) obtemos

$$\frac{1}{2}\rho(U_M^2 - U_J^2)A_D = (U_M - U_J)\rho A_D U_M(1 - a_u) \quad (2.38a)$$

$$U_J = U_M(1 - 2a_u) \quad (2.38b)$$

A equação (2.38b) demonstra a relação entre as velocidades a montante e jusante pelo fator de indução.

Como a força que gera a variação do momento linear do escoamento é produzida pelo disco atuador, podemos obter a força em função da velocidade do escoamento a montante ( $U_M$ ) substituindo a Eq. (2.38b) na Eq. (2.35),

$$\text{Força} = 2\rho A_D U_M^2 a_u(1 - a_u). \quad (2.39)$$

Multiplicando a Força pela velocidade do escoamento no disco atuador obtemos a potência gerada pelo disco,

$$\text{Energia} = 2\rho A_D U_M^3 a_u(1 - a_u)^2. \quad (2.40)$$

Assim podemos definir o Coeficiente de Potência,

$$C_p = \frac{2\rho A_D U_M^3 a_u(1 - a_u)^2}{\frac{1}{2}\rho U_M^3 A_D} \quad (2.41a)$$

$$C_p = 4a_u(1 - a_u)^2. \quad (2.41b)$$

### 2.3.2 Teoria do momento angular

O escoamento que chega à turbina possui momento angular nulo. Após a turbina isto deixa de existir, pois as pás induzem um movimento angular no escoamento devido a conservação do momento angular. A velocidade tangencial adquirida pelo escoamento varia de acordo com o raio da pá do rotor, alcançando seu valor máximo na ponta da pá e o inverso na base da pá. Desta forma, o fator de indução tangencial varia também em relação ao raio.

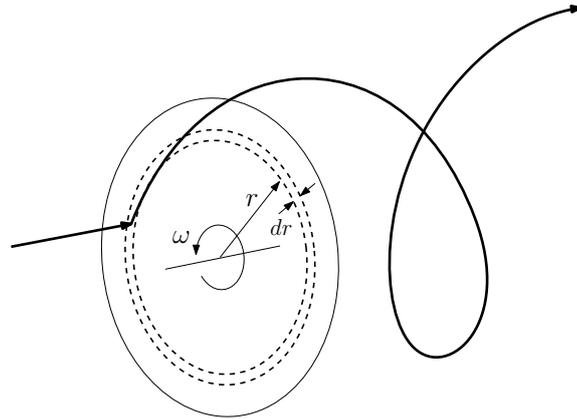


Figura 2.6 – Trajetória de uma partícula fluida passando através do disco atuator. Adaptado de Burton, Jenkins e Sharpe[3]

Por definição a velocidade tangencial induzida a jusante do disco atuator é descrita pelo fator de indução tangencial  $a_\theta$ , velocidade angular  $\omega$  e o raio  $r$ .

$$U_\theta = 2a_\theta\omega r \quad (2.42)$$

Na figura (2.6), observamos que em uma determinada faixa anular com espessura  $dr$  a uma distância  $r$  do centro, podemos definir o incremento de torque relativo ao diferencial de área  $dA_D$ .

$$\underbrace{dM}_{\text{Diferencial de Torque}} = \underbrace{\rho dA_D U_M (1 - a_u)}_{\text{Fluxo Mássico}} \underbrace{2\omega a_\theta r}_{\text{Velocidade Tangencial}} \underbrace{r}_{\text{Raio}} \quad (2.43)$$

Onde  $dM$  é o incremento de torque sentido pelo disco rotor em relação ao diferencial de área  $dA_D$  à uma certa distância  $r$  do centro.

O incremento de potência experimentado pelo rotor é incremento diferencial do torque pela velocidade angular,

$$dP = dM\omega \quad (2.44a)$$

$$dP = \rho dA_D U_M (1 - a_u) 2\omega^2 a_\theta r^2 \quad (2.44b)$$

Considerando que a cada diferencial de área do disco há uma variação do momento angular e linear para o mesmo raio.

$$\underbrace{2\rho dA_D U_M^3 a_u (1 - a_u)^2}_{\text{Momento Axial}} = \underbrace{\rho dA_D U_M (1 - a_u) 2\omega^2 a_\theta r^2}_{\text{Momento Angular}} \quad (2.45a)$$

$$U_M^2 a_u (1 - a_u) = \omega^2 a_\theta r^2 \quad (2.45b)$$

É comum o uso da velocidade de ponta de pá  $\lambda$  no estudo de turbinas. Este valor adimensional relaciona a velocidade tangencial na ponta da pá com a velocidade do escoamento não perturbado à montante  $U_M$ .

$$\lambda = \frac{\omega r}{U_M} \quad (2.46)$$

Juntando as duas equações a cima, obtemos

$$a_u (1 - a_u) = \lambda^2 a_\theta, \quad (2.47)$$

e substituindo a Eq.(2.47) na Eq. (2.44b) e considerando que o elemento de área diferencial  $dA_D = 2\pi r dr$ , obtemos:

$$dP = \underbrace{\left[ \frac{1}{2} \rho U_M^3 2\pi r dr \right]}_{\text{Fluxo de Energia no Anel Diferencial}} \underbrace{\left[ 4a_\theta (1 - a_u) \lambda^2 \right]}_{\text{Eficiência do Elemento de Pá}} \quad (2.48)$$

Integrando a equação anterior em relação ao raio e adimensionalizando por  $\frac{1}{2} \rho U_M^3 \pi R$  obtemos a equação do coeficiente de potência, cujo é a mesma que a Eq.(2.41b) para o momento linear

$$C_p = 4a_u (1 - a_u)^2. \quad (2.49)$$

### 2.3.3 Limite de Betz

Para se obter o coeficiente de potência máximo, basta-se derivar o Coeficiente de Potência ( $C_p$ ) em função do fator de indução axial ( $a_u$ ) e igualar a zero,

$$\frac{dC_p}{da_u} = 4(1 - a_u)(1 - 3a_u) = 0 \quad (2.50)$$

Obtemos para o Coeficiente de potência máximo  $C_p^{Máx}$  com um valor do fator de indução  $a_u = 1/3$

Betz[56] definiu o máximo coeficiente de potência como

$$C_p^{Máx} |_{a_u=1/3} = \frac{16}{27} = 0,593. \quad (2.51)$$

Tal valor é conhecido como limite de Betz. Representa a eficiência máxima de uma turbina de fluxo livre. Tal efeito não tem relação às características construtivas da turbina, mas sim com o efeito da expansão do tubo de corrente a montante do disco atuador.

### 2.3.4 Coeficiente de potência

A potência obtida para uma turbina de diâmetro característico  $D$ , velocidade de rotação  $\omega$ , inserida em um fluido de densidade  $\rho$ , viscosidade dinâmica  $\mu$  e velocidade do escoamento característica  $u$  será função destas variáveis, e portanto,

$$P = f(D, \omega, \rho, \mu, u). \quad (2.52)$$

Pelo teorema de Buckingham a relação entre a potência e as restantes variáveis pode ser expressada através de três grupos adimensionais tais que,

$$\frac{P}{\rho D^2 u^3} = f\left(\frac{\rho u D}{\mu}, \frac{\omega D}{u}\right). \quad (2.53)$$

Sendo estes grupos adimensionais comumente expressados como coeficiente de potência (2.54), número de Reynolds (2.55) e TSR (2.56),

$$C_p = \frac{P}{0,5\rho Au^3}, \quad (2.54)$$

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu}, \quad (2.55)$$

$$TSR = \frac{\omega R}{u}, \quad (2.56)$$

e portanto, a relação entre a potência da turbina com o resto de variáveis fica como

$$C_p = f(Re, TSR), \quad (2.57)$$

O coeficiente de potência,  $C_p$ , é função do número de Reynolds e do TSR, tanto para o modelo como para o protótipo. Por fim, temos que

$$C_p = \frac{\omega\tau}{0.5\rho A(U_\infty)^3}, \quad (2.58)$$

em que  $\tau$  é o torque no eixo do rotor em  $N.m$ , e  $A$  é a área do rotor.

### 2.3.5 Esteira

A jusante do rotor, na sua região de esteira, o escoamento apresenta complexas estruturas turbulentas com um movimento rotacional induzido pelas pás do rotor da turbina, gradientes de pressão longitudinais e radiais e estruturas vorticiais produzidas na ponta das pás e pelo cubo do rotor.

Para analisar a influência das esteiras turbulentas em relação a performance da turbina, há duas características principais em nível de engenharia [26]:

- Déficit de Velocidade: Está relacionado a perda de energia da turbina, em que quanto maior este déficit maior é a energia cinética extraída do escoamento;
- Intensidade de Turbulência: Está diretamente relacionado com a eficiência de turbinas instaladas a jusante (Eficiência de parques eólicos) ;

A esteira de turbinas é comumente dividida em esteira próxima e distante [33], porem existe estudos [4, 57] que consideram a existência de uma região intermediária como exemplificado na figura 2.7.

A esteira próxima é a região que compreende uma distância de até três diâmetros de rotor a jusante [33], onde a geometria da turbina bem como o número de pás, a aerodinâmica dos perfis das pás, efeitos tridimensionais dos vórtices de ponta de pá são determinantes na forma da esteira e conseqüentemente na performance da turbina [33, 58]. É na zona próxima em que a intensidade de turbulência atinge seu ponto de máximo e decai a jusante do escoamento devido ao colapso das estruturas vorticiais [58]. O final desta região é caracterizado quando a pressão local se iguala a pressão ambiente.

Na região da esteira intermediária, a difusão turbulenta se inicia na camada de cisalhamento, que se forma devido as diferenças de velocidade da região interna e externa da esteira (Escoamento não perturbado), no qual o tubo de corrente que delimita da região de esteira aprecia um aumento de sua seção transversal devido ao acréscimo da difusão turbulenta [59].

As estruturas criadas nessa camada de cisalhamento começam a se difundir e a região de mistura causada pela camada cisalhante se concentra em um formato anular na camada limite da esteira. Devido a existência de tais estruturas a intensidade de turbulência não é uniforme, onde é maior na parte superior da turbina e menor na região próxima ao solo [57, 58]. A região intermediária inicia-se a uma distância de três diâmetros a jusante e termina quando a camada de mistura atinge a linha axial do eixo do rotor [4, 57].

A região da esteira distante é onde os efeitos da geometria da turbina são menos relevantes, porém tal região está mais suscetível à interações com a topografia e esteiras de outras turbinas instaladas próximas. De forma resumida, a esteira próxima está relacionada à performance individual da turbina, enquanto a esteira distante é relacionada à performance de arranjos como uma fazenda eólica. A física deste escoamento é principalmente determinada pela convecção e difusão turbulenta. Esta comumente se inicia a uma distância de 5 diâmetros de rotor a jusante.

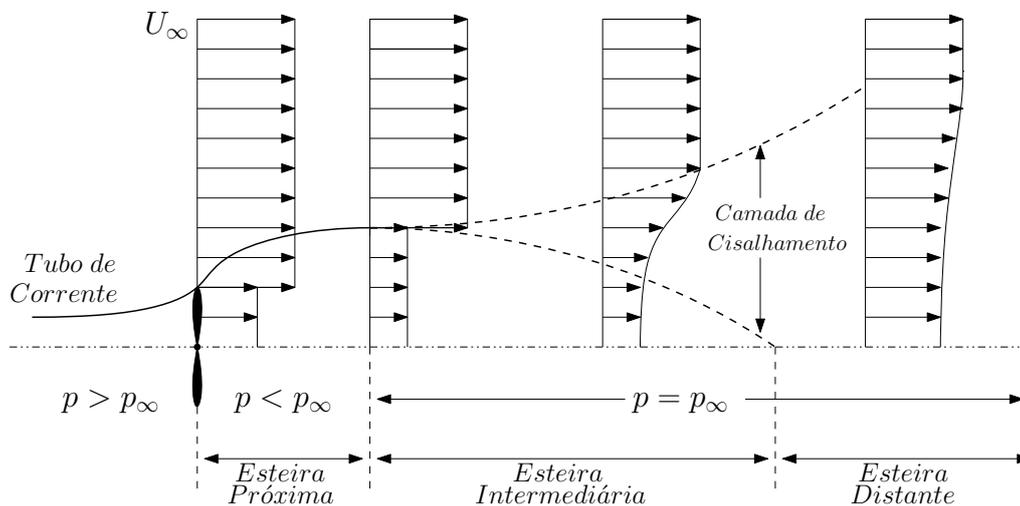


Figura 2.7 – Distribuição espacial das regiões de esteira próxima, intermediária e distante. Adaptado [4]

### 2.3.6 Confinamento de rotores e efeito de bloqueio

Ao contrário de uma turbina eólica exposta ao ar livre sem um limite distante do solo, os fluxos de vento em uma seção de teste fechada de um túnel de vento são diferentes porque as quatro paredes servem como limites. A distância do corpo de prova ao limite do fluxo da seção de teste do túnel de vento é geralmente menor do que em uma condição real de operação em ambientes naturais, resultando em um efeito de bloqueio [60].

O efeito de bloqueio pode ser dividido em bloqueio sólido e bloqueio de esteira. Um bloqueio sólido ocorre devido à diminuição da área para passagem de vento devido ao rotor, dentro do túnel de vento; além disso, depende da taxa de bloqueio definida pela razão entre a área projetada do rotor e a área da seção transversal do túnel de vento. A velocidade do

vento aumenta e a pressão diminui para satisfazer a equação de Bernoulli, em que a massa que flui através da área reduzida pelo corpo de prova deve ser constante. A velocidade do vento aumenta temporariamente perto da região do rotor, após passar pelo rotor, o efeito de bloqueio sólido diminui e a velocidade do vento é restaurada para uma condição de fluxo de ar livre. Para a mesma taxa de bloqueio, sabe-se que o efeito do bloqueio sólido é maior em uma seção de teste fechada do que em uma seção de teste aberta [60].

A operação de um rotor em um estado de confinamento pode se desviar da teoria do disco atuador tradicional devido à proximidade do rotor e da superfície. A figura 2.8 mostra o caso geral de operação do rotor e o canal de área  $A_c$ . A partir da equação da continuidade, podemos ver que o fluxo ao longo do duto deve ser constante. A subvelocidade resultante é causada pela presença de turbinas acelerando o fluxo próximo ao rotor. Observa-se que na saída do canal a velocidade é recuperada, similarmente à teoria do disco atuador, porém, para o caso do rotor confinado, a condição de recuperação de pressão não será mantida, pois uma evolução posterior do fluxo a jusante, por mistura lateral, para um eventual regresso a uma velocidade uniforme lateralmente  $u_0$ , com uma pressão  $p_5$  que agora é diferente da pressão a montante  $p_0$  [5].

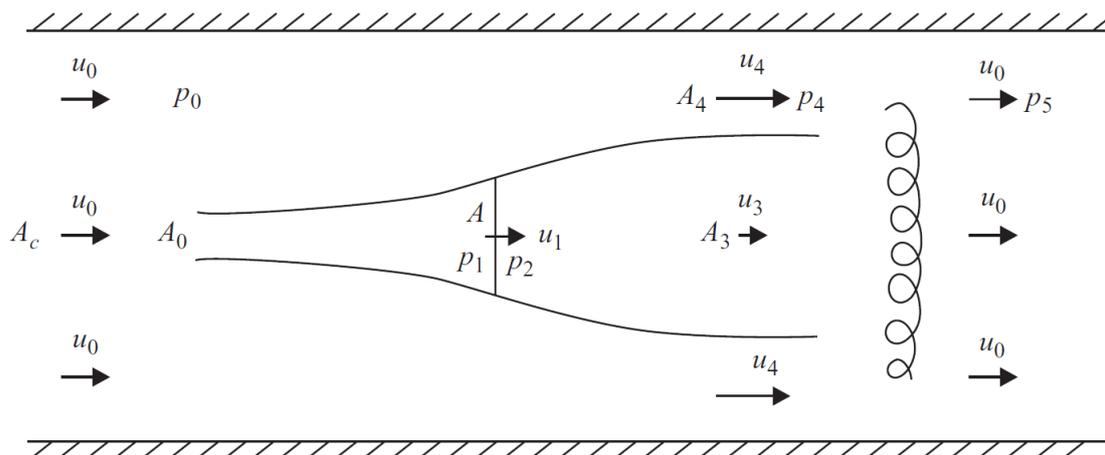


Figura 2.8 – Disco atuador para turbinas confinadas em canais[5].

Aplicando-se o balanço do momento linear no volume de controle entre o começo do canal e o final do tubo de corrente e utilizando a equação de Bernoulli em uma linha de corrente externa ao tubo de corrente, respeitando as mesmas considerações nas regiões da esteira no caso do limite de Betz, obtêm-se uma expressão para a potência máxima obtida na situação de confinamento, apresentada na equação 2.59.

$$P_{max} = \frac{16}{27}(1 - \beta)^{-2} \frac{1}{2} A u_0^3 \quad (2.59)$$

Sendo  $\beta = A_1/A_c$ . Comparando as potências máximas entre os casos sem e com canal lateral, nota-se a presença de um termo extra dividindo o caso confinado, e como  $0 < (1 -$

$\beta) < 1$ , evidencia-se que o confinamento da turbina é capaz de aumentar sua potência, sendo até mesmo possível ultrapassar o limite de Betz [5].

Alguns métodos de correção do efeito de bloqueio foram propostos. Um exemplo é método de correção proposto por Bahaj et al.[61], o qual é baseado em um modelo de disco atuador. Este método é usado para corrigir a potência de saída e o TSR usando o fator de bloqueio, que é a razão entre a velocidade do vento da seção de teste vazia e a da turbina eólica. O coeficiente de potência pode ser corrigido multiplicando o coeficiente de potência original pelo cubo do fator de bloqueio. O fator de bloqueio, coeficiente de potência e TSR são expressos respectivamente usando as equações 2.60, 2.61 e 2.62;

$$B_f = \frac{U_t}{U_f} \quad (2.60)$$

$$C_{Pf} = C_{Pt} B_f^3 \quad (2.61)$$

$$\lambda_f = \lambda_t B_f, \quad (2.62)$$

nas quais,  $U_t$  é a velocidade do vento no túnel com a turbina ( $m/s$ ),  $U_f$  é a velocidade do vento no túnel sem a turbina ( $m/s$ ),  $C_{Pf}$  é o coeficiente de potência na condição de fluxo livre sem influências adversas,  $C_{Pt}$  é o coeficiente de potência na condição do túnel de vento,  $\lambda_f$  é o TSR na condição de fluxo livre e  $\lambda_t$  é o TSR na condição do túnel de vento. O fator de bloqueio é uma excelente medida de como a velocidade do vento varia devido aos efeitos do bloqueio. A razão de bloqueio (BR) é definida como a razão entre a área projetada do modelo e a seção de teste do túnel de vento.

## 2.4 RUGOSIDADE

A rugosidade pode ser definida como um conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície [62]. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, exemplo o rugosímetro. Na atualidade, a caracterização de rugosidade de uma superfície é feita baseada na norma ABNT - NBR ISO 4287 [62], válida desde 2002, e suas outras seis complementares, a exemplo da ABNT - NBR ISO 4288 [6]. Nelas é tratado o método do perfil, expondo definições, parâmetros da rugosidade e regras juntamente com procedimentos para avaliação de rugosidade. Existem alguns parâmetros de rugosidade, que são metodologias de tipificação de rugosidade, que podem ser calculados. Nessa seção serão apresentados os principais parâmetros e os mais utilizados de acordo com as normas citadas.

### 2.4.1 Parâmetro de rugosidade média ( $R_a$ )

A rugosidade média ( $R_a$ ), figura 2.9, é definida como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento ( $z_i$ ), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição ( $l_m$ ). Esta grandeza pode ser representada como sendo a altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas entre o perfil de rugosidade e a linha média, tendo por comprimento, o percurso de medição ( $l_m$ ),

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |z(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i|. \quad (2.63)$$

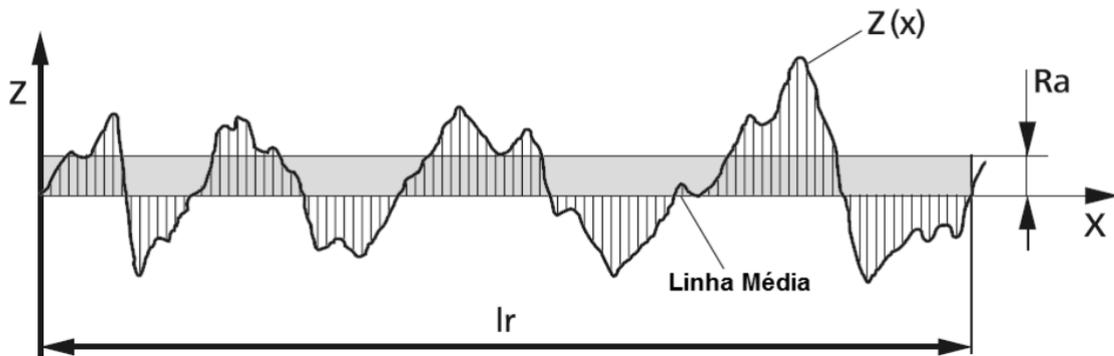


Figura 2.9 – Parâmetro de amplitude  $R_a$  [6].

O parâmetro  $R_a$  é um valor médio, podendo as vezes, não dar indicação precisa do estado da superfície. Valor de  $R_a$  em um comprimento de amostragem representa a média da rugosidade, por isso, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando tal defeito. Esse parâmetro não define a forma das irregularidades do perfil, dessa forma poderemos ter um mesmo valor de  $R_a$  para superfícies originadas por processos diferentes.

### 2.4.2 Parâmetro de profundidade da rugosidade ( $R_t$ )

A profundidade total da rugosidade ( $R_t$ ), também conhecida como altura total do perfil, figura 2.10, é calculada como a soma da maior altura de pico  $Z_p$  e a maior profundidade de vale  $Z_v$  obtidas no comprimento de avaliação.

### 2.4.3 Parâmetro de altura máxima ( $R_z$ )

De acordo com a ISO4287:2002 [62], o parâmetro  $R_z$  corresponde a soma da altura máxima dos picos do perfil  $Z_p$  e a maior das profundidades dos vales do perfil  $Z_v$ , no comprimento de amostragem, figura 2.11. Quando o comprimento de avaliação é superior ao comprimento de amostragem ( $l_n > l_r$ ), então  $R_z$  corresponde a média calculada sobre os valores

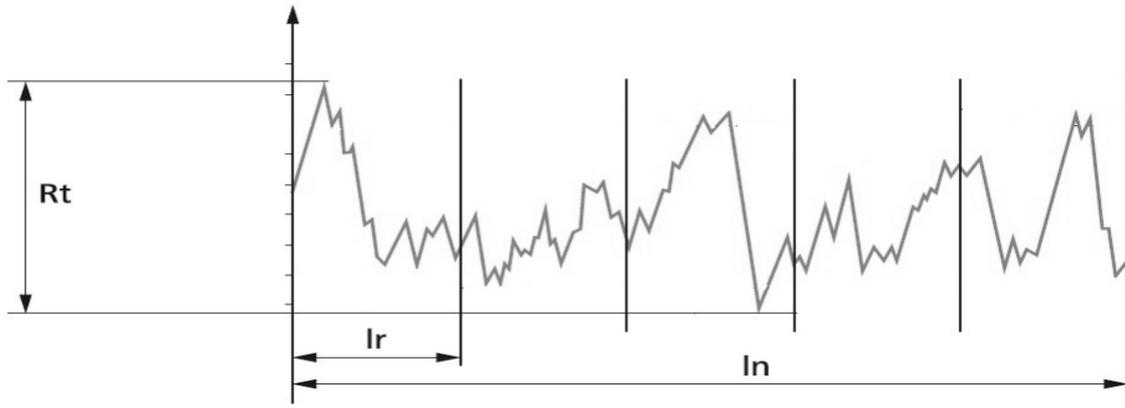


Figura 2.10 – Parâmetro de altura total  $R_t$  [6].

de  $R_z$  obtidos em cada comprimento de amostragem. Para o caso do comprimento de avaliação ser igual a cinco comprimentos de amostragem ( $l_n = 5 l_r$ ), o parâmetro  $R_z$  de acordo com a ISO 4287:1997 coincide com o parâmetro  $R_z$  da obsoleta norma DIN 4768:1974, frequentemente encontrado em rugosímetros mais antigos e com o parâmetro  $R_z$  da norma americana ASME B46.1:2009.

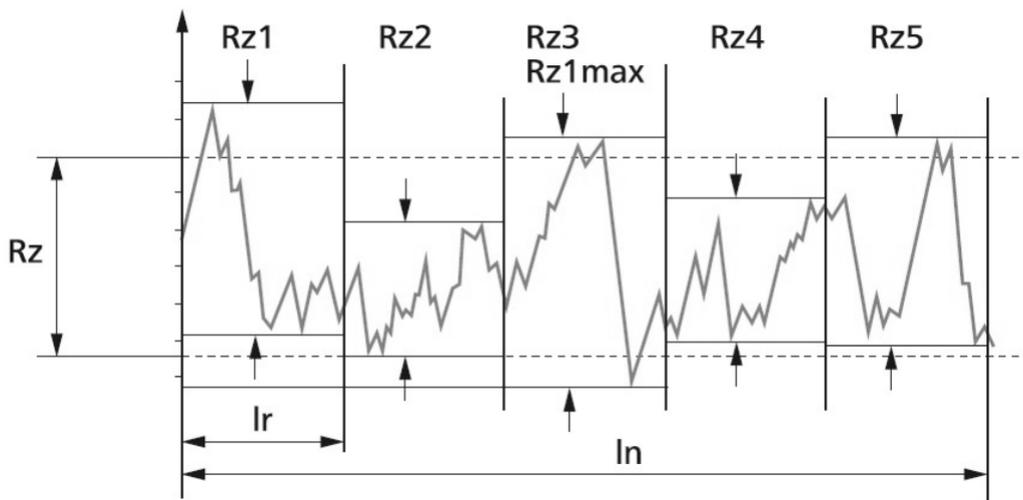


Figura 2.11 – Parâmetro de altura máxima  $R_z$  [6].

Pode ser usado nos casos em que pontos isolados não influenciam na função da peça a ser controlada, por exemplo: superfícies de apoio e de deslizamento, ajustes prensados, etc; em superfícies que o perfil é periódico e conhecido.

# 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

*Esse capítulo apresenta a metodologia utilizada, bem como os procedimentos experimentais e os instrumentos utilizados para a aquisição de dados. Algumas definições metodológicas são realizadas para embasar as decisões do processo experimental.*

## 3.1 FLUXOGRAMA EXPERIMENTAL

Nesse trabalho, optou-se por organizar cronologicamente as etapas do experimento da pesquisa com o intuito de otimizar o tempo e seguir uma ordem metodológica de construção de informações, visto que na área experimental, a maior parte do tempo dedicado ao trabalho como um todo, está associado ao tempo de bancada, que elenca montagens, testes, calibrações, aquisição de dados e manutenção de equipamento. Com o fluxograma experimental da figura 3.1, foi possível estabelecer uma direção sobre os procedimentos metodológicos a serem executados, numa linha lógica e didática. Tal modelo está em construção e pode ser adaptado para várias situações de pesquisa.

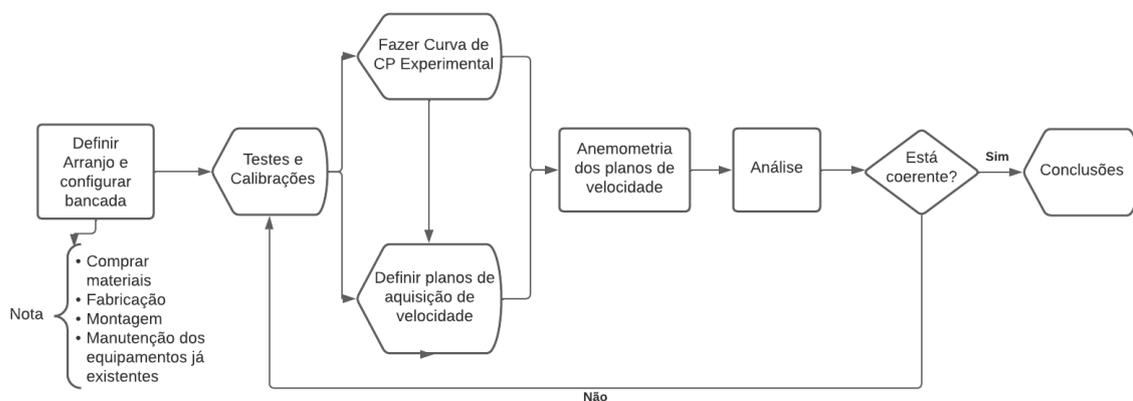


Figura 3.1 – Fluxograma de organização experimental.

## 3.2 BANCADA E INSTRUMENTOS

### 3.2.1 Túnel de vento

Os ensaios experimentais foram desenvolvidos no túnel de vento de circuito aberto do Laboratório de Energia e Ambiente da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB). A seção de testes possui dimensões de 1,2 m de altura e largura, com 2 metros de

comprimento.

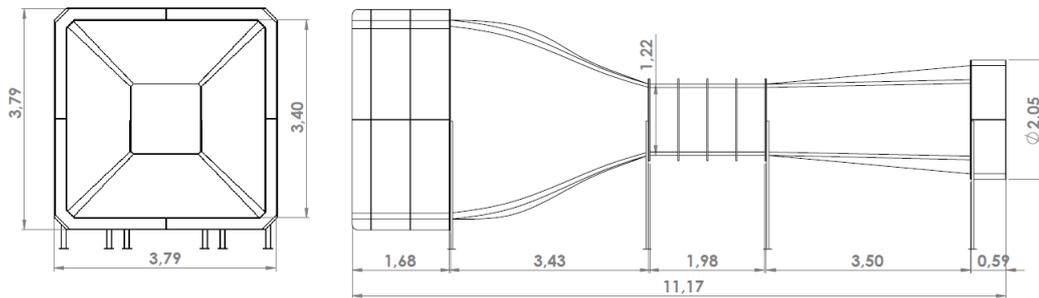


Figura 3.2 – Dimensões do túnel de vento do Laboratório de Energia e Ambiente da Faculdade de Tecnologia da UnB [7].

O ventilador se situa na saída do túnel e é acionado por um motor de indução elétrico, modelo WEG W22 de 10 HP. O ar aspirado passa por duas seções transversais de colmeias antes de alcançar a primeira redução de seção e tem sua velocidade controlada por meio do inversor CFW-09 Vectrue Inverter 10A 3CV. O fator de redução da área do bocal para a seção de testes é de aproximadamente 4:1. O escoamento é induzido por um ventilador axial, localizado na saída do túnel, capaz de gerar velocidades de operação no intervalo entre  $m/s$  e com a intensidade turbulenta menor que 1%.



Figura 3.3 – Imagem do túnel de vento do LEA-UnB.

### 3.2.2 Modelo de turbina

A turbina utilizada é um modelo em escala de aproximadamente 1/10, figura 3.4, da turbina hidrocínética *Hydro-K* [8] de 10kW de um arranjo triangular desenvolvido pelo Laboratório de Energia e Ambiente - UnB para ser implementado a jusante de barragens de usinas hidroelétricas, fabricada pela Aeroalcool Tecnologia Ltda.



Figura 3.4 – Foto do rotor utilizado nos ensaios em túnel de vento desenvolvido por Junior et al.[8].

O rotor possui 225 mm de diâmetro, figura 3.5, e 4 pás do perfil NACA 4415, com um disco metálico reflexivo com quatro abas ortogonais. Acoplado à nacele da turbina está instalado um sensor ótico reflexivo TCRT 5000, este capta a rotação do rotor e está fixo na no interior da nacele e posicionado a 90 graus do disco, e o movimento do rotor faz o sensor perceber a interrupção do disco numa resolução de 0,1 rpm.

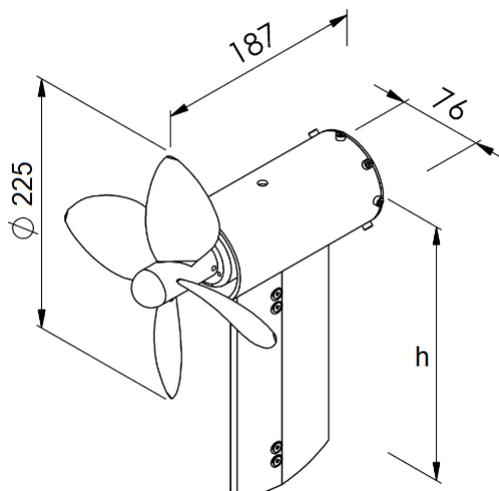


Figura 3.5 – Modelo em escala de aproximadamente 1/10 da turbina hidrocínética Hydro-K, unidades em mm.

A turbina possui um sistema de freio controlado por um algoritmo *PID* (Proporcional-Integral-Derivativo) com um sistema de malha fechada para o controle da rotação e torque, e a comutação do transistor é feita com a técnica de modulação por largura de pulso, mais conhecida como *PWM* (*Pulse Width Modulation*). Um melhor detalhamento sobre o sistema de torque e rotação foi feito por Mendes [9]. Há dois conjuntos de Arduinos, um para controlar a rotação da turbina pelo controle do freio por um algoritmo *PID*, outro para controlar o posicionador da sonda.

### 3.2.2.1 Condições de operação do modelo de turbina

O modelo de turbina HK-10 foi dimensionado em uma escala de 1/10 do protótipo de turbina hidrocínética desenvolvida pelo laboratório de Energia e Ambiente - LEA UnB. As características do modelo em escala e do protótipo estão apresentadas na 3.1. O comprimento característico para calcular o número de Reynolds do modelo em escala foi a posição do início do túnel de vento até a posição do rotor, localizado a 0,7 m da entrada da seção de testes, e os dados do protótipo foram retirados de Junior et al.[8].

Tabela 3.1 – Características geométricas e condição de operação do modelo em escala e do protótipo real.

Características	Modelo em escala	Protótipo HK-10	und
Raio	0,1125	1,1	m
$U_{\infty}$	10	2,5	m/s
$\omega$	1000	35	rpm
Re	$4,8 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^6$	adm

### 3.2.3 Suporte de ajuste da altura da torre

Uma torre com 470 mm de altura com um perfil aerodinâmico foi utilizada para montar a turbina, a qual, além de ser um suporte estrutural, é responsável por integrar o gerador, todos os sensores e cabeadamentos. Essa torre possui um suporte em sua base que, através de um furo com o exato perfil da torre feito na superfície do solo, é possível variar a altura de seu posicionamento no interior do túnel de vento, mostrado na figura 3.6.

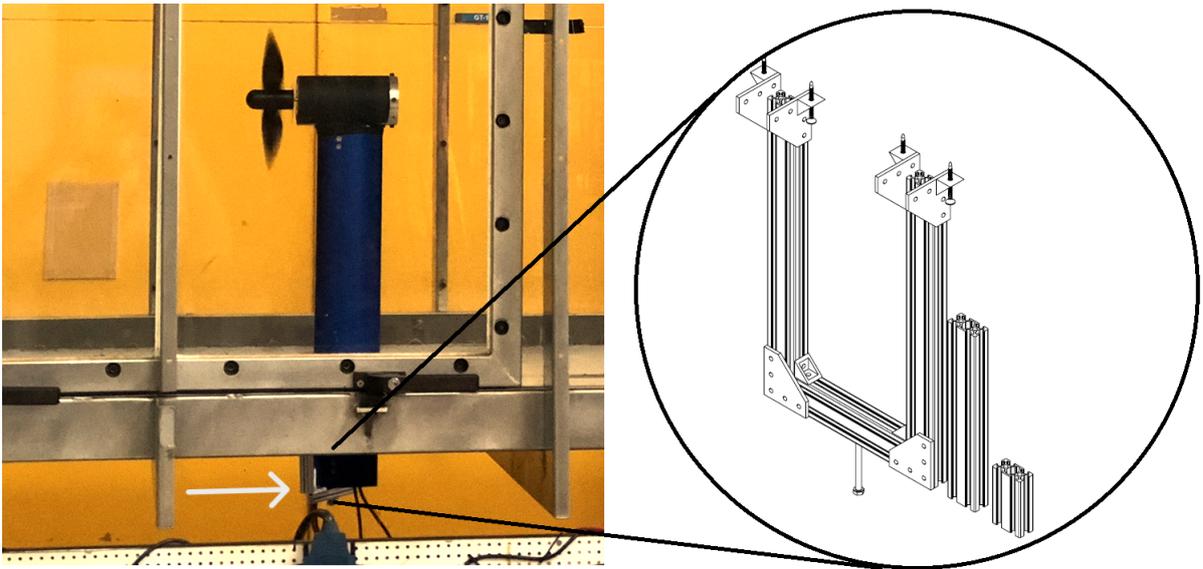


Figura 3.6 – Suporte para variar altura da torre apontado pela seta branca e ampliado em perspectiva.

Foram utilizados perfis de alumínio do tipo V-slot, figura 3.7. A altura dos dois perfis laterais se alteram de acordo com a altura desejada para o experimento. Para obter a menor altura de rotor dentro do túnel de vento previamente determinada, utilizou-se os perfis de 370 mm. Para uma altura intermediária, utilizou-se os perfis de 220 mm nas laterais. Para obter a maior altura de rotor, utilizou-se os perfis de 70 mm. A fixação da torre é feita por um parafuso em sua base. O furo passante na superfície do túnel de vento possui um ajuste por contato de modo que a torre consiga se suspender por atrito, funcionando como um apoio lateral para que a torre não incline-se. Os cabos do torquímetro e dos sensor de rotação passam por dentro da torre e saem na base inferior que é vazada, sendo direcionados para a bancada dos computadores por uma guia de cabos.

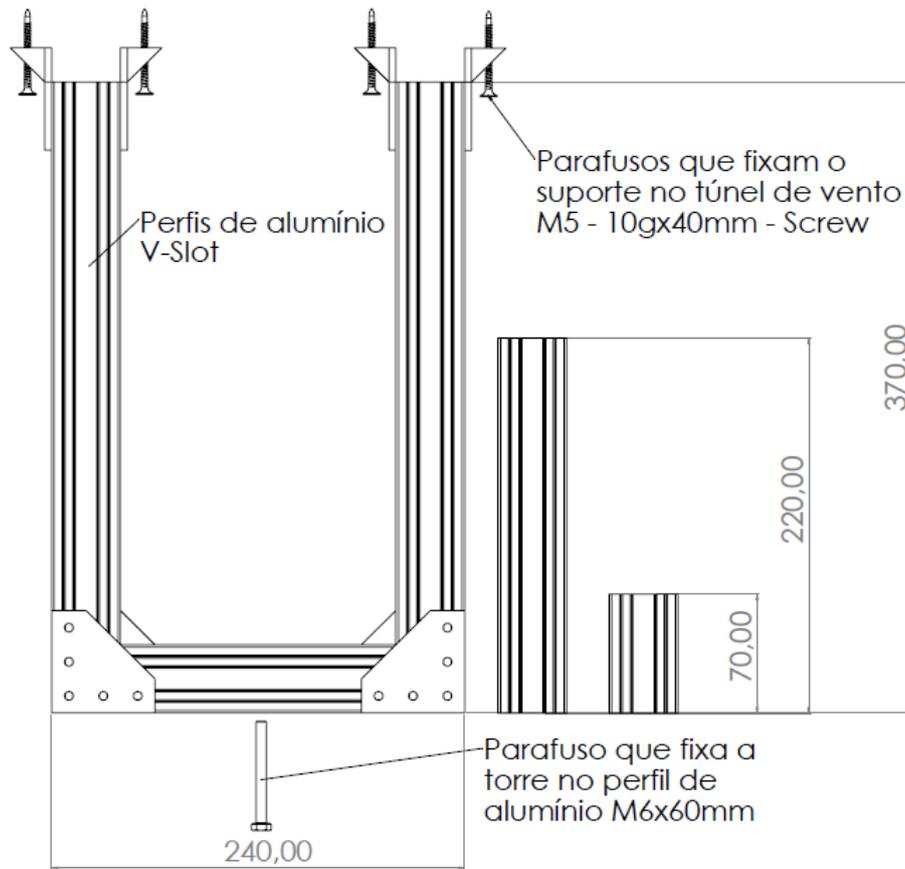


Figura 3.7 – Dimensões do suporte para variar altura da torre.

### 3.2.4 Posicionador da sonda

O posicionador da sonda foi desenvolvido por Mendes[9] e Macías[7], em parceria com estudantes de graduação do Laboratório de Energia e Ambiente. Este é composto por um carro de movimentação transversal horizontal (Eixo  $y$ , Figura 3.8) sobre dois trilhos, controlado por um motor de passo com 24 passos por milímetros e com uma incerteza de  $\pm 0,0416$  mm. Já o carro de movimentação transversal vertical (Eixo  $z$ ), o qual a sonda está fixada, translada em um único trilho fixo no carro anterior, sendo movimentado por um motor de passo com 400 passos por milímetro e uma incerteza de  $\pm 0,0025$  mm.

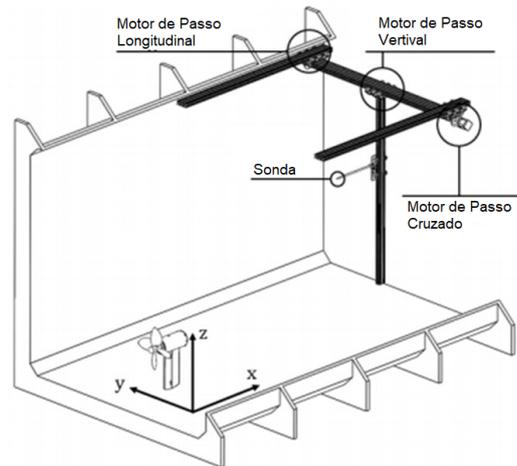


Figura 3.8 – Sistema Posicionador da Sonda dentro do Túnel. Adaptado de Mendes[9]

### 3.3 ANEMOMETRIA A FIO QUENTE

A anemometria de fio quente é uma técnica experimental aplicada para realização de medição de velocidades de um escoamento, a qual é útil no estudo da turbulência, pois este consegue medir as flutuações instantâneas de velocidade do escoamento, ao contrário do convencional tubo de Pitot, que devido às suas características construtivas e seu princípio físico (manométrica), não possuem a resolução necessária para captar ordem de grandeza das flutuações de um escoamento turbulento. Tal medida da flutuação de velocidade é feita com base na transferência de calor entre o elemento sensível (fio, lamina...) com o meio fluido.

A relação entre a velocidade do escoamento com a perda de calor de um fio cilíndrico é feito sobre as hipóteses de um escoamento incompressível, com trocas de calor por radiação do fio e por condução para os suportes desprezíveis, a temperatura do fio  $T_f$  é uniforme em todo o fio, a temperatura do fluido é constante e o fio possui um diâmetro pequeno o suficiente para assumir que este não perturba o escoamento, aproximando-se de um escoamento potencial.

O anemômetro de fio quente (AFQ) é um transdutor capaz de perceber mudanças no regime da troca de calor de um pequeno fio, eletricamente aquecido, exposto a um fluido em movimento. De forma prática, seu funcionamento funcional de tal forma que a resistência do fio do anemômetro sofre uma variação de acordo com sua temperatura, que por sua vez, é influenciada pela velocidade do escoamento [63]. Deste modo, a ligação do fio quente do anemômetro a uma ponte de Wheatstone irá gerar um sinal de tensão proporcional à velocidade do escoamento.

Algumas das vantagens do anemômetro de fio quente é que o elemento sensível do anemômetro tem dimensões  $5 \mu m$  de diâmetro com um comprimento de  $3 mm$ , produzindo

perturbações reduzidas (ou insignificantes) no escoamento através do rotor de 225 mm, a resposta dinâmica do fio quente é elevada, podendo chegar até 400 kHz, sua sensibilidade é de 0,01 m/s e há possibilidade de realizar medições em lugares distintos com o auxílio de um posicionador [9].

O sistema de aquisição de dados é composto por uma cadeia de equipamentos os quais são apresentados em sequência, figura 3.9. A sonda é fixa ao posicionador pelo suporte da sonda, o qual deve ser longo o suficiente para minimizar as interferências no campo de velocidades pela presença do posicionador. O cabeamento da sonda é composto por fios blindados. O anemômetro de temperatura constante, por meio de seu circuito eletrônico mantém a temperatura no fio constante, além de realizar ajustes de ganho e aplicação de filtros. A placa A/D converte o sinal de analógico para digital, para enfim ser analisado pelo computador.

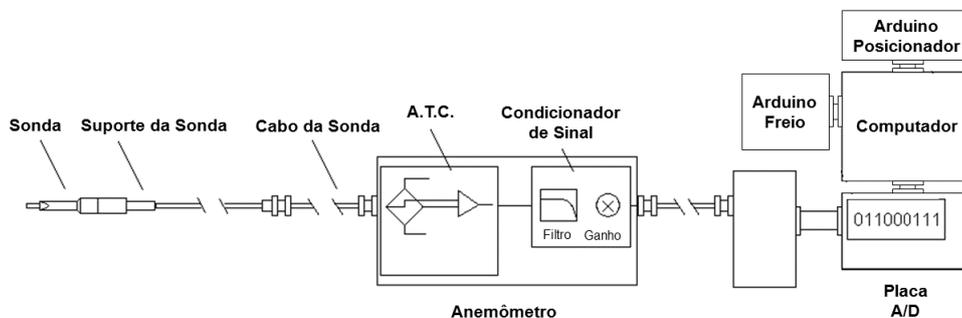


Figura 3.9 – Esquemático da cadeia de equipamentos para o sistema de aquisição. Adaptado [10], pg. 6.

A sonda anemométrica é conectada a uma ponte de Wheatstone de fio quente através de um sistema de realimentação e esta realiza a medição da variação da corrente durante o experimento. A ponte se conecta ao condicionador de sinal para amplificação de sinal e eliminação de ruído. O sinal é enviado para um conversor analógico-digital que converte o sinal analógico em digital, permitindo a aquisição de dados. Tal sistema pode ser visualizado na figura 3.9.

O anemômetro de temperatura constante utilizado foi o Mini CTA 54T30 da DANTEC DYNAMICS. A placa de conversão de dados analógico-digital utilizada é a NI PCI-4472 da NATIONAL INSTRUMENTS, com 4 canais, frequência de aquisição máxima de 102,4 kHz e mínima de 1,0 kHz.

### 3.3.1 Sonda

Os três arranjos de sondas mais comuns são uni, bi e tridimensionais, onde para cada elemento sensível é possível obter uma composição planar de vetores velocidade, ou seja, a

sonda tridimensional capta as três componentes de velocidades, a bidimensional capta duas componentes, figura 3.10.

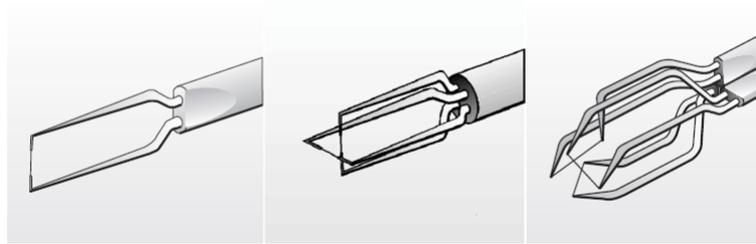


Figura 3.10 – Arranjos Uni, Bi e Tridimensionais de Sondas Fonte: [10]

A sonda unidimensional, por lógica captaria uma única componente, porém ela capta o módulo das componentes  $U_x$  e  $U_y$  contidas no plano perpendicular a direção axial do fio, figura 3.11. Porém essa informação não é processada separadamente, sendo assim, o dado analógico corresponde à resultante da velocidade do ar.

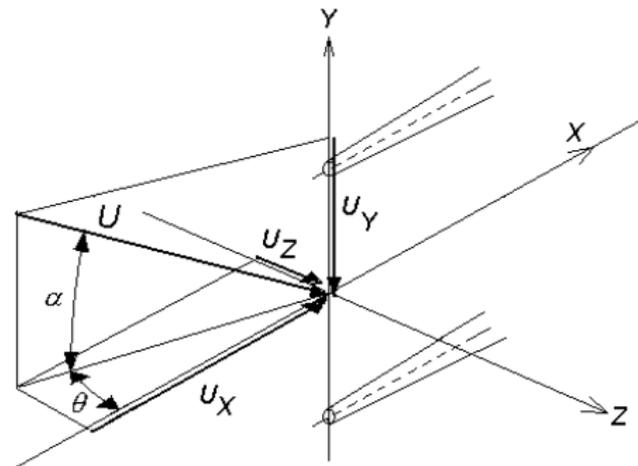


Figura 3.11 – Decomposição das componentes cartesianas de velocidades incidentes na sonda unidimensional. Fonte: [10]

A sonda é a parte sensível do anemômetro, ela é composta por um fio metálico, com o diâmetro na ordem dos micrômetros e um suporte metálico para condução do sinal. Existe uma diversidade de geometrias e arranjos de sondas para anemômetro e a escolha do modelo a ser utilizado está ligada às necessidades de cada experimento. O principal parâmetro para definição da sonda é a quantidade de componentes do vetor velocidade se deseja medir, onde, em geral, se decide a número de fios a sonda irá ter. Cada fio da sonda responde, ao mesmo tempo, a duas componentes cartesianas do vetor velocidade, não sendo possível separá-los [9].

Devido a delicadeza da sonda anemométrica, o filamento tende a se romper com toques

abruptos, batidas e partículas sólidas do escoamento que podem ir ao encontro dela. Sendo assim, sua manutenção é feita no próprio laboratório pelo pesquisador que a está utilizando, caso haja o rompimento. A manutenção ocorre pela solda do filamento por eletrodos com microscópio, que pode ser visualizada na figura 3.12. Na imagem é possível observar a sonda, em formato de garfo, o eletrodo indo em direção a sonda e o filamento atravessando entre os dois.

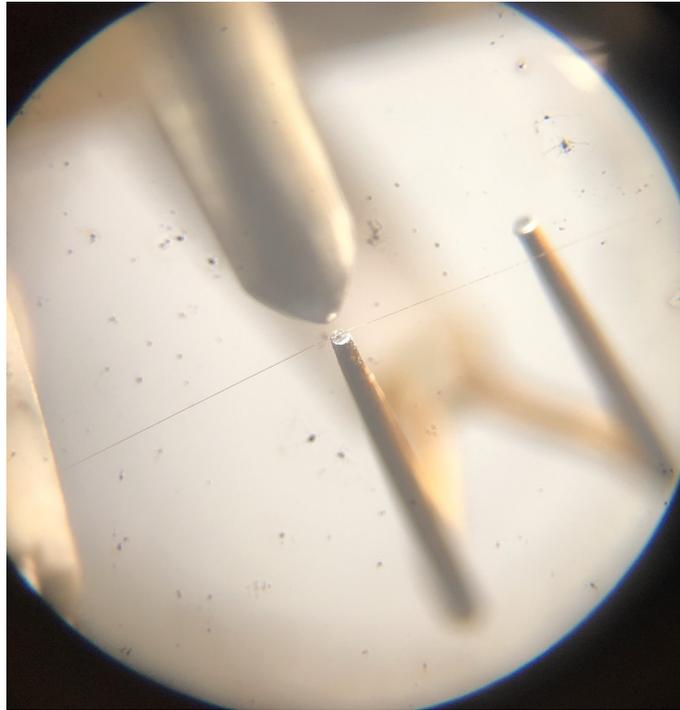


Figura 3.12 – Procedimento de solda do filamento na sonda.

## 3.4 PROCEDIMENTOS

### 3.4.1 Arranjos experimentais

As turbinas são posicionadas à 700 mm do início da seção de teste, medido no plano do rotor. São duas configurações de arranjos, os quais estão representados na figura 3.15, e sintetizados a seguir.

1. **Arranjo I:** Arranjo com superfície lisa, em que os ensaios foram feitos com a superfície da seção de teste sem nenhum elemento rugoso.
2. **Arranjo II:** Arranjo com superfície rugosa, no qual foram posicionadas ao longo da superfície correntes de plástico espaçadas geometricamente iguais, com o objetivo de produzir um escoamento rugoso.

Para cada arranjo de superfície foram ensaiadas três alturas diferentes entre o eixo do rotor e a base do túnel de vento, nos quais são definidas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Alturas do eixo do rotor em relação a superfície

<b>Altura</b>	<b>distância eixo/solo</b>
$h_1$	145 mm
$h_2$	445 mm
$h_3$	295 mm

A altura  $h_1$  é a posição em que o rotor fica o mais próximo possível da superfície sem que a ponta da pá possa tocar as correntes, sendo assim, como todas as outras alturas, permaneceu-se as mesmas para os dois arranjos. A altura  $h_2$  está mais distante do solo, em que o eixo do rotor está mais próximo do centro do túnel, mas também ainda sobrou uma parte da torre na parte exterior e inferior do túnel suficiente para realizar o ajuste de fixação. Além dessas duas alturas extremas, inicialmente optou-se também aferir medidas em uma altura intermediária às outras,  $h_3$ , numa tentativa de observar efeitos de transição entre as duas alturas.

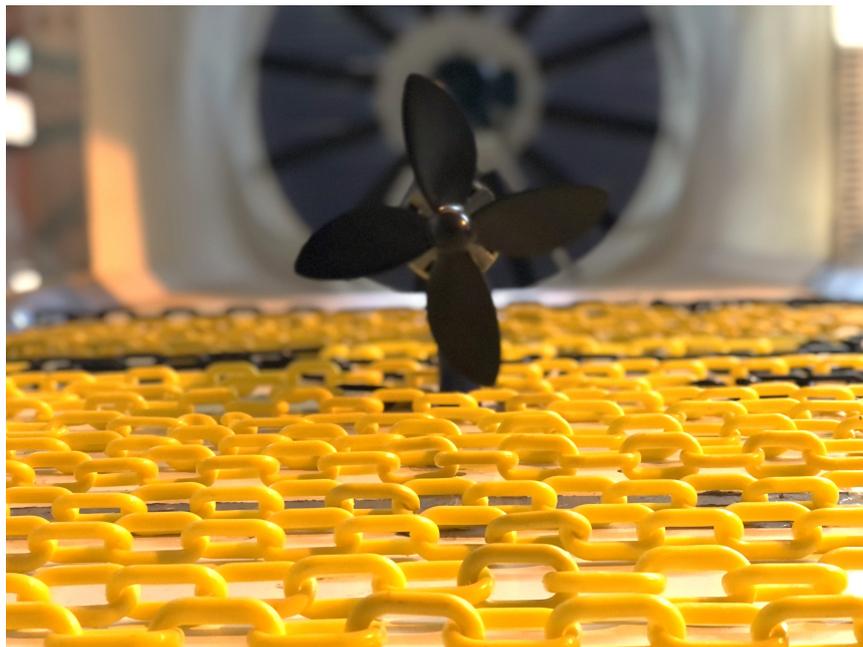


Figura 3.13 – Foto do arranjo 2 para uma posição  $h_1$  mais próxima da superfície.

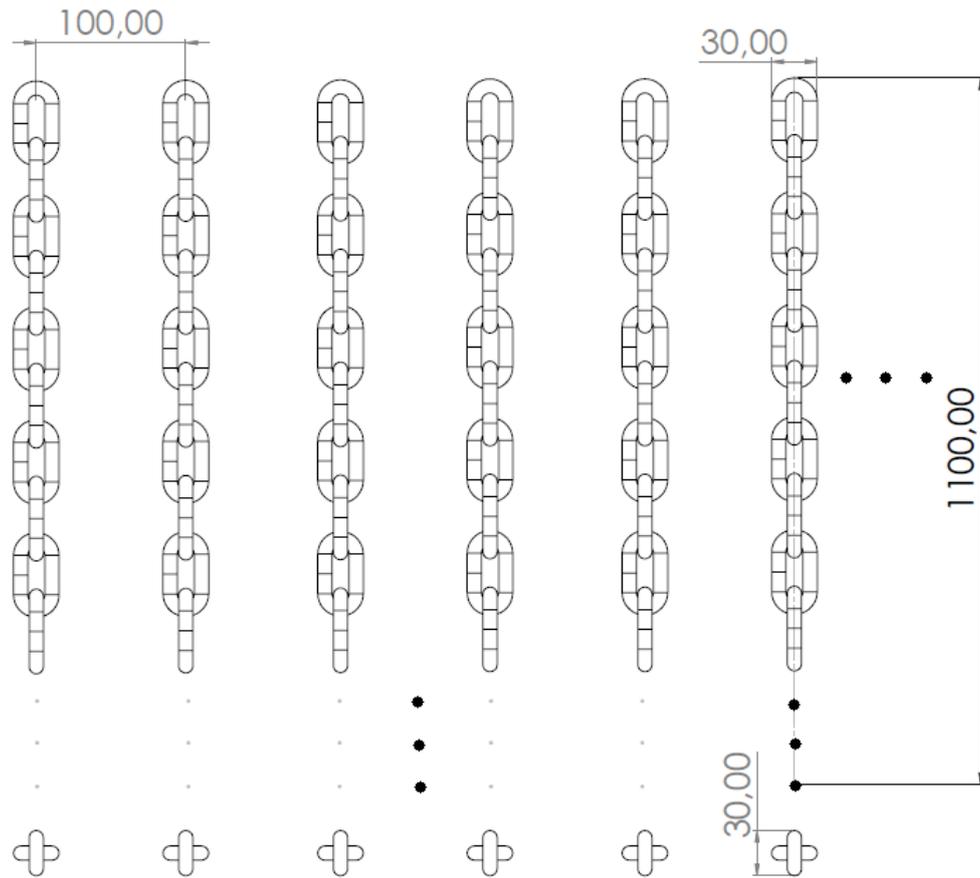


Figura 3.14 – Esquema da disposição das correntes no túnel de vento, com dimensões em milímetro.

Para o arranjo 2, as correntes utilizadas foram colocadas ao longo do eixo  $y$ , com espaçamento  $\Delta d_c = 100 \text{ mm}$  e uma altura de  $\Delta h_c = 30 \text{ mm}$ . As correntes possuem um comprimento de 1,1 m e são fixadas, com auxílio de abraçadeiras metálicas parafusadas no chão do túnel, perpendicularmente em relação a direção do fluxo de ar. Cada elo da corrente possui uma espessura de 6 mm e seu material é polietileno.

### 3.4.2 Ensaio do coeficiente de potência

Após determinados os arranjos experimentais, inicia-se os ensaios do coeficiente de potência,  $C_p$ , da turbina que é calculado pela razão da potência no eixo e a potência disponível do escoamento, dado por

$$C_p = \frac{\omega \tau}{0.5 \rho A (U_\infty)^3}, \quad (3.1)$$

no qual  $\omega$  é a velocidade de rotação do rotor em  $rad/s$ ,  $\tau$  é o torque no eixo do rotor em  $N.m$ ,  $\rho$  é a densidade, com unidade de  $kg/m^3$ ,  $A$  a área do rotor, sendo uma constante igual a

$0.039 m^2$ ,  $U_\infty$  a velocidade do escoamento medida pelo tubo de Pitot e manômetro em  $m/s$ , figura 3.16.

Deve-se obter, com este ensaio, uma curva do coeficiente de potência em função do número adimensional da velocidade da pá, TSR. De acordo com a Equação 2.46, existem duas possibilidades para variação do TSR: a primeira modificando a velocidade do escoamento,  $U_\infty$ , e a outra a partir da variação da rotação do rotor,  $\omega$ . No presente trabalho, foi escolhido a variação pela rotação do rotor visando permanecer na mesma faixa do número de Reynolds, fixando-se a velocidade do escoamento como o padrão para todos os ensaios.

### 3.4.3 Coleta de dados de velocidade

É comum utilizar a razão da velocidade de ponta da pá  $\lambda$  no estudo de turbinas. Este valor adimensional relaciona a velocidade tangencial na ponta da pá com a velocidade do fluxo não perturbado a montante. Para a turbina utilizada neste trabalho, a curva do coeficiente de potência foi caracterizada e uma média  $\lambda$  de 1,65 foi calculada para uma rotação do rotor de 1000 rpm.

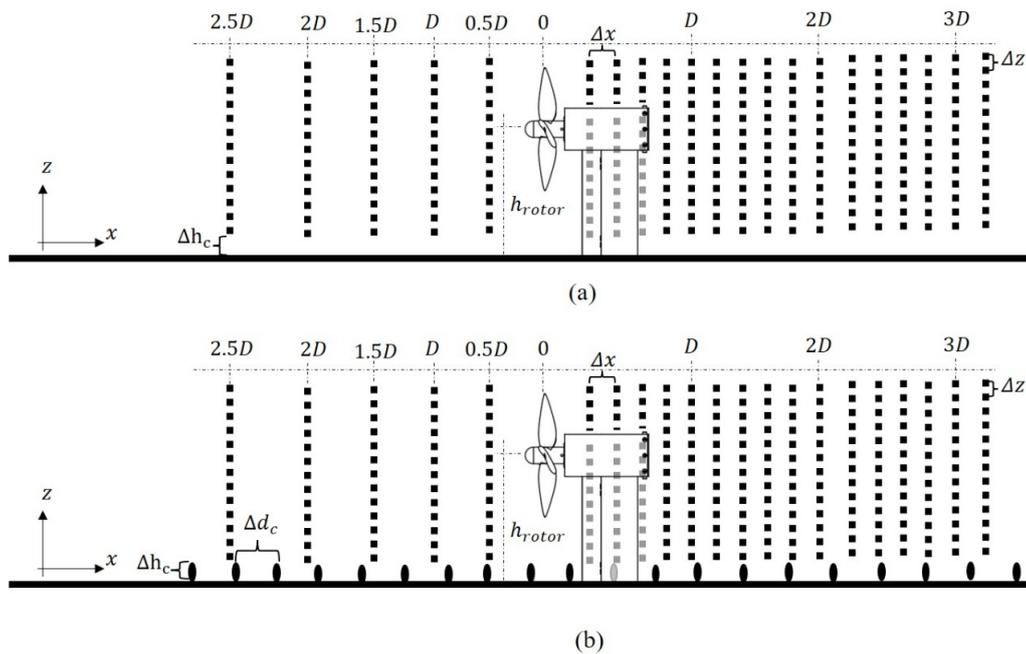


Figura 3.15 – Grade de pontos de aquisição do anemômetro para os arranjos experimentais (a) com superfície lisa e (b) com superfície rugosa.

A turbina foi submetida a um escoamento a uma velocidade  $U_\infty = 9m/s$ , e uma rotação do rotor controlada a 1000 rpm, para todos os ensaios experimentais, e por meio de anemometria automatizada de fio quente, figura 3.8. Realizou-se uma a aquisição da velocidade no plano XZ, para um incremento de  $\Delta_x = 20 mm$  e  $\Delta_z = 10mm$ .

Tabela 3.3 – Parâmetros do plano de aquisição

	Arranjo I	Arranjo II
$\Delta_x$	0,2D	0,2D
$\Delta_z$	0,044D	0,044D
$z_0$	5 mm	35 mm
$x_0$	0,2D	0,2D

Os dados dos espaçamentos em x e z na tabela 3.3 estão adimensionalizados com o diâmetro do rotor. O plano de aquisição foi definido em 50% da pá da turbina ortogonal ao eixo Y, podendo-se encontrar efeitos de energia cinética de maior intensidade [26, 64].

### 3.4.4 Calibração de Velocidade

A calibração de velocidade do anemômetro é feita com o auxílio de um tubo de Pitot fixo, instalado no canto superior a 20 cm do início da seção de teste, 14 cm da parede lateral e 10 cm da parede superior. A pressão dinâmica foi medida através da diferença da pressão estática e a pressão total com um manômetro de coluna inclinada com resolução de 0,05 mmH<sub>2</sub>O, com um fundo de escala de 12,5 mmH<sub>2</sub>O. Por ser um instrumento muito delicado, a calibração do anemômetro é um procedimento fundamental para encontrar bons resultados durante o experimento.

O procedimento de calibração consiste em excitar a sonda com um escoamento de baixa intensidade de turbulência e em uma faixa de velocidades conhecidas. São realizadas 10 medidas crescentes de velocidades com o tubo de Pitot para calibrar a curva de velocidade tensão do anemômetro, posicionado no eixo central do túnel de vento a um diâmetro de rotor de distância a jusante do plano do rotor, com as turbinas sem seus respectivos rotores.



Figura 3.16 – Tubo de pitot (Esquerda) e manômetro de coluna inclinada (Direita)

O Arduino controla o posicionador da sonda, movendo a mesma para um novo ponto de coleta, onde a cada mudança de posição possui um tempo de espera para se iniciar a coleta, para que quaisquer oscilações no posicionador decorrente a sua movimentação não interfira

na aquisição.

Com todas as séries temporais coletadas, é realizada a obtenção da velocidade média, intensidade de turbulência, fatores de dessimetria e achatamento, autocorrelação temporal e densidade de energia espectral pelo algoritmo de transformada rápida de Fourier.

Dois métodos de ajuste da equação de calibração são encontrados na literatura, aplicando a lei de King e por meio de um ajuste polinomial de alta ordem, onde a escolha do método fica a escolha do operador e do experimento. Apesar da lei de King descrever muito bem a física do anemômetro, sua má calibração pode acarretar em erros desproporcionais, fato decorrido ao seu comportamento exponencial. Por outro, lado o ajuste polinomial controla melhor as incertezas, entretanto, quando executado, o ajuste polinomial só funciona no intervalo calibrado, não sendo recomendável nenhum tipo de extrapolação, devido à alta probabilidade da função oscilar fora do intervalo calibrado [10]. Com isso, utilizou-se a calibração polinomial, com a equação

$$U = C_0 + C_1E + C_2E^2 + C_3E^3 + C_4E^4, \quad (3.2)$$

em que U são os valores de velocidade, E a tensão medida e os coeficientes a serem computados na calibração são  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$ . Antes de todos os ensaios com anemometria, o processo de calibração foi realizado de forma automática, sempre com a referência de velocidade do sistema do tubo de Pitot e o anemômetro da figura 3.16. A figura 3.17 apresenta uma das curvas de calibração dos ensaios experimentais com anemometria realizados neste trabalho, sendo que o próprio software plota automaticamente no fim de cada calibração realizada. A curva vermelha que interpola os pontos é a calibração polinomial, enquanto a curva preta é a calibração pela lei de King. Os arquivos de calibração com as informações das curvas são salvos em formato de texto para serem utilizados no processamentos dos dados de velocidade posteriormente.

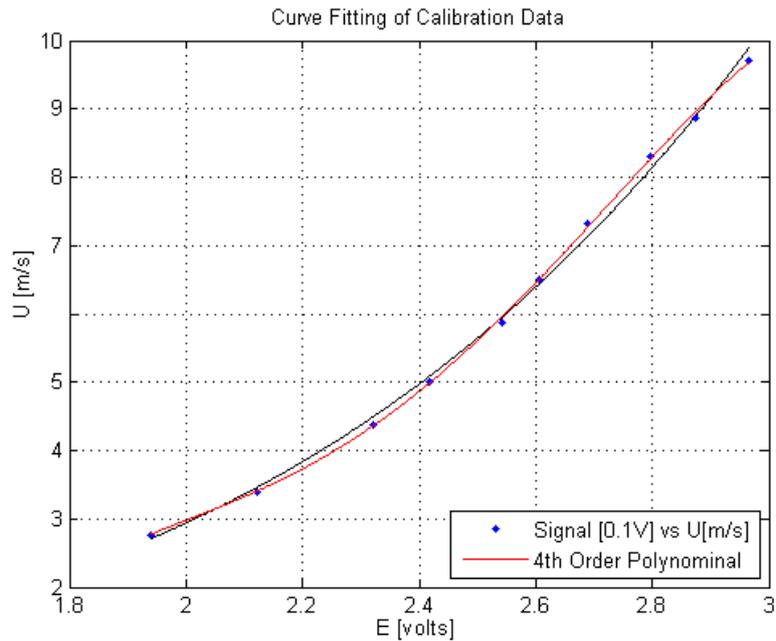


Figura 3.17 – Curva de calibração que o programa de calibração automaticamente produziu em um dos ensaios realizados neste trabalho.

### 3.5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Após a montagem dos arranjos é realizada as calibrações de torque, e antes de cada aquisição de dados de velocidade é realizada uma calibração do anemômetro. A medição do coeficiente de potência foi realizada para cada posição da máquina e cada arranjo de superfície, obtendo a curva característica  $C_p \times TSR$  para cada combinação. Os seguintes passos para a obtenção dos dados de  $C_p$  são realizados:

- Acionamento do túnel com a velocidade  $U_\infty$ ;
- Passagem controlada das rotações entre 600 e 1500 rpm, de forma automática com o sistema de freio;
- Aquisição dos dados de torque e rotação;
- Processamento e análise dos dados.

Depois da análise dos dados, é construída a curva de  $C_p$ . Em seguida, os dados de velocidade para a mesma configuração experimental é obtida, também de forma automatizada. Os seguintes passos para obtenção dos dados de velocidade são realizados:

- Acionamento do túnel com a velocidade  $U_\infty$ ;

- Configuração da taxa e do tempo de amostragem;
- Seleção do número e coordenadas dos pontos de medição;
- Calibração;
- Aquisição dos dados puros do anemômetro;
- Processamento e análise de dados.

A aquisição de dados é realizada de forma automática pelo DAQ e integrado com o software MATLAB. Todos os processamentos e análises foram realizados em linguagem de programação Python.

# 4

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

*Esse capítulo realiza a apresentação dos resultados obtidos através das análises experimentais ou por meio de cálculos, construindo uma discussão desde a formação da camada limite dentro do túnel de vento até a comparação entre os arranjos experimentais.*

### 4.1 DESENVOLVIMENTO DA CAMADA LIMITE

Com o intuito de entender e utilizar como comparações nas análises que virão, foi realizada uma estimativa da camada limite. Para isso, utilizou-se a solução de Blasius para a parte laminar sobre uma placa plana sem gradiente de pressão. Toda a análise realizada neste capítulo utiliza a mesma orientação construída na metodologia, em que considera-se a direção do fluxo como eixo X, a direção transversal perpendicular ao eixo da esteira horizontalmente como eixo Y e a direção perpendicular ao eixo da turbina verticalmente, tratada como a direção da altura da seção transversal do túnel, como eixo Z. O método de Blasius, bem como várias soluções mais recentes, são revistos em [65, 2, 66, 67, 68]. Numericamente, verifica-se que  $u = 0,99U_\infty$  em  $\eta = 4,92$ , com isso, a espessura da camada limite é considerada igual ao valor de  $y$  correspondente a 99% de  $U_\infty$ :

$$\frac{\delta}{x} = 4.92 * Re_x^{-1/2}$$

Estimou-se o ponto da região de transição ( $X_{cr}$ ) em 0,72 m, adimensionalmente na posição  $L/D = 3.2$  para  $Re_{x,cr} = 5 \times 10^5$ , considerando uma placa plana,  $L = 2m$ , com seu início na região de entrada da seção de testes. Imediatamente antes este ponto, a estimativa da maior espessura para a camada limite laminar é de aproximadamente 5mm. Para a região turbulenta, a camada limite foi estimada com uma correlação empírica para placa plana, com gradiente de pressão nulo e superfície isotérmica, como resultado:

$$\frac{\delta}{x} = 0.37 * Re_x^{-1/5}$$

É preciso levar em consideração que na parte anterior da placa,  $x < X_{cr}$  o regime é laminar e a tensão cai com  $x^{-0,5}$ , e em  $X_{cr}$  ocorre uma mudança de regime, no qual a transferência de quantidade de movimento cresce, e a tensão cisalhante cresce substancialmente, passando a cair com  $x^{-0,2}$ .

Na figura 4.1, nota-se que a posição em que o rotor foi montado nos experimentos está mais próxima do ponto de transição, podendo-se concluir que, até mesmo para o arranjo

mais próximo da superfície, o escoamento a montante da camada limite não tende a exercer interferência no rotor, pois está distante da ponta da pá, lembrando que neste arranjo, o eixo está a 145 mm da superfície e a ponta da pá a 35 mm.

Para um caso com o solo rugoso, os fenômenos envolvendo a camada limite são mais complexos e com menor apropriação teórica para desenvolver uma estimativa, porém, tal efeito pode ser observado experimentalmente e será mostrado nos resultados do escoamento a montante.

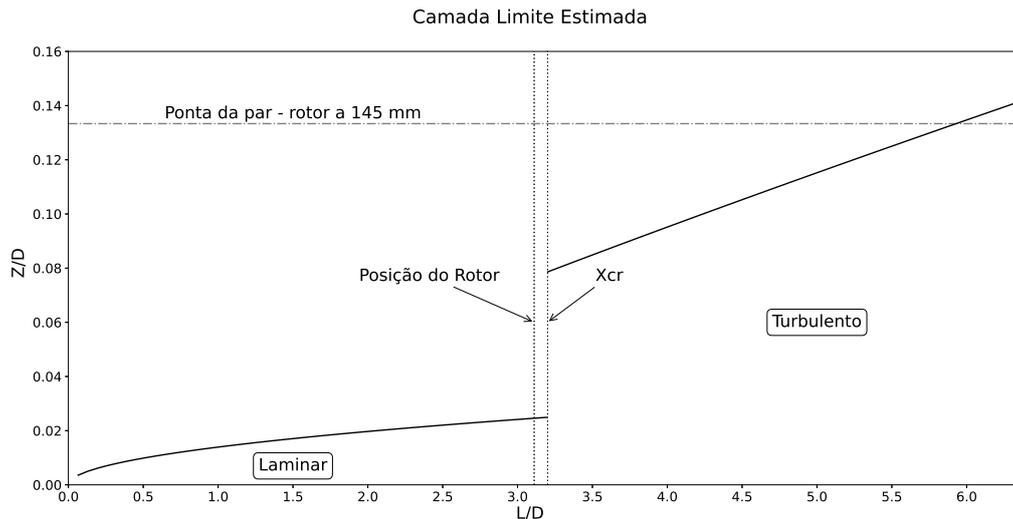


Figura 4.1 – Gráfico da estimativa da camada limite ao longo da seção de testes onde foram realizados os experimentos. O posicionamento do rotor foi indicado apenas como referência e não foi considerado na estimativa

Observa-se da figura 4.1 existe um salto entre a camada limite laminar e a turbulenta, pois a região de transição não foi representada, o que ligaria uma região com a outra. Este salto é de aproximadamente 11 mm. Essa região é fisicamente pequena, e a camada limite transita em ter uma dependência  $Re_x^{-1/2}$  e passa a decair com  $Re_x^{-1/5}$ .

## 4.2 RAZÃO DE BLOQUEIO (BR)

A magnitude do efeito de bloqueio no coeficiente de arrasto pode ser significativa acima de 5% da razão de bloqueio. Quando a razão de bloqueio é aumentada, o valor absoluto da contrapressão aumenta. Isso causa diretamente o aumento do coeficiente de arrasto. Tamanhos maiores, em que as taxas de bloqueio são maiores, causariam alguma diferença na medição do túnel de vento. Isso se deve ao aumento da velocidade e grandes quedas na pressão [69].

Para os arranjos experimentais desse trabalho, como a razão de bloqueio (BR) é definida como a razão entre a área projetada do modelo e a seção de teste do túnel de vento [69],

temos que para a área da seção transversal do túnel de vento é igual a  $1,44 \text{ m}^2$  e que o diâmetro do rotor é de  $0,225 \text{ m}$ , com isso, a razão de bloqueio é igual a  $2,76\%$ . Sabe-se que para uma razão de bloqueio superior a  $10\%$ , deve-se realizar um método de correção, que não é o caso desse trabalho.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DA RUGOSIDADE

Seguindo o referencial teórico deste trabalho, localizado no tópico 2.4 sobre a rugosidade, calculou-se os parâmetros de rugosidade para o sistema de correntes apresentados no tópico 3.4.1, considerando as dimensões da figura 3.14, e que estão apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros de Rugosidade

Parâmetros	Valor
Rugosidade média (Ra)	0,03 m
Profundidade da rugosidade (Rt)	0,03 m
Parâmetro de altura máxima (Rz)	0,03 m

Para os cálculos, utilizou-se o número de correntes igual a 20, comprimento total longitudinal na direção  $x$  que possui rugosidade é  $1,8 \text{ m}$  e que todas estão dispostas com espaçamentos iguais. Todos os parâmetros deram o mesmo valor, pois a disposição dos elementos é simétrica e a própria corrente é simétrica entre seus elos, isso faz com que, nas contas, nenhuma dissonância é acrescentada e a rugosidade passa a ser o valor da altura do elemento utilizado. Essa rugosidade caracterizada é cerca de  $13 \%$  do valor do diâmetro do rotor.

### 4.4 ESCOAMENTO A MONTANTE

Uma análise do escoamento na região a montante do rotor pode explicar qual o tipo de escoamento que está chegando e quais níveis de turbulência estão se aproximando, e assim, tentar compreender o comportamento das curvas de coeficiente de potência produzidas experimentalmente.

Para o caso com a superfície sem rugosidade, conforme constatou-se na estimativa, espera-se que com a anemometria esteja presente traços de uma camada limite laminar a montante do rotor dentro de um erro  $15\%$ , segundo Blasius.

Os perfis da figura 4.2 iniciam-se a partir de uma altura de  $5 \text{ mm}$  da superfície, presando pela segurança da sonda do anemômetro. Por esse motivo, os dados coletados estariam numa região acima da espessura da camada limite estimada. Nesse caso, pode-se observar que os

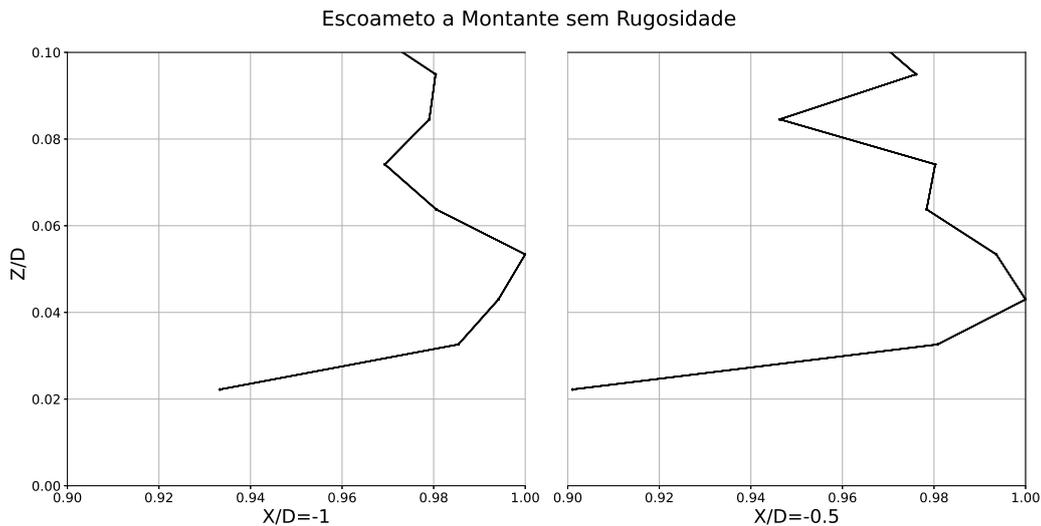


Figura 4.2 – Gráfico da análise dos dados de anemometria feitos a montante do rotor.  $X/D = 0$  é a posição em que o rotor foi instalado e os valores negativos correspondem a pontos antes do rotor. (—) Perfil de velocidade.

pontos entre  $z/D = 0,02$  e  $z/D = 0,04$  o perfil de velocidade encontra-se numa região final da espessura da camada limite, na extremidade mais alta, pois há um déficit de velocidade crescente conforme se aproxima da posição  $X/D = 0$  e, com isso, um aumento no perfil de intensidade de turbulência nesta mesma região.

Neste caso, fica evidente que no escoamento a montante, a camada limite não interage com as pás do rotor, no qual a ponta passa pelo ponto  $z/D = 0,14$ , com isso, pode-se concluir que os efeitos de camada limite a montante não interferem no coeficiente de potência da turbina.

Adicionando-se o fator rugosidade, ocasionado pelas correntes, o comportamento do escoamento já se altera, com camadas limites turbulentas numa espessura experimental maior, o qual é demonstrado na figura 4.3.

Pelo fato de conter as correntes anexadas à superfície, a aquisição de dados iniciou-se a 35 mm da superfície, evitando o contato da sonda com as correntes. Neste caso, os perfis de velocidade possuem déficit desde uma distância de  $2.5D$  à frente do rotor, que crescem à medida que o escoamento se desenvolve. Neste caso a intensidade de turbulência gerada por esse escoamento encontra-se com a pá do rotor na altura de eixo de  $h_1$ , ainda a montante, o que indica que os efeitos de camada limite no caso com rugosidade pode-se-a influenciar negativamente no coeficiente de potência, visto que mais da metade da pá, em sua porção inferior, está inserida na camada limite que vai ao encontro do rotor no escoamento a montante.

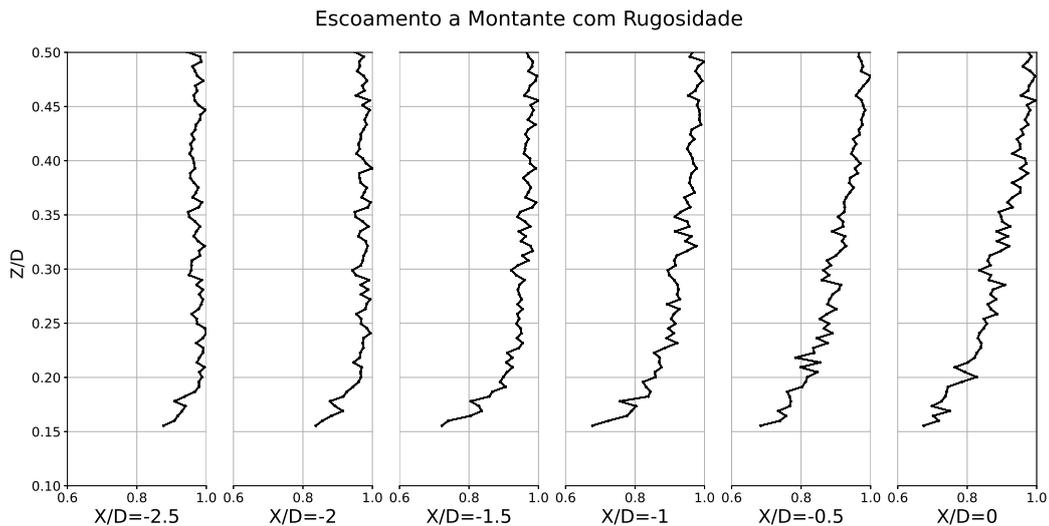


Figura 4.3 – Gráfico da análise dos dados de anemometria feitos a montante do rotor para a superfície rugosa.  $X/D = 0$  é a posição em que o rotor foi instalado e os valores negativos correspondem a pontos antes do rotor. (–) Perfil de velocidade.

#### 4.5 COEFICIENTE DE POTÊNCIA

O coeficiente de potência do rotor foi analisado por meio de ensaios em túnel de vento para três arranjos de altura combinados com dois tipos de superfícies diferentes. Para todos os arranjos experimentais, a faixa de rotação testada permaneceu entre 600-1500 RPM, tomando um escoamento com velocidade não perturbada de  $10 \text{ m/s}$ . Para o ensaio de cada configuração experimental de altura combinada com diferença de superfície foram realizadas 30 repetições. Um dos gráficos de  $C_p$  construídos com as medições experimentais deste trabalho é o da figura 4.4.

Na figura 4.4 observa-se a nuvem de pontos obtida experimentalmente para a condição de rotor na altura  $h_2$  numa superfície lisa. Nota-se que há a presença de uma tendência, e que, apesar da quantidade de pontos coletados para cada rotação ser uma quantidade considerável, a curva possui uma espessura que influencia num desvio padrão alto. O procedimento do ensaio de torque é feito de maneira contínua capaz de controlar a velocidade do rotor com um erro menor que 5%, como já relatado em outros trabalhos [7, 9], tornando-se insignificante perante ao erro aleatório, o que justifica a espessura da nuvem de pontos. A melhor condição para diminuir a espessura do desvio padrão é a repetição dos ensaios de obtenção das curvas de  $C_p$  para todos os arranjos e configurações experimentais, o que implicaria em muito mais horas de ensaios, apresentando-se inviável para o cronograma deste trabalho.

Após tais considerações do parágrafo anterior, tomando-se como referencial, por ter uma camada limite estimada e confirmada experimentalmente, analisou-se os ensaios para superfície lisa, que podem ser observadas as curvas de coeficiente de potência no gráfico da figura 4.5. A barra de erros foi construída com auxílio de um código em python a partir da análise

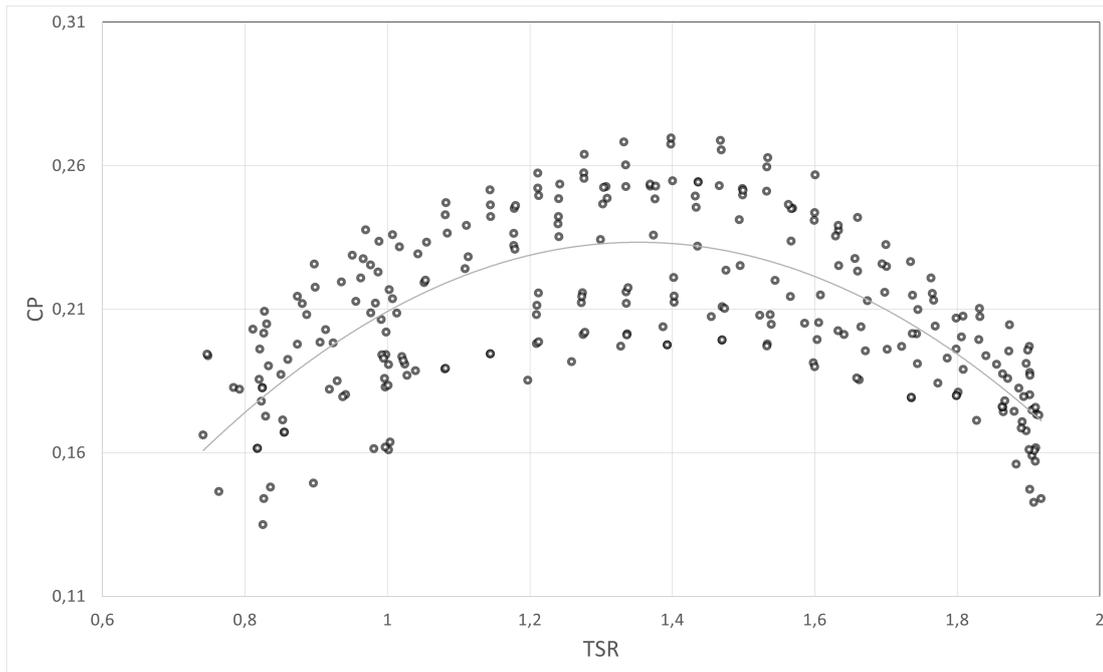


Figura 4.4 – Gráfico experimental da curva de coeficiente de potência para os arranjos em superfície lisa com a condição do rotor na altura  $h_2$ .(-.-) Linha de tendência média.

estatística das medidas utilizando-se o desvio padrão da média amostral em cada rotação aferida.

Através das curvas da figura 4.5, observa-se que a curva de potência do rotor na posição  $h_3$ , altura de eixo de 295 mm, está contida na faixa de erro da curva de potência da posição  $h_2$ , altura de 445 mm. Sendo assim, pode-se afirmar que, para todos os efeitos, dentro da escala de altura em relação ao solo para os casos  $h_2$  e  $h_3$  os CPs são mesmo, com isso, a análise faz-se-á em comparação somente entre os arranjos nas alturas  $h_1$  e  $h_2$  com o intuito de esclarecer a análise nos dois arranjos mais extremos e, por hora, descartando o estudo comparativo com a posição  $h_3$ , apesar do escoamento desse ter sido analisado e anexado no apêndice deste trabalho.

Ademais, após a análise dos dados relativos ao coeficiente de potência, obteve-se as seguintes curvas para os arranjos em superfície lisa apresentados na figura 4.6.

Interessante notar no gráfico da figura 4.6 que a curva para a posição  $h_1$ , do rotor mais próximo do chão, possui um pico de CP cerca de 20% maior do que para a posição  $h_2$ , que estaria com o rotor cerca três vezes a distância de  $h_1$  acima da superfície, no escoamento livre. Vale ressaltar que foi averiguado que nesta posição, o rotor não sofre influência da camada limite a montante, e a turbina na posição  $h_2$  está numa altura ainda mais distante do solo, sendo mais improvável que o efeito de camada limite pudesse diminuir o CP. Logo, pode-se iniciar uma discussão sobre o motivo pelo qual o CP da posição  $h_1$  aumentou em relação à  $h_2$ , e averiguar o escoamento a jusante do rotor pode ser apropriado para entender os fenômenos que estariam ocorrendo, e será exatamente o que será feito ainda nesse capítulo.

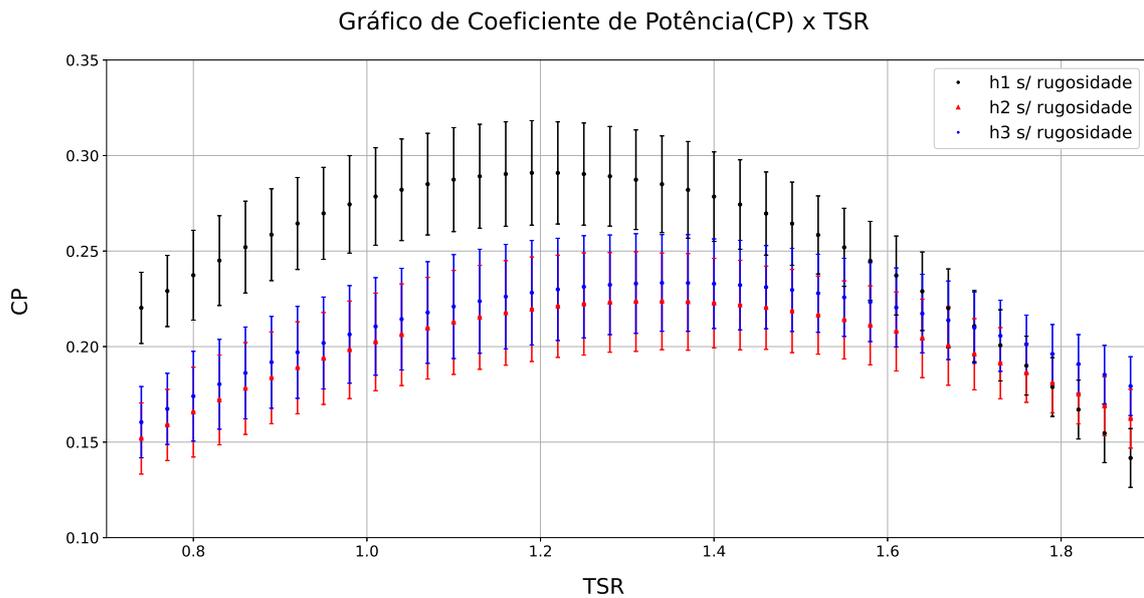


Figura 4.5 – Gráfico de coeficiente de potência para os arranjos em superfície lisa com as barras de erro na direção Y, o erro na direção X foi suprimido para uma melhor visualização.

Outrossim, efetuou-se os mesmos procedimentos, porém para uma superfície com rugosidade provocada pelas correntes. Neste caso, optou-se por seguir coerente com o ensaio da superfície lisa e não considerando a posição  $h_3$  para as análises, com o intuito de eventual comparativo entre as superfícies. Com isso, obteve-se o gráfico da figura 4.7

No caso com rugosidade houve uma inversão nos picos máximos de coeficiente de potência, nos quais para  $h_2$ , que está mais distante da superfície, se sobressai dos valores de  $h_1$ , que está mais próximo das correntes. Pode-se averiguar com o estudo do escoamento a montante, que nesse caso rugoso grande parte da pá do rotor, em sua porção do centro para baixo, está em contato com a camada limite provocada pelas correntes. O escoamento antes de ir ao encontro do rotor já apresenta um déficit de velocidade, o que pode explicar a queda de potência, e uma análise do escoamento a jusante pode elucidar mais conclusões.

Gráfico de Coeficiente de Potência(CP) x TSR - Superfície Lisa

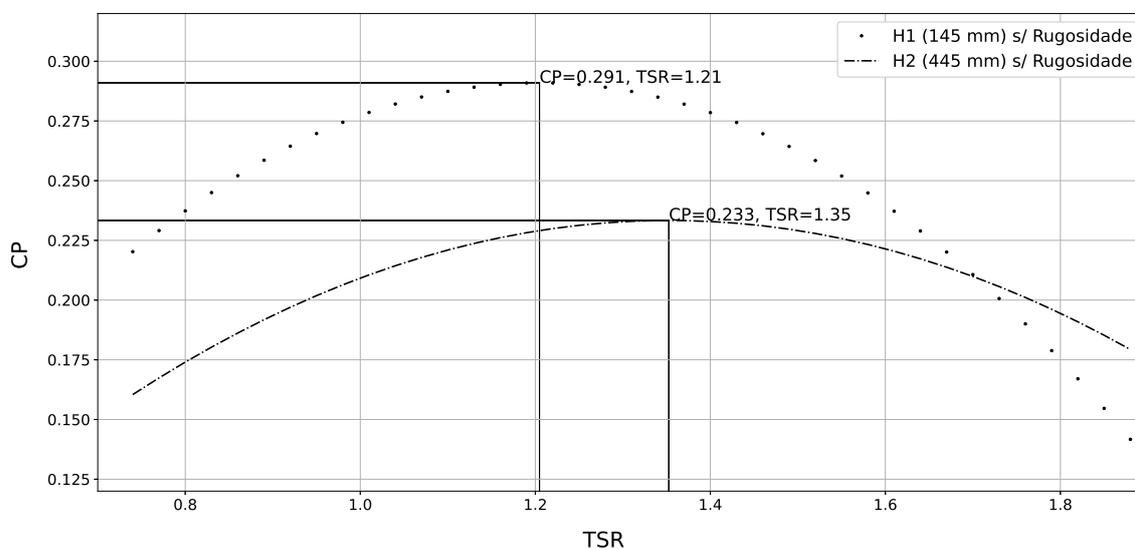


Figura 4.6 – Gráfico de coeficiente de potência para as alturas em superfície lisa. As barras de erro foram ocultadas com a intensão de melhor visualização e interpretação dos dados.

Gráfico de Coeficiente de Potência(CP) x TSR - Superfície com Rugosidade

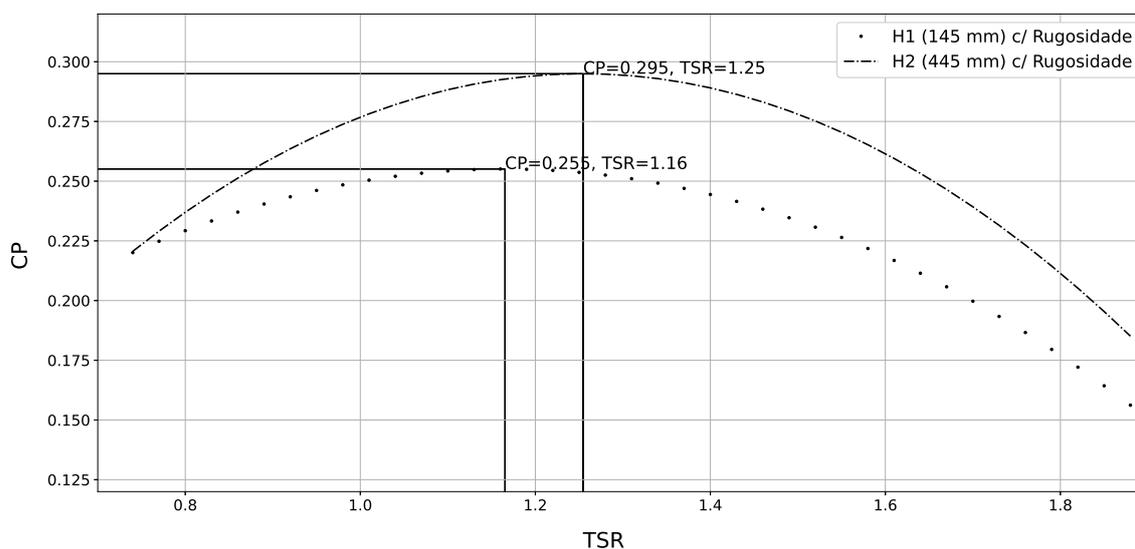


Figura 4.7 – Gráfico de coeficiente de potência para as alturas em superfície rugosa. As barras de erro foram ocultadas com a intensão de melhor visualização e interpretação dos dados.

## 4.6 ESCOAMENTO A JUSANTE SEM RUGOSIDADE

Com o intuito de maximizar o entendimento dos resultados experimentais, optou-se por analisar os escoamentos com e sem rugosidade separadamente, olhando para a influência de cada um deles sobre a altura do rotor em relação à superfície.

Toda a análise de esteira para os experimentos realizados está contida na região definida como esteira próxima [57], nesse caso os pontos experimentais coletados estão contidos entre  $x/D = 0,2$  e  $x/D = 3,2$ .

Os dados de coeficiente de potência revelaram que houve um aumento considerável da potência para a posição  $h_1$ , mas o escoamento a montante não foi responsável por esse efeito, em outras palavras, notou-se que o comportamento da camada limite é laminar e distante das pás do rotor, mesmo para o caso mais próximo da superfície. Sendo assim, os efeitos de camada limite a montante não são responsáveis pelos fenômenos observados nos comportamentos das curvas da figura 4.6. Com isso, deve-se observar os efeitos que ocorrem a jusante do rotor. O gráfico das figuras 4.8 e 4.9 apresenta os contornos de velocidades para as duas alturas a jusante.

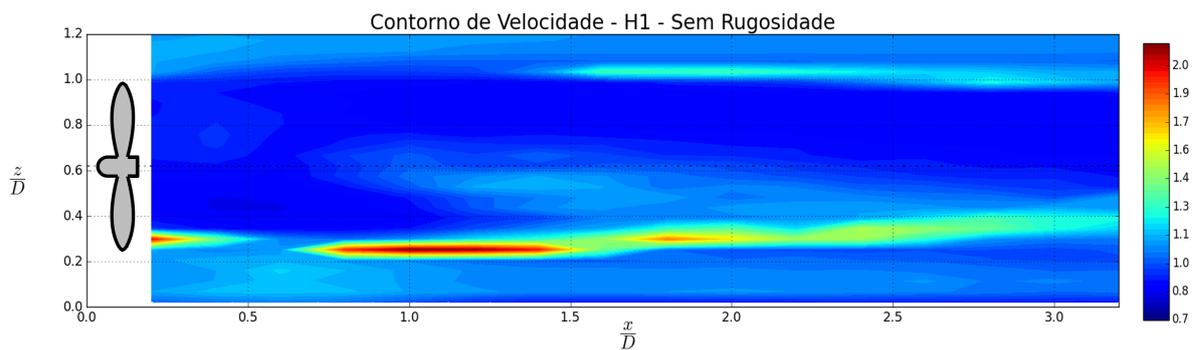


Figura 4.8 – Gráfico de contorno de velocidade ( $U/U_\infty$ ) numa superfície lisa para altura H1. (—) representa o eixo do rotor. O desenho do rotor é meramente ilustrativo com função de orientação.

Na análise de resultados de modelos reduzidos em túnel de vento, um fator importante a ser considerado é o efeito de bloqueio sobre os resultados medidos devido às paredes do túnel de vento [43]. Segundo Ryi et al.[43] quando o fator de bloqueio, BR, é maior que 10% é necessário aplicar correção de bloqueio. Neste caso, o efeito de bloqueio será proposital, de maneira que ao se aproximar da superfície do túnel de vento possa surgir o efeito de confinamento.

Através das figuras de contorno de velocidade é possível averiguar, claramente, que há um aumento da velocidade na posição  $h_1$  na região inferior da esteira próxima. Essa aceleração pode ser explicada devido aos efeitos decorrentes ao confinamento, na camada de cisalhamento anular definida pelos vórtices de ponta de pá, que vai ao encontro da superfície do solo. Nesse momento acontece, na parte inferior, um efeito de confinamento esteira pró-

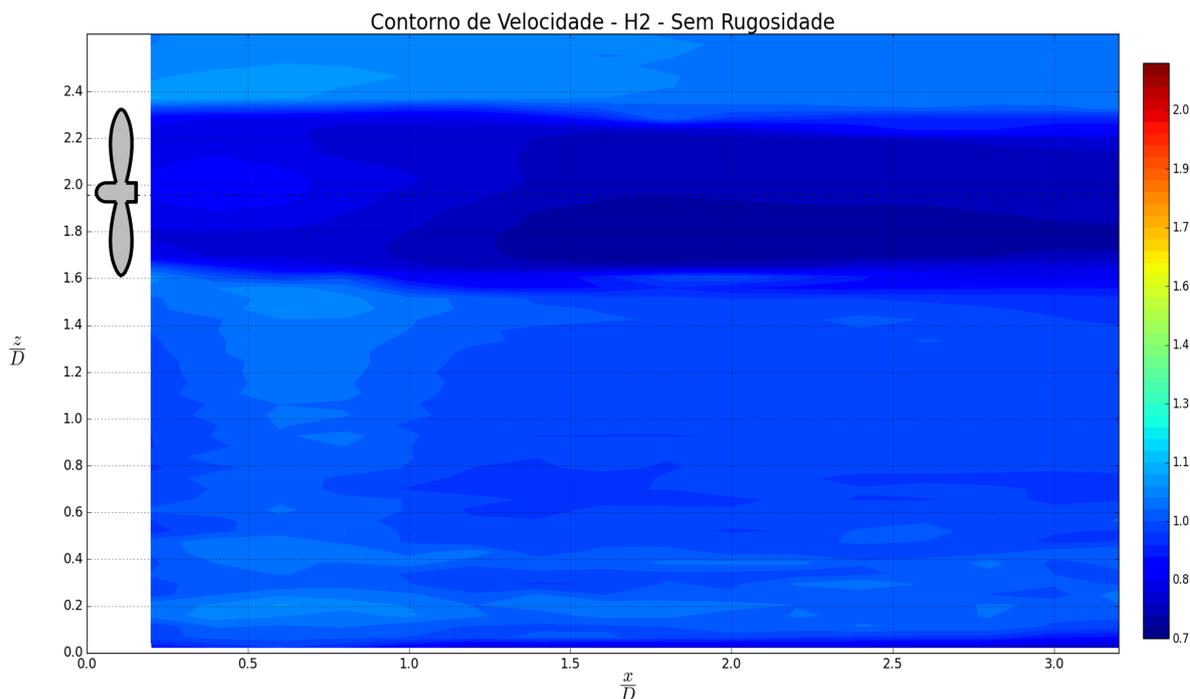


Figura 4.9 – Gráfico de contorno de velocidade ( $U/U_\infty$ ) numa superfície lisa para altura H2. (—) representa o eixo do rotor. O desenho do rotor é meramente ilustrativo com função de orientação.

xima, que, neste caso haverá um forçamento de mais massa de fluido passando pelo rotor e conseqüentemente, a velocidade a montante irá aumentar, com base na teoria do disco atuador e conservação da massa, elevando a potência da máquina geradora. No caso da posição  $h_2$ , altura de 445 mm, a distância do rotor para a superfície impede que efeitos de camada limite ou de confinamento possam modificar o comportamento da máquina livre. Com mais detalhes, pode-se observar a intensidade do efeito de confinamento através das figuras 4.10 e 4.11.

Em outras palavras, o efeito de confinamento produzido quando o rotor de uma turbina de eixo horizontal está muito próximo do solo pode ser capaz de aumentar a potência produzida pelo gerador, como é visto no gráfico de coeficiente de potência para uma superfície lisa da figura 4.6, pois este efeito altera o escoamento de maneira que a vazão média através do rotor seja maior. Interessante notar, visível nos perfis da figura 4.10, que a velocidade na parte mais baixa do rotor, região da ponta da pá inferior e na esteira mais próxima da máquina, baixa é expressivamente maior do que na parte mais alta, evidenciando um aumento de velocidade em  $h_1$ . Neste caso, a velocidade média do disco atuador da turbina é maior. Logo, se a velocidade é maior na esteira, ela também é maior antes do rotor pela conservação do disco atuador na média. Os perfis da figura 4.11, para  $h_2$ , apresentam uma uniformidade mais constante desde os perfis mais próximos do rotor e com uma tendência de recuperação da esteira em sua porção mais distante. Os picos de intensidade de turbulência,

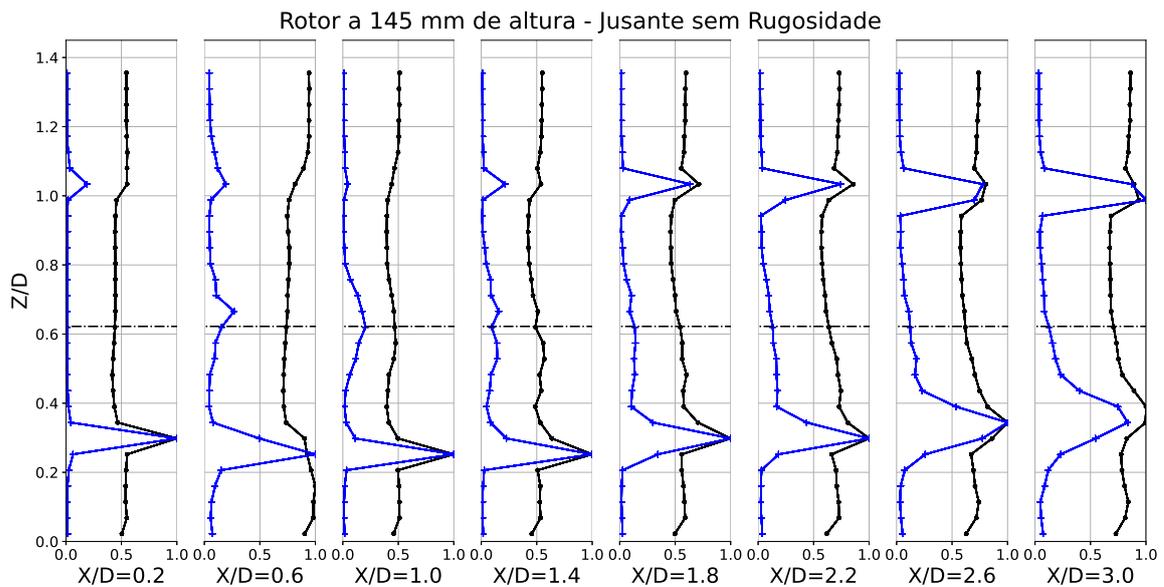


Figura 4.10 – Gráfico de perfis da posição  $h_1$  a jusante com superfície lisa.  $X/D = 0$  é a posição em que o rotor foi instalado e os valores positivos correspondem a pontos após o rotor. (·—) Perfil de velocidade e (+—) intensidade de turbulência.

nesse caso, estão relacionados com os vórtices helicoidais ponta de pá, sem qualquer influência de parede ou camada limite, no caso clássico de uma máquina livre, mas que apesar de ser a mesma máquina da posição  $h_1$ , seu coeficiente de potência é menor, mesmo fora dos possíveis efeitos.

Do perfil uniforme incidente na turbina, segundo estudos anteriores como o de Crespo e Hernández[57], é esperado que o perfil de velocidades na esteira apresente um perfil na forma de uma Gaussiana com seu eixo de simetria na altura do eixo da turbina. Nota-se que a nacele de turbinas usualmente coincide com o diâmetro do cubo do rotor. Entretanto, observando os perfis de velocidade, foi identificado a não existência de um perfil com forma Gaussiana. Parte dessa não assimetria pode estar relacionada com o tamanho da nacele da turbina, que possui um diâmetro 2,5 vezes maior que o diâmetro do cubo do rotor. Tal diferença de diâmetros muda totalmente o comportamento do núcleo da esteira da turbina devido a interação entre os vórtices helicoidais formados na raiz da pá do rotor e a nacele da turbina.

Observando a figura 4.12 e comparando os perfis das figuras 4.10 e 4.11, nota-se uma distribuição da intensidade de turbulência não axissimétrica e também não gaussiana em todas as distâncias da esteira próxima, com um pico de intensidade mais expressivo envolto de  $x/D = 1$ . Tal comportamento está associado à presença da superfície. Quanto mais uniforme for o fluxo de entrada no nível da turbina, menor será o desvio da simetria axial da esteira, que é bastante evidente a axissimetria em  $h_2$ .

Analisando a distribuição de intensidade de turbulência, figura 4.12, identifica-se que a

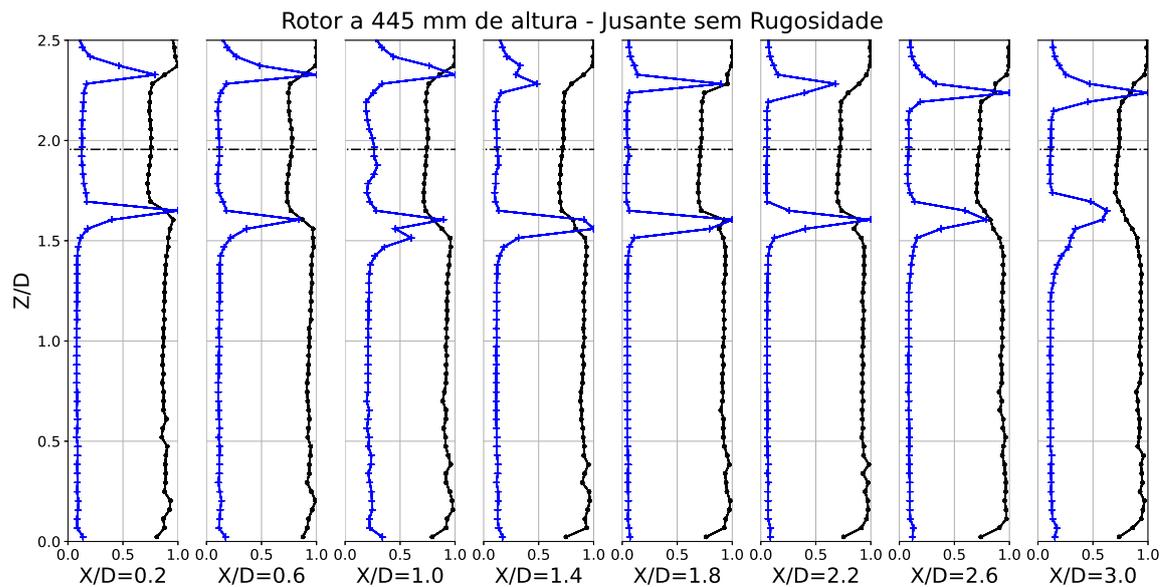


Figura 4.11 – Gráfico de perfis da posição  $h_2$  a jusante com superfície lisa.  $X/D = 0$  é a posição em que o rotor foi instalado e os valores positivos correspondem a pontos após o rotor. (·-) Perfil de velocidade e (+-) intensidade de turbulência.

região da esteira próxima  $x/D \leq 3$  coincide com estudos anteriores [57, 33], pois o pico de intensidade de turbulência ocorre no final dessa região na altura do vórtice helicoidal de ponta de pá.

A figura 4.13 apresenta o contorno de energia cinética turbulenta numa superfície lisa para os dois arranjos experimentais. Tal gráfico possui uma tendência parecida com o gráfico de intensidade de turbulência, mas fica mais evidente para  $h_2$  a energia cinética do escoamento associado aos vórtices raiz e de ponta de pá, que em escala possui uma energia menor do que os efeitos que ocorrem em  $h_1$ . Neste gráfico, para  $h_1$ , consegue-se verificar a energia cinética dos vórtices oriundos do bloco do rotor, que é a região em que se aparecem os maiores déficits de velocidade na região da esteira mas que não se sobressaem do efeito da superfície. Resta concluir que, para o caso com superfície lisa, a posição mais distante dos efeitos de parede pode não ser o ponto ótimo para obtenção da maior potência gerada, pois o efeito de confinamento influencia num aumento considerável do coeficiente de potência.

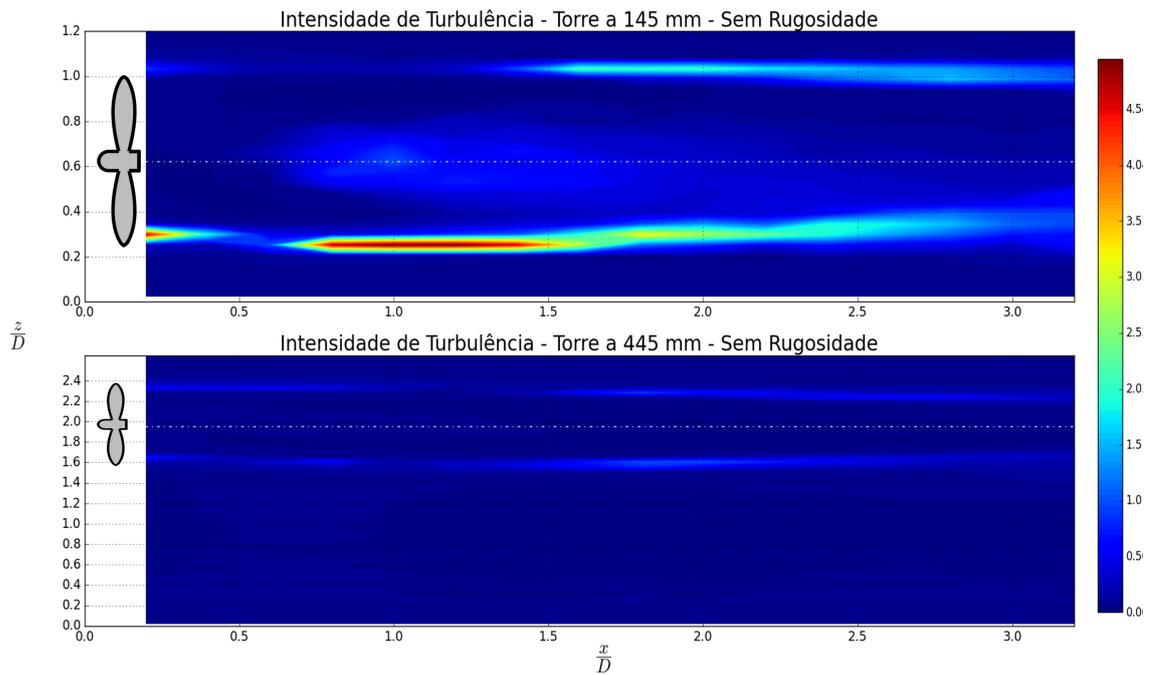


Figura 4.12 – Gráfico de intensidade de turbulência ( $\frac{\sigma_{u'}}{U}$ ) numa superfície lisa. (—) representa o eixo do rotor. O desenho do rotor é meramente ilustrativo com função de orientação.

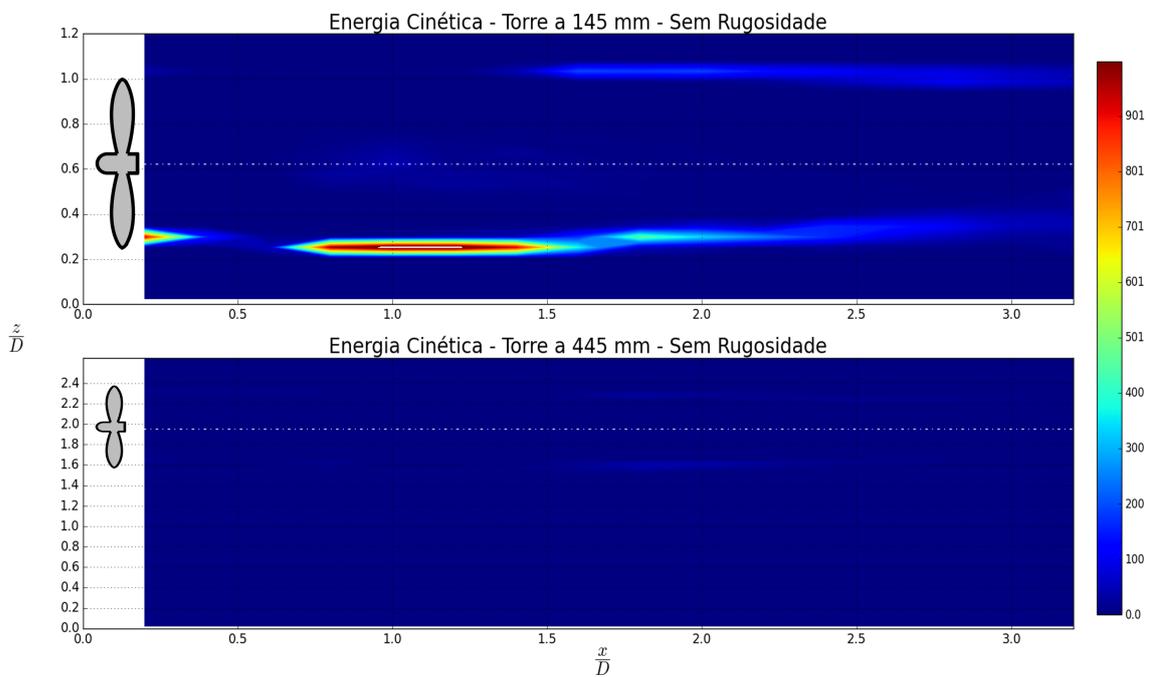


Figura 4.13 – Gráfico de energia cinética turbulenta ( $\frac{u'^2}{2}$ ) numa superfície lisa. (—) representa o eixo do rotor. O desenho do rotor é meramente ilustrativo com função de orientação.

## 4.7 ESCOAMENTO A JUSANTE COM RUGOSIDADE

Novamente, uma caracterização detalhada da seção longitudinal da esteira a jusante do rotor foi efetuada com anemometria a fio quente com sonda simples, igualmente para o caso de superfície lisa, contudo a diferença é que a superfície possui correntes espaçadas igualmente ao longo da solo para forçar a formação de uma camada limite turbulenta. Os limites de análise experimental na direção  $x$  são os mesmo do caso liso ( $x/D = 0,2$  e  $x/D = 3,2$ ) porém, apesar da altura de eixo do rotor dos dois arranjos permanecerem as mesmas, o limite inferior de aquisição de dados se modificou para que a sonda não entrasse em contato com as correntes, iniciando a partir de  $z/D = 0,15$ .

O gráfico com as curvas de coeficiente de potência experimentais para a superfície rugosa, figura 4.7, mostram para  $h_1$ , apresentou uma queda no coeficiente de potência em relação a superfície lisa de quase 13%. Analisando primeiramente somente este caso, pode-se entender essa queda de CP interpretando a camada limite e o escoamento a montante. Os perfis da figura 4.3 mostram que o escoamento que chega na parte inferior do rotor possui um déficit de velocidade devido a camada limite turbulenta gerada pelas correntes, sendo que a pá está dentro desta região, e nesse caso, o efeito de camada limite pode ter sobressaído o efeito de confinamento.

Observando-se a turbina alta, obteve-se um aumento do coeficiente de potência de aproximadamente 21% em relação a superfície lisa. Neste caso, o escoamento a montante não teve nenhuma influência nesse aumento de potência, como demonstrado na análise de escoamento a montante, o que resta interpretar os resultados a jusante. Primeiramente, a figura 4.14 e 4.15 mostra o contorno de velocidade para os dois arranjos em situação de superfície com rugosidade.

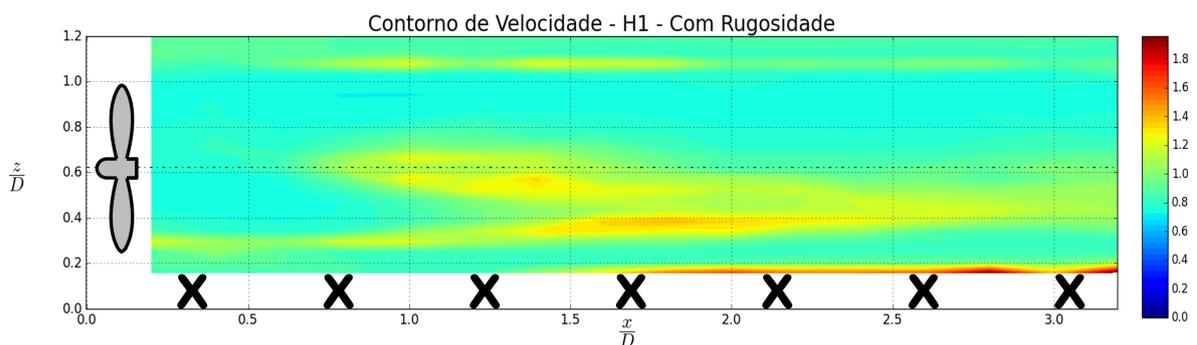


Figura 4.14 – Gráfico de contorno de velocidade ( $U/U_\infty$ ) numa superfície rugosa para altura H1. (—) representa o eixo do rotor. O desenho do rotor é meramente ilustrativo com função de orientação.

A rugosidade serviu para aumentar expressivamente a espessura da camada limite, de maneira que ela pudesse interagir com o rotor. Interessante notar que, apesar do déficit de velocidade na entrada do rotor apresentado pelo escoamento a montante, na figura 4.14 o

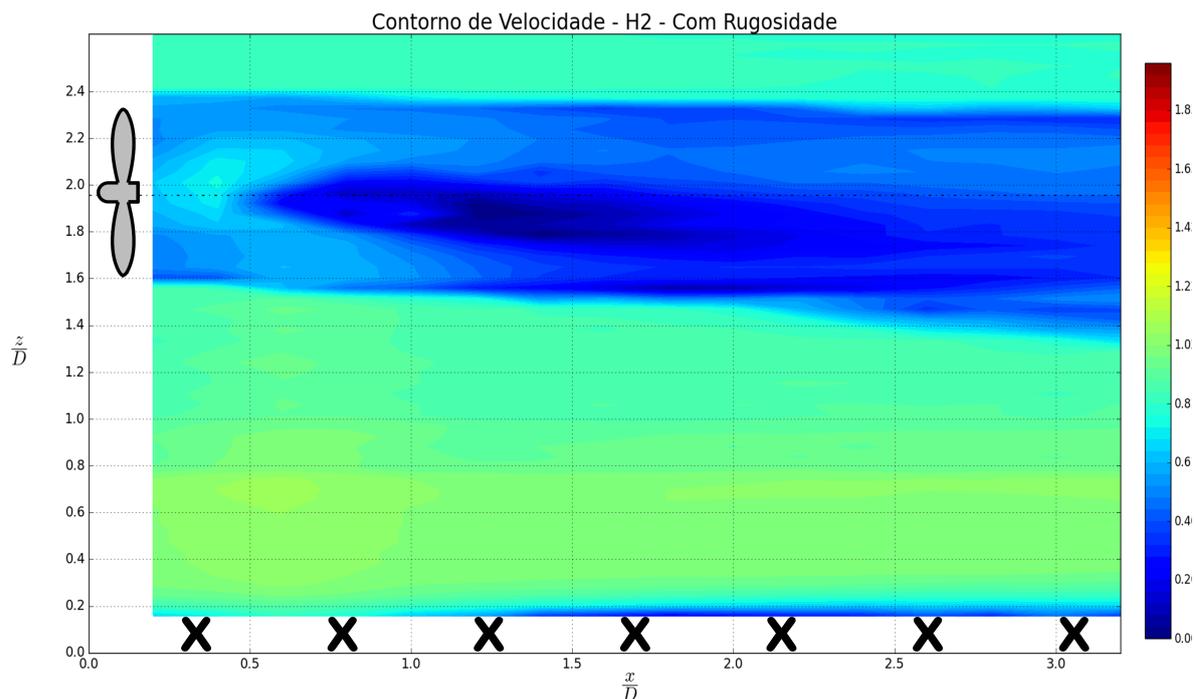


Figura 4.15 – Gráfico de contorno de velocidade ( $U/U_\infty$ ) numa superfície rugosa para altura H2. (—) representa o eixo do rotor. O desenho do rotor é meramente ilustrativo com função de orientação.

escoamento a jusante em  $h_1$  apresenta uma axissimetria semelhante ao caso liso. Devido aos efeitos do perfil de velocidade da camada limite de entrada não uniforme e à presença da superfície, a distribuição de velocidade dentro da esteira da turbina (figura 4.16) não mostra comportamento axissimétrico relatado por estudos anteriores no caso de fluxo livre [57, 70]. Conforme mostrado na figura 4.14, a axissimetria para  $h_1$  se decompõe perto da superfície a favor do escoamento da posição na qual a esteira cresceu o suficiente para atingir a superfície.

É esperado que o efeito de confinamento do solo leve a um aumento da intensidade da turbulência na esteira da turbina, em comparação com a intensidade da turbulência do fluxo de entrada, assim como o caso liso. No caso de turbinas localizadas em fluxos livres, como em  $h_2$ , com o fluxo de entrada é uniforme, as esteiras da turbina mostram uma distribuição transversal axissimétrica da intensidade de turbulência. Em particular, é esperado na esteira próxima ( $x/D \leq 5$ ) encontrar um pico na intensidade de turbulência em torno da ponta da esteira da turbina, associado aos altos níveis de turbulência produzidos pelo vórtice helicoidal que derivam dos vórtices da ponta da pá da turbina [26].

Ter a turbina localizada na camada limite leva a uma distribuição de intensidade de turbulência que é marcadamente não axissimétrica e também não gaussiana em todas as distâncias, conforme mostrado na nos perfis de  $h_1$  na figura 4.16. Este comportamento está associado à não uniformidade do fluxo de entrada e a presença da superfície. Perto da borda superior da

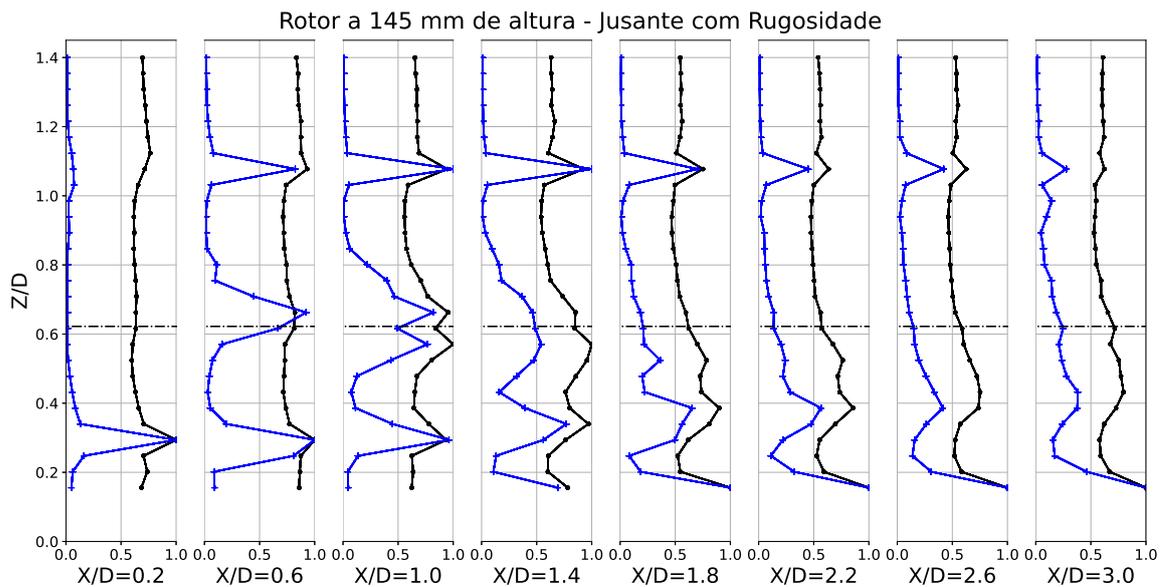


Figura 4.16 – Gráfico de perfis para  $h_1$  a jusante com superfície rugosa.  $X/D = 0$  é a posição em que o rotor foi instalado e os valores positivos correspondem a pontos após o rotor. (·—) Perfil de velocidade e (+—) intensidade de turbulência.

esteira, há um forte aumento da intensidade da turbulência em comparação com os níveis de turbulência relativamente baixos no fluxo de entrada. Pode está associado à existência de um forte cisalhamento e à presença de vórtices helicoidais naquele local. No entanto, o efeito da turbina leva a uma redução no nível de intensidade de turbulência (em comparação com os níveis de turbulência relativamente altos perto do solo) abaixo da altura do cubo. Isso pode ser explicado considerando que naquela região o cisalhamento médio e a redução associada da energia cinética da turbulência (figura 4.19) diminuem em relação ao fluxo de entrada.

Está cada vez mais evidente que a interação entre a camada limite e o rotor pode reduzir a potência gerada quando ela acontece de forma isolada, ou seja, na ausência de outros mecanismos, como, por exemplo, o mecanismo de confinamento, e o rotor da turbina de eixo horizontal está dentro de sua região.

Importante salientar, novamente, que a diferença das curvas não estariam associadas ao escoamento a montante, porque a montante aparentemente o escoamento é o mesmo ao passar pelo motor para a posição  $h_2$ . Nesse caso pode haver diferenças na esteira, lembrando que a potência gerada pelo rotor é a vazão vezes a diferença de pressão, a interação da camada limite turbulenta gerada pelas correntes e a turbulência gerada pelo próprio rotor geram um escoamento que podem ter alterado o campo de pressão a jusante, formando-se indícios suficiente para motivar um estudo mais aprofundado dessa interação para o arranjo mais distante, visto que foi o maior pico de CP registrado.

Interpretando os gráficos das figuras 4.18 e 4.19, nota-se mais evidente a não axissimetria em  $h_1$  que afetada no início da região da esteira próxima mas aparentemente tende a ter um

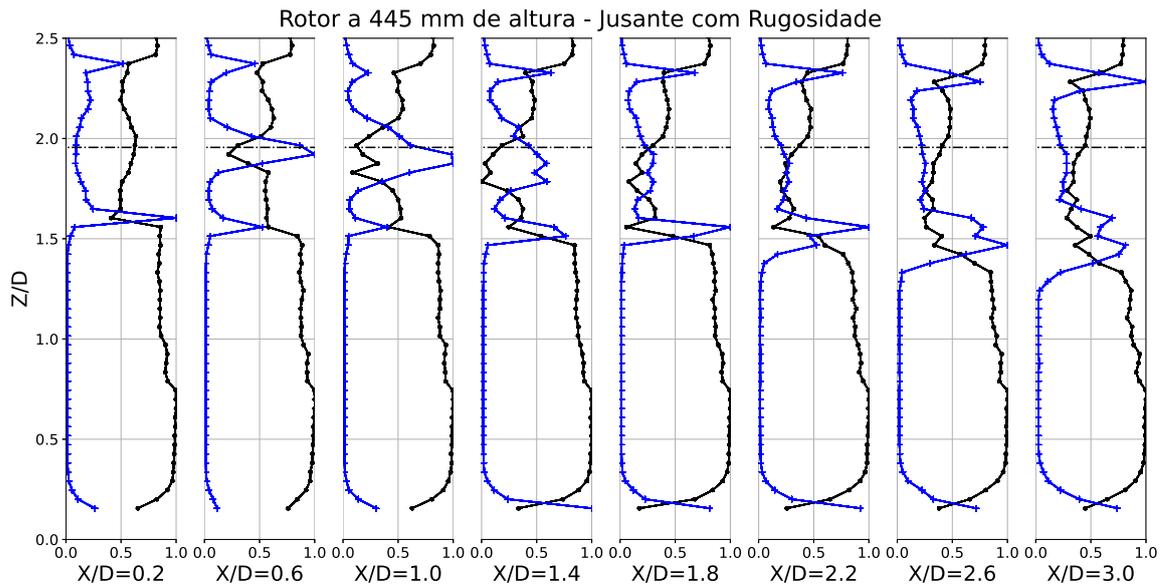


Figura 4.17 – Gráfico de perfis para  $h_2$  a jusante com superfície rugosa.  $X/D = 0$  é a posição em que o rotor foi instalado e os valores positivos correspondem a pontos após o rotor. (·—) Perfil de velocidade e (+—) intensidade de turbulência.

comportamento de recuperação, que apenas seria mais preciso afirmar se pudesse analisar o escoamento da esteira distante. Esse comportamento é esperado através da conclusão de outros estudos [26, 28, 1, 25, 44].

Nesta região próxima, entre  $x/D = 0.5$  e  $x/D = 2$ , os valores indicam mecanismos de instabilidade mais energética sob maior turbulência de fundo. As distribuições em massa da tensão de cisalhamento cinemática exibem características diferentes nos arranjos; no entanto, as diferenças nas magnitudes podem revelar modulação distinta da varredura e ejeção próximo ao topo das correntes que interagem com a esteira. Tal efeito é explorado de forma que a esteira da turbina redistribui as estruturas turbulentas e nivela a distribuição dos quadrantes ao longo da vertical [1], sendo possível ver o início dessa interação nas figuras 4.16 e 4.18.

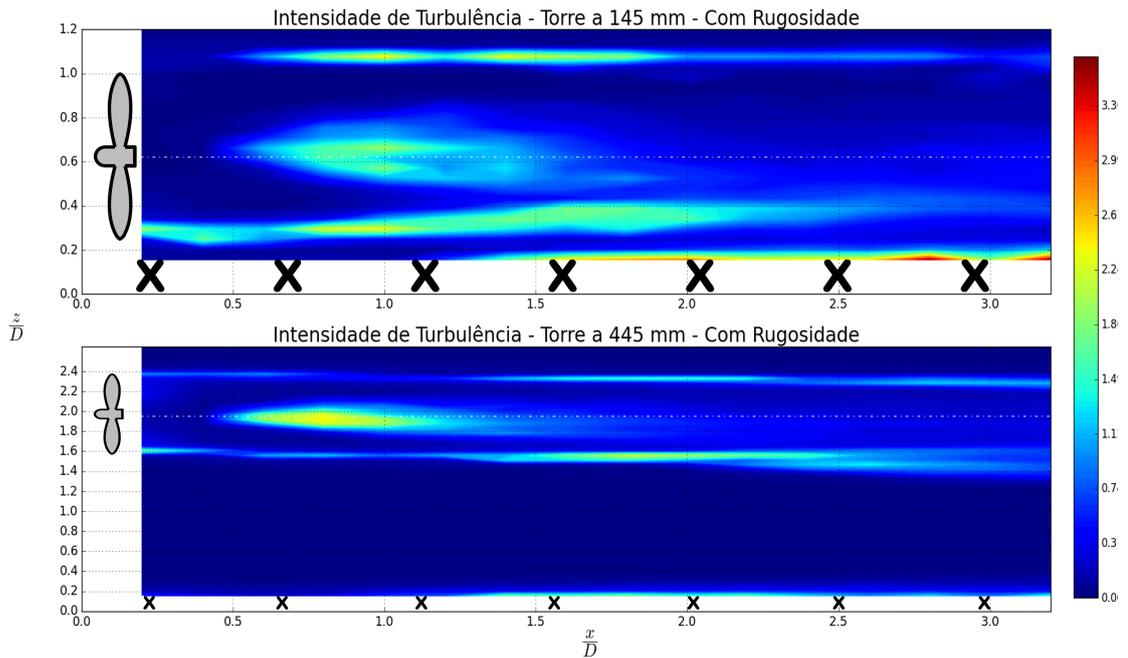


Figura 4.18 – Gráfico de intensidade de turbulência ( $\frac{\sigma_{u'}}{U}$ ) numa superfície rugosa. (—) representa o eixo do rotor. O desenho do rotor é meramente ilustrativo com função de orientação.

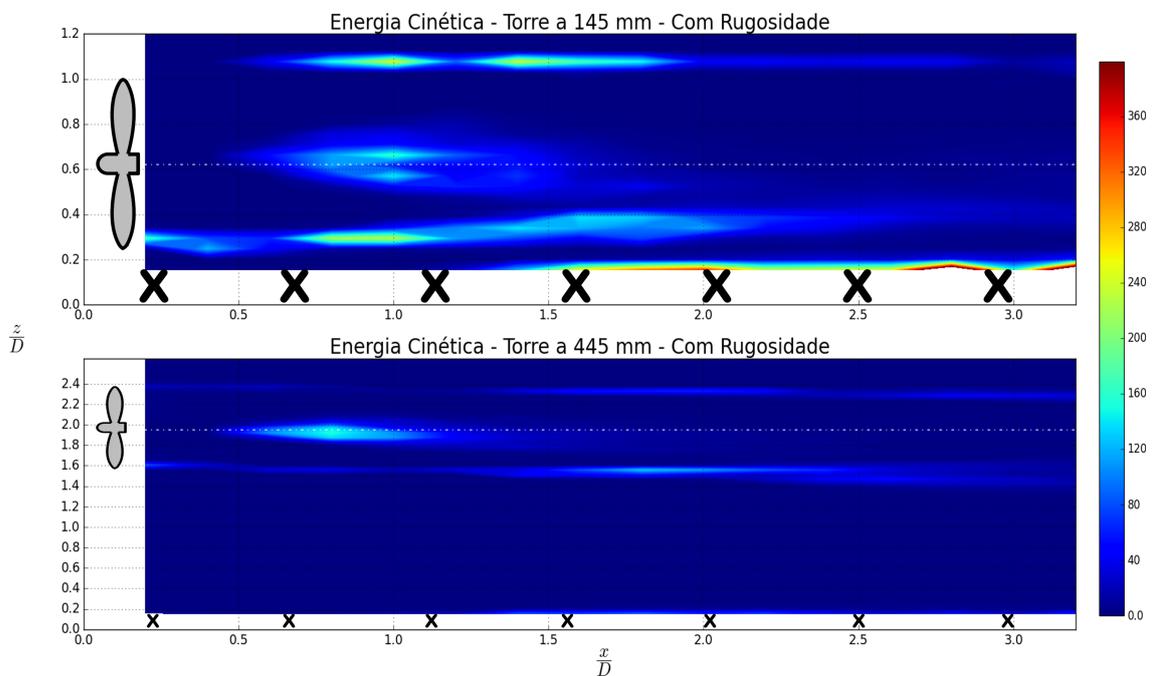


Figura 4.19 – Gráfico de energia cinética turbulenta ( $\frac{u'^2}{2}$ ) numa superfície rugosa. (—) representa o eixo do rotor. O desenho do rotor é meramente ilustrativo com função de orientação.

## 4.8 COMPARAÇÃO ENTRE OS ARRANJOS I E II

Após realizada a análise dos arranjos I (superfície lisa) e II (superfície rugosa) separadamente, identificando os efeitos modificadores do coeficiente de potência para cada uma das alturas de posição do rotor, uma análise comparativa entre os arranjos pode ser realizada, a começar pela posição  $h_1$ , no qual as curvas de  $C_p$  para cada arranjo foram plotadas juntas na figura 4.20.

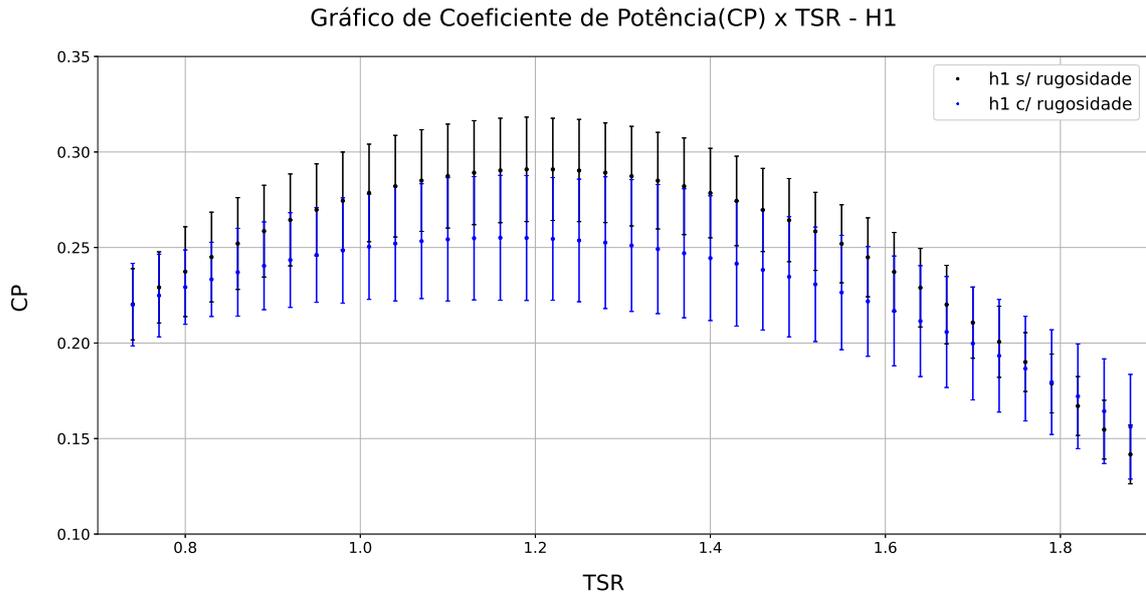


Figura 4.20 – Gráfico de  $C_p$  vs TSR para os arranjos I e II na posição  $h_1$ .

Observando-se a figura 4.20, nota-se que apesar das barras de erro se encontrarem, o pico do coeficiente de potência para o arranjo 1, sem rugosidade, está fora da margem de erro do arranjo 2, podendo-se considerar que são duas curvas diferentes. Interessante notar que para a situação sem rugosidade a potência de geração apresentou um pico aproximadamente 12% maior do que com rugosidade. Facilmente se explica pelos fenômenos já mencionados nas análises individuais, em que para a situação sem rugosidade o efeito de confinamento se sobrepõem, ocasionando um aumento do coeficiente de potência. Já para o caso rugoso, observa-se que o efeito de confinamento disputa-se com o efeito de camada limite provocado pela rugosidade adicional a montante do rotor, que diminui a potência gerada, não permitindo que o efeito de confinamento seja completamente superior ao déficit de velocidade a montante.

Para a posição  $h_2$ , as curvas de  $C_p$  foram plotadas juntas na figura 4.21. Neste caso observa-se uma inversão da situação encontrada para  $h_1$ . Ocorreu um aumento de aproximadamente 20% no pico de  $C_p$  da situação sem rugosidade para a situação com rugosidade.

A rugosidade ocasionou um aumento da turbulência, diminuindo a sustentação sobre a pá da turbina ocasionando a perda de eficiência. Tal afirmação é fundamentada pelo teorema

de Kutta–Joukowski, e propõem-se uma relação entre circulação e sustentação. Com essa turbulência, pode está acontecendo um efeito de *estol* antecipado, em que os vórtices de ponta de pá consomem a potência gerada pelo rotor mas não geram a sustentação. Esse fenômeno aparece em aerofólio com condições não-estacionárias, com variações acentuadas no ângulo de ataque, podendo ocorrer fenômenos provenientes de efeitos viscosos, como a separação da camada limite e desprendimento de vórtices. Isto resulta num atraso temporal dos efeitos lineares ocorridos nas condições estáticas.

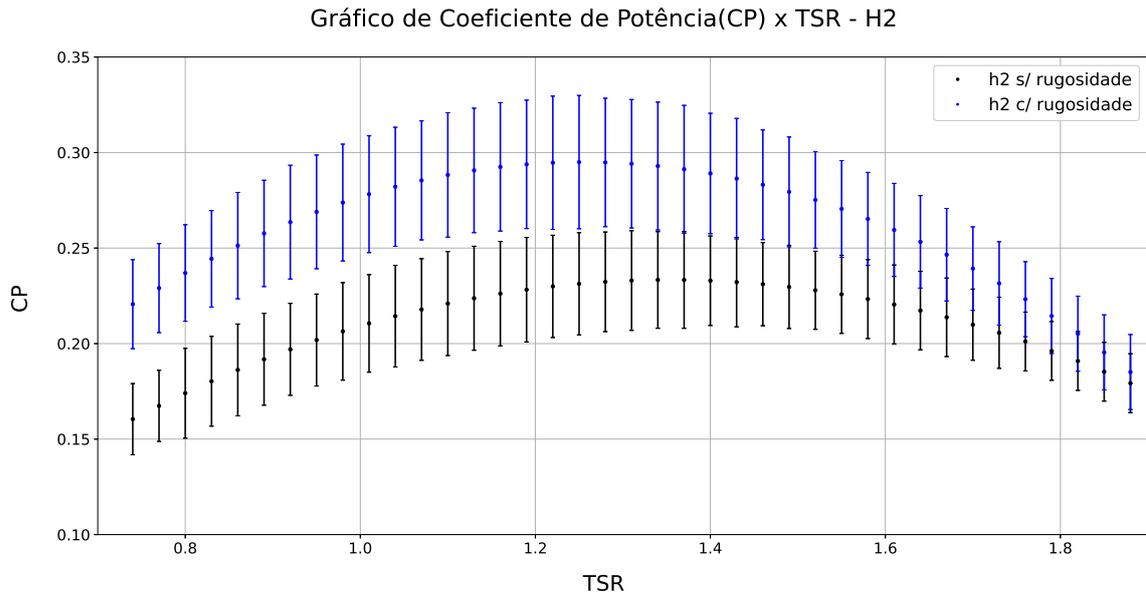


Figura 4.21 – Gráfico de Cp vs TSR para os arranjos I e II na posição  $h_2$ .

Através da análise do escoamento a montante já realizada, observou-se que esse escoamento não é responsável pelas alterações de Cp ocorridas, pois o déficit de velocidade observado nos perfis, mesmo para o caso rugoso, não ocorrem nem próximo da altura mais baixa da ponta de pá, o que faz concluir que as mudanças de Cp podem estar relacionadas com o escoamento à jusante. Na análise da intensidade de turbulência, observa-se que o afastamento da axissimetria aumenta com a rugosidade da superfície devido ao aumento da distribuição não uniforme dos níveis de velocidade e turbulência no nível da turbina induzida pela rugosidade. Neste ponto, observou-se que precisa-se realizar mais estudos específicos das interações que ocorrem a jusante nessa altura, e detalhar os acontecimentos físicos que proporcionam o aumento de Cp e quais relações possuem com o aumento de rugosidade.

# 5 CONCLUSÃO

---

*Esse capítulo apresenta uma conclusão sobre os resultados experimentais analisados.*

Um experimento de túnel de vento foi realizado para estudar a influência da altura do rotor em relação ao solo e da rugosidade do terreno no desempenho de turbinas livres de eixo horizontal. A anemometria de fio quente foi usada para obter medições detalhadas da velocidade do vento, intensidade da turbulência em uma seção longitudinal em diferentes posições a montante e a jusante do rotor. Curvas de coeficiente de potência em função do TSR foram obtidas experimentalmente para cada combinação de arranjo de solo e posição do rotor. A turbina foi colocada em três alturas diferentes,  $h_1 = 145\text{mm}$ ,  $h_2 = 295\text{mm}$  e  $h_3 = 445\text{mm}$ , para o arranjo I (sem rugosidade) e o arranjo II (com rugosidade) provocado pela disposição de correntes espaçadas de maneira uniforme com o intuito de aumentar a turbulência. Ênfase especial foi colocada na quantificação da magnitude e distribuição espacial do déficit de velocidade e no aumento da intensidade da turbulência na esteira da turbina em relação ao fluxo de entrada da camada limite. Essas quantidades são fatores importantes que afetam a potência da turbina e as cargas de fadiga em parques eólicos. Após o processamento e análise dos dados experimentais, as seguintes conclusões foram estabelecidas:

- Para o desenvolvimento da camada limite no arranjo I, estimou-se que seu comportamento laminar atua até a posição do rotor, no qual, até mesmo para o arranjo mais próximo da superfície, o escoamento a montante da camada limite não tende a exercer interferência no rotor, pois está distante da ponta da pá, lembrando que nesta altura, o eixo está a 145 mm da superfície e a ponta da pá a 35 mm, para uma espessura de camada limite laminar de aproximadamente 5 mm;
- Para o escoamento a montante, observou-se que a camada limite não interage com as pás do rotor no caso sem rugosidade, concluindo-se que os efeitos de camada limite a montante não interferem no coeficiente de potência da turbina. Porém, para o caso rugoso, a intensidade de turbulência gerada por esse escoamento encontra-se com a pá do rotor na altura de eixo de 145 mm,  $h_1$ , ainda a montante, o que indica que os efeitos de camada limite turbulenta podem influenciar negativamente no coeficiente de potência, visto que mais da metade da pá, em sua porção inferior, está inserida na camada limite que vai ao encontro do rotor no escoamento a montante. Tais efeitos não aparecem para as outras alturas do rotor;
- Para as curvas de coeficiente de potência, devido às barras de erro, considerou-se que a altura  $h_2$  e  $h_3$  fossem a mesma a curva, para todos os efeitos. De acordo com a análise comparativa realizada entre as alturas  $h_1$  e  $h_2$  para cada arranjo se superfície separadamente, observou-se que para o caso sem rugosidade o coeficiente de potência para a

turbina mais próxima ao chão foi superior em 20% ao da turbina mais distante. Porém, esse efeito foi invertido para no arranjo II, no qual o  $C_p$  da posição  $h_2$  sobressaiu o da posição  $h_1$ ;

- Com a análise do escoamento a jusante sem rugosidade, concluiu-se através dos gráficos de contorno de velocidade, intensidade de turbulência e energia cinética turbulenta que há um aumento da velocidade na posição  $h_1$  na região inferior da esteira próxima. Essa aceleração pode ser explicada devido aos efeitos decorrentes do contato da região de máximo déficit de velocidade, na camada de cisalhamento anular definida pelos vórtices de ponta de pá, que vai ao encontro da superfície do solo. Nesse momento acontece, na parte inferior, um efeito de confinamento do gradiente de baixa pressão da esteira próxima, no qual, com base na teoria do disco atuador e conservação da massa, eleva-se a potência da máquina geradora. Para a altura  $h_2$ , a distância do rotor para a superfície impede que efeitos de camada limite ou de confinamento possam modificar o comportamento da máquina livre. Pode-se concluir que para o caso com superfície lisa, a posição mais distante dos efeitos de parede pode não ser o ponto ótimo para obtenção da maior potência gerada, pois o efeito de confinamento influencia num aumento considerável do coeficiente de potência;
- Para o escoamento a jusante para o arranjo II, a rugosidade serviu para aumentar expressivamente a espessura da camada limite, de maneira que ela pudesse interagir com o rotor. Na posição  $h_1$  apresentou-se uma queda no coeficiente de potência em relação a superfície lisa, no qual a turbina está localizada na camada limite, o que leva a uma distribuição de intensidade de turbulência que é marcadamente não axissimétrica e também não gaussiana em todas as distâncias, conforme mostrado nos perfis de  $h_1$ . Fica evidente que existe uma interação entre a camada limite e o rotor que pode reduzir a potência gerada quando ela acontece de forma isolada, ou seja, na ausência de outros mecanismos, como, por exemplo, o mecanismo de confinamento, e o rotor da turbina de eixo horizontal está dentro de sua região. Na posição  $h_2$  o fluxo de entrada é uniforme, e as esteiras da turbina mostram uma distribuição transversal axissimétrica da intensidade de turbulência, sendo que, nesse caso, a diferença das curvas de  $C_p$  entre os arranjos não estariam associadas ao escoamento a montante, porque aparentemente o escoamento é o mesmo ao passar pelo motor nessa altura;
- Na análise comparativa dos dois arranjos, conseguiu-se concluir que para o posicionamento mais próximo do solo os efeitos de camada limite e de confinamento do rotor competem entre si no resultado de potência gerada, sendo que para o caso rugoso a camada limite turbulenta diminui o coeficiente de potência e para o caso liso obteve-se o maior pico de  $C_p$  experimental deste trabalho. Porém, para  $h_2$ , existem lacunas na conclusão, pois observa-se que o afastamento da axissimetria aumenta com a rugosidade da superfície devido ao aumento da distribuição não uniforme dos níveis

de velocidade e turbulência no nível da turbina induzida pela rugosidade, porém há um aumento de  $C_p$  em relação ao caso liso que não se justifica com o escoamento à montante, podendo estar relacionado com as estruturas turbulentas a jusante do rotor;

- Conclui-se que é necessário estudar esses dois fenômenos ocorrendo em proporções mais variadas, numa escala mais variada de interação mútua entre eles, para eventualmente encontrar e otimizar o ponto ótimo, ou até mesmo um ponto de mínimo no qual um pode cancelar o outro.

Com isso, foi identificado que a interação da camada limite turbulenta com o rotor de turbina axial de eixo horizontal reduz a potência, porque há um déficit de velocidade através do rotor, por outro lado, também foi identificado que os resultados experimentais indicam que quando não há interação com as camadas limites, como acontece com o a superfície lisa, a aproximação do rotor em relação ao solo pode ocasionar uma elevação da potência da curva de  $CP$ , ao que se atribui a um aumento da vazão devido a um efeito de confinamento. Foi concluído que esses dois efeitos concorrentes podem atuar simultaneamente num mesmo rotor a depender das condições de escoamento, da espessura da camada limite turbulenta ou não e da altura do rotor em relação a superfície, de forma a variar expressivamente a curva de potência da turbina em relação a curva de potência nominal que é experimentada sem o efeito de aproximação do solo e sem o efeito de interação da camada limite.

Existe uma grande aplicabilidade com os resultados deste trabalho, uma delas é que no Brasil existe uma malha viária muito grande e um grande percentual desta malha é compostas por igarapés com potencial de geração de energia, mas que tem o efeito de confinamento por conta da geometria dos canais. Neste caso, a presença de um confinamento pode ser benéfico na geração de energia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- 1 CHENG, S. et al. On the Wind Turbine Wake and Forest Terrain Interaction. *Energies*, v. 14, n. 21, p. 7204, jan. 2021. ISSN 1996-1073. Number: 21 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- 2 TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. *A First Course in Turbulence*. 1st edition. ed. Cambridge, Mass: The MIT Press, 1972. ISBN 978-0-262-20019-6.
- 3 BURTON, T.; JENKINS, N.; SHARPE, D. *Wind Energy Handbook*. 2ª edição. ed. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-0-470-69975-1.
- 4 BASTANKHAH, M.; PORTÉ-AGEL, F. A new analytical model for wind-turbine wakes. *Renewable Energy*, v. 70, n. C, p. 116–123, 2014. Publisher: Elsevier.
- 5 GARRETT, C.; CUMMINS, P. The efficiency of a turbine in a tidal channel. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 588, p. 243–251, out. 2007. ISSN 1469-7645, 0022-1120. Publisher: Cambridge University Press.
- 6 ABNT, A. B. d. N. T. *NBRISO4288 Especificações geométricas de produto(GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade*. 2008.
- 7 MACÍAS, M. M. *Estudo experimental em túnel de vento de turbinas de eixo horizontal*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, abr. 2016.
- 8 JUNIOR, A. C. P. B. et al. On the design of propeller hydrokinetic turbines: the effect of the number of blades. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 41, n. 6, p. 253, maio 2019. ISSN 1806-3691.
- 9 MENDES, R. C. F. *Interação entre esteiras aerodinâmicas de turbinas de eixo horizontal em arranjos*. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília, out. 2020. Accepted: 2021-03-12T12:10:53Z.
- 10 JØRGSEN, F. E. *How to measure turbulence with ho-wire anemometers - a practical guide*. Skovlunde, Denmark: Dantec Dynamics A/S, 2002.
- 11 SIDDIQUI, M. S. et al. Reduced order model of offshore wind turbine wake by proper orthogonal decomposition. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v. 82, p. 108554, abr. 2020. ISSN 0142-727X.
- 12 OPEC, O. o. t. P. E. C. *OPEC : World Oil Outlook*. 2021. Disponível em: <[https://www.opec.org/opec\\_web/en/publications/340.htm](https://www.opec.org/opec_web/en/publications/340.htm)>.
- 13 BHUTTA, M. M. A. et al. Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 4, p. 1926–1939, maio 2012. ISSN 1364-0321.
- 14 SIDDIQUI, M. S. et al. Numerical investigation of modeling frameworks and geometric approximations on NREL 5 MW wind turbine. *Renewable Energy*, v. 132, p. 1058–1075, mar. 2019. ISSN 0960-1481.

- 15 IEA, I. E. A. *Wind - Fuels & Technologies*. 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/wind>>.
- 16 IEA, I. E. A. *Renewables Data Explorer – Data Tools*. 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewables-2021-data-explorer>>.
- 17 EPE, E. d. P. E. *MATRIZ ENERGÉTICA*. 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>.
- 18 IEA, I. E. A. *Electricity - Fuels & Technologies*. 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/electricity>>.
- 19 IEA, I. E. A. *Transformation – Key World Energy Statistics 2021 – Analysis*. 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/transformation>>.
- 20 SIDDIQUI, M. S.; KVAMSDAL, T.; RASHEED, A. High Fidelity Computational Fluid Dynamics Assessment of Wind Tunnel Turbine Test. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1356, n. 1, p. 012044, out. 2019. ISSN 1742-6596. Publisher: IOP Publishing.
- 21 BARNES, A.; HUGHES, B. Determining the impact of VAWT farm configurations on power output. *Renewable Energy*, v. 143, p. 1111–1120, dez. 2019. ISSN 0960-1481.
- 22 PENG, H. Y. et al. Assessment and optimization of the power performance of twin vertical axis wind turbines via numerical simulations. *Renewable Energy*, v. 147, p. 43–54, mar. 2020. ISSN 0960-1481.
- 23 SHIRAZ, M. Z.; DILIMULATI, A.; PARASCHIVOIU, M. Wind power potential assessment of roof mounted wind turbines in cities. *Sustainable Cities and Society*, v. 53, fev. 2020. ISSN 2210-6707.
- 24 SIDDIQUI, M. S.; RASHEED, A.; KVAMSDAL, T. Validation of the numerical simulations of flow around a scaled-down turbine using experimental data from wind tunnel. *Wind and Structures*, v. 29, n. 6, p. 405–416, 2019. ISSN 1226-6116. Publisher: Techno-Press.
- 25 NEFF, D. E.; MERONEY, R. N. Wind-tunnel modeling of hill and vegetation influence on wind power availability. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 74-76, p. 335–343, abr. 1998. ISSN 0167-6105.
- 26 CHAMORRO, L. P.; PORTÉ-AGEL, F. A Wind-Tunnel Investigation of Wind-Turbine Wakes: Boundary-Layer Turbulence Effects. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 132, n. 1, p. 129–149, jul. 2009. ISSN 1573-1472.
- 27 DINCER, I. *Comprehensive Energy Systems*. 1ª edição. ed. Amsterdam: Elsevier, 2018. ISBN 978-0-12-809597-3.
- 28 ZENDEHBAD, M.; CHOKANI, N.; ABHARI, R. S. Impact of forested fetch on energy yield and maintenance of wind turbines. *Renewable Energy*, v. 96, p. 548–558, out. 2016. ISSN 0960-1481.
- 29 KLEUSBERG, E. Wind-turbine wakes - Effects of yaw, shear and turbine interaction. 2019. Publisher: KTH Royal Institute of Technology.

- 30 PORTÉ-AGEL, F.; BASTANKHAH, M.; SHAMSODDIN, S. Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 174, n. 1, p. 1–59, jan. 2020. ISSN 1573-1472.
- 31 BRITTO, V. S. et al. WAKE CHARACTERIZATION IN ROW ARRAY OF HYDROKINETICS TURBINES. *Revista de Engenharia Térmica*, v. 17, n. 1, p. 41–48, jun. 2018. ISSN 1676-1790. Number: 1.
- 32 AES, C. Portal da empresa, *AES Brasil*. Disponível em: <<https://www.aesbrasil.com.br/pt-br>>.
- 33 VERMEER, L. J.; SØRENSEN, J. N.; CRESPO, A. Wind turbine wake aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, v. 39, n. 6, p. 467–510, ago. 2003. ISSN 0376-0421.
- 34 GAURIER, B. et al. Experimental study of bathymetry generated turbulence on tidal turbine behaviour. *Renewable Energy*, v. 156, p. 1158–1170, ago. 2020. ISSN 0960-1481.
- 35 ZHANG, W.; MARKFORT, C. D.; PORTÉ-AGEL, F. Wind-Turbine Wakes in a Convective Boundary Layer: A Wind-Tunnel Study. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 146, n. 2, p. 161–179, fev. 2013. ISSN 1573-1472.
- 36 MACIAS, M. M. et al. On the upscaling approach to wind tunnel experiments of horizontal axis hydrokinetic turbines. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 42, n. 10, p. 539, set. 2020. ISSN 1806-3691.
- 37 ZHANG, W.; MARKFORT, C. D.; PORTÉ-AGEL, F. Near-wake flow structure downwind of a wind turbine in a turbulent boundary layer. *Experiments in Fluids*, v. 52, n. 5, p. 1219–1235, maio 2012. ISSN 1432-1114.
- 38 SIDDIQUI, M. S. et al. A numerical investigation to analyze effect of turbulence and ground clearance on the performance of a roof top vertical-axis wind turbine. *Renewable Energy*, v. 164, p. 978–989, fev. 2021. ISSN 0960-1481.
- 39 JOHN, I. H.; VAZ, J. R. P.; WOOD, D. Aerodynamic performance and blockage investigation of a cambered multi-bladed windmill. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1618, n. 4, p. 042003, set. 2020. ISSN 1742-6596. Publisher: IOP Publishing.
- 40 JOHN, I. H.; WOOD, D. H.; VAZ, J. R. Helical vortex theory and blade element analysis of multi-bladed windmills. *Wind Energy*, v. 26, n. 2, p. 228–246, 2023. ISSN 1099-1824. \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/we.2796>.
- 41 SOGACHEV, A. et al. WIND ENERGY AVAILABILITY ABOVE GAPS IN A FOREST. v. 6, p. 4198–4206, 2009.
- 42 RODRIGO, J. S.; BEECK, J. van; DEZSÖ-WEIDINGER, G. Wind tunnel simulation of the wind conditions inside bidimensional forest clear-cuts. Application to wind turbine siting. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 95, n. 7, p. 609–634, jul. 2007. ISSN 0167-6105.
- 43 RYI, J. et al. Blockage effect correction for a scaled wind turbine rotor by using wind tunnel test data. *Renewable Energy*, v. 79, p. 227–235, jul. 2015. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114007873>>.

- 44 NEUNABER, I. et al. Distinct Turbulent Regions in the Wake of a Wind Turbine and Their Inflow-Dependent Locations: The Creation of a Wake Map. *Energies*, v. 13, n. 20, p. 5392, jan. 2020. ISSN 1996-1073. Number: 20 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- 45 BARLAS, E.; BUCKINGHAM, S.; BEECK, J. van. Roughness Effects on Wind-Turbine Wake Dynamics in a Boundary-Layer Wind Tunnel. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 158, n. 1, p. 27–42, jan. 2016. ISSN 1573-1472.
- 46 BELCHER, S. E.; JERRAM, N.; HUNT, J. C. R. Adjustment of a turbulent boundary layer to a canopy of roughness elements. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 488, p. 369–398, jul. 2003. ISSN 1469-7645, 0022-1120. Publisher: Cambridge University Press.
- 47 TOBIN, N.; HAMED, A. M.; CHAMORRO, L. P. An Experimental Study on the Effects of Winglets on the Wake and Performance of a Model Wind Turbine. *Energies*, v. 8, n. 10, p. 11955–11972, out. 2015. ISSN 1996-1073. Number: 10 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- 48 FLORES, O.; JIMÉNEZ, J. Effect of wall-boundary disturbances on turbulent channel flows. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 566, p. 357–376, nov. 2006. ISSN 1469-7645, 0022-1120. Publisher: Cambridge University Press.
- 49 STEIN, V. P.; KALTENBACH, H.-J. Influence of ground roughness on the wake of a yawed wind turbine - a comparison of wind-tunnel measurements and model predictions. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1037, n. 7, p. 072005, jun. 2018. ISSN 1742-6596. Publisher: IOP Publishing.
- 50 CHAMORRO, L. P.; ARNDT, R.; SOTIROPOULOS, F. Reynolds number dependence of turbulence statistics in the wake of wind turbines. *Wind Energy*, v. 15, n. 5, p. 733–742, 2012. ISSN 1099-1824. \_eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/we.501>.
- 51 NUNES, M. M. et al. An experimental study on the diffuser-enhanced propeller hydrokinetic turbines. *Renewable Energy*, v. 133, p. 840–848, abr. 2019. ISSN 0960-1481.
- 52 VAZ, J. R. P. et al. Powertrain assessment of wind and hydrokinetic turbines with diffusers. *Energy Conversion and Management*, v. 195, p. 1012–1021, set. 2019. ISSN 0196-8904.
- 53 VAZ, J. R. P.; OKULOV, V. L.; WOOD, D. H. Finite blade functions and blade element optimization for diffuser-augmented wind turbines. *Renewable Energy*, v. 165, p. 812–822, mar. 2021. ISSN 0960-1481.
- 54 RICHARDSON, L. F. Weather prediction by numerical process. p. 1881–1953, 1922.
- 55 KOLMOGOROV, A. N. et al. Dissipation of energy in the locally isotropic turbulence. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, v. 434, n. 1890, p. 15–17, jan. 1997. Publisher: Royal Society.
- 56 BETZ, A. *Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen*. Staufen bei Freiburg: Ökobuch Verlag, 1926. ISBN 978-3-922964-11-7.

- 57 CRESPO, A.; HERNÁNDEZ, J. Turbulence characteristics in wind-turbine wakes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 61, n. 1, p. 71–85, jun. 1996. ISSN 0167-6105.
- 58 SANDERSE, B. Aerodynamics of wind turbine wakes Literature review. jan. 2009.
- 59 GÓMEZ-ELVIRA, R. et al. Anisotropy of turbulence in wind turbine wakes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 93, n. 10, p. 797–814, out. 2005. ISSN 0167-6105.
- 60 BARLOW, J. B.; RAE, W. H.; POPE, A. *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. 3rd revised ed. edição. ed. New York: Wiley-Interscience, 1999. ISBN 978-0-471-55774-6.
- 61 BAHAJ, A. S. et al. Power and thrust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank. *Renewable Energy*, v. 32, n. 3, p. 407–426, 2007. Publisher: Elsevier.
- 62 ABNT, A. B. d. N. T. *NBRISO4287: Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade*. 2002.
- 63 CHOMET, S.; SMOL'YAKOV, A. V.; TKACHENKO, V. M. *The Measurement of Turbulent Fluctuations: An Introduction to Hot-Wire Anemometry and Related Transducers*. Softcover reprint of the original 1st 1983 ed. edição. [S.l.]: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-81985-8.
- 64 MENDES, R. C. F. et al. Monitoring a hydrokinetic converter system for remaining energy in hydropower plants. *IEEE Latin America Transactions*, v. 18, n. 10, p. 1683–1691, out. 2020. ISSN 1548-0992. Conference Name: IEEE Latin America Transactions.
- 65 BEJAN, A. *Convection Heat Transfer*. 4th ed. edição. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 978-0-470-90037-6.
- 66 TROPEA, C.; YARIN, A.; FOSS, J. F. (Ed.). *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. (Springer Handbooks). ISBN 978-3-662-49162-1.
- 67 TOWNSEND, A. A. R. *The Structure of Turbulent Shear Flow*. 2nd edition. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1980. ISBN 978-0-521-29819-3.
- 68 HINZE, J. O.; DRAKE, R. M. *Turbulence Intro to Mechanism and Theory Hinze 1959*. 1st edition. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1959.
- 69 AL-OBAIDI, A. S. M.; MADIVAANAN, G. Investigation of the Blockage Correction to Improve the Accuracy of Taylor's Low-Speed Wind Tunnel. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 2222, n. 1, p. 012008, maio 2022. ISSN 1742-6596. Publisher: IOP Publishing.
- 70 WILLMARTH, W. W.; BOGAR, T. J. Survey and new measurements of turbulent structure near the wall. *The Physics of Fluids*, v. 20, n. 10, p. S9–S21, out. 1977. ISSN 0031-9171. Publisher: American Institute of Physics.

# **APPENDIX**

# A APÊNDICE

---

Este adendo possui links para os códigos em python utilizados no processamento e análise, para os dados coletados de velocidade e Cp e para as figuras produzidas na análise das quais não foram empregadas no corpo do texto, com a finalidade de diminuir o número de páginas desse trabalho e facilitar a consulta para trabalhos futuros.

## **A.1 CÓDIGOS DE ANÁLISE E PROCESSAMENTO DISPONÍVEIS EM:**

- <<https://github.com/GuilhermeTabatinga/Mestrado.git>>

## **A.2 DADOS DE ANEMOMETRIA E CP DESTE TRABALHO DISPONÍVEIS EM:**

- <<https://ln5.sync.com/dl/3f65fb930/xtfjkipfi-cujyf5c8-wku8yeui-6s62hjn>>
- <<https://ln5.sync.com/dl/ca763f300/nrxgjamb-ym9brv5-8ahrhk5h-qu2zcixz>>

## **A.3 GRÁFICOS E FIGURAS QUE NÃO FORAM UTILIZADOS NO TEXTO:**

- <<https://ln5.sync.com/dl/97609ed20/2xi3j7rq-wwj8dpxv-fnkkkgz9-5hiutasp>>