

Universidade Federal de Goiás (UFG)
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC)

Pedro Augusto Marinho de Freitas Rodrigues

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTOS SOBRE COLINAS PARA OBTER
POTENCIAL EÓLICO**

Goiânia

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminharem o produto final, o autor e o orientador firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome completo do autor: Pedro Augusto Marinho de Freitas Rodrigues

Título do trabalho: Estudo experimental de escoamentos sobre colinas para obter potencial eólico

2. Informações de acesso ao documento

Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)s autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Pamplona Mariano, Professor do Magistério Superior**, em 05/08/2024, às 09:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Augusto Marinho De Freitas Rodrigues, Discente**, em 05/08/2024, às 09:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4677884** e o código CRC **454E5B12**.

Pedro Augusto Marinho de Freitas Rodrigues

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTOS SOBRE COLINAS PARA OBTER
POTENCIAL EÓLICO**

Projeto Final de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Goiás – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação.

Orientador: Felipe Pamplona Mariano

Goiânia

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Rodrigues, Pedro Augusto Marinho de Freitas
ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTOS SOBRE
COLINAS PARA OBTER POTENCIAL EÓLICO [manuscrito] / Pedro
Augusto Marinho de Freitas Rodrigues. - 2024.
LXXI, 71 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Pamplona Mariano.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2024.
Bibliografia. Apêndice.
Inclui siglas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. escoamento sobre colinas. 2. túnel de vento. 3. perfil de
velocidade. 4. potencial eólico. I. Mariano, Felipe Pamplona, orient. II.
Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos dezessete dias do mês de julho do ano de 2024, às 15h00min, iniciou-se a sessão pública de defesa do Projeto Final de Curso (PFC) intitulado “Estudo experimental de escoamentos sobre colinas para obter potencial eólico”, de autoria de Pedro Augusto Marinho de Freitas Rodrigues, do curso de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Professor Dr. Felipe Pamplona Mariano (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Dr. Marlipe Garcia Fagundes Neto (EMC/UFG) e Professor Dr. Leonardo de Queiroz Moreira (EMC/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 8,0 (oito), tendo sido o PFC considerado aprovado, mediante entrega das correções solicitadas pelos membros da Banca Examinadora.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Pamplona Mariano, Professor do Magistério Superior**, em 17/07/2024, às 16:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marlipe Garcia Fagundes Neto, Professor do Magistério Superior**, em 17/07/2024, às 16:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo De Queiroz Moreira, Professor do Magistério Superior**, em 17/07/2024, às 16:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4677843** e o código CRC **C11C202E**.

Agradecimentos

À minha família, por estarem sempre ao meu lado, por estarem dispostos a ajudar em qualquer momento e por incentivar uma boa educação acima de tudo.

Aos amigos, por momentos de descontração ou auxílio quando necessário.

Ao meu orientador, pela paciência e oportunidade de realizar esse desafio, o qual era exatamente o que eu esperava realizar ao começar o curso.

Aos professores, os quais me auxiliaram pelo caminho.

À Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, pela estrutura de aprendizado e oportunidade de contato com experiências que podem me ser deveras vantajosas.

À Eletrobras/FURNAS e ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) da ANEEL pelos empréstimos de equipamentos e incentivos disponibilizados para a realização do presente trabalho.

Resumo

Como consequência das mudanças climáticas e incentivos pela busca de fontes de energia renováveis que resultem em menos impactos ambientais, mostra-se necessário desenvolvimento e pesquisas nessas áreas. Tendo isso em vista, este trabalho visa ao estudo experimental sobre as interações do fluxo de vento com colinas; em particular, deseja-se traçar perfis de velocidade em certas posições - em especial acima da colina -, realizar comparações entre tais pontos e identificar posições de melhores potenciais eólicos. Disponibilizado pela empresa Eletrobras/FURNAS, o LATEF da UFG possui os equipamentos necessários para a realização desse experimento, incluindo o Tubo de Pitot, o Túnel de Vento, os manômetros e os *Softwares* para a coleta de dados. A partir disso, realizou-se aquisições de dados a fim de se traçar três perfis verticais de velocidade de vento ao longo da direção horizontal em relação à colina: um no montante da colina, um na posição central (que coincide com o cume da colina) e o terceiro na posição que corresponde a 3/4 da largura da colina, e constrói-se uma curva de potencial eólico a partir das velocidades obtidas. Os experimentos foram realizados na faixa de Número de Reynolds entre $8,5 \cdot 10^4$ e $8,7 \cdot 10^4$, baseados na altura da colina. Nos resultados é mostrado que, embora contraintuitivo, existem posições a jusante do cume da montanha onde o potencial eólico sofre um grande aumento em relação ao potencial eólico a montante da colina. Por fim, foram também observados os tubos de corrente resultantes da interação do vento com a colina e as áreas de recirculação.

Palavras-chave: Escoamento sobre colinas, túnel de vento, perfil de velocidade, potencial eólico.

Abstract

As a consequence of the climatic changes and incentives for the pursuit of renewable energy sources that result in fewer environmental impacts, it is necessary to develop and conduct research in these areas. With this in mind, this work aims to experimentally study the interactions of wind flow with hills; in particular, it seeks to plot velocity profiles at certain positions – especially above the hill –, perform comparisons between these points, and identify positions with better wind potential. Provided by the company Eletrobras/FURNAS, the LATEF laboratory at UFG has the necessary equipment for conducting this experiment, including the Pitot Tube, Wind Tunnel, manometers, and data collection software. Based on this, data acquisitions were made to plot three vertical wind speed profiles along the horizontal direction relative to the hill: one upstream of the hill, one at the central position (which coincides with the hilltop), and the third at the position corresponding to 3/4 of the hill's width, and a wind potential curve is constructed from the obtained speeds. The experiments were conducted in the Reynolds number range between $8,5 \cdot 10^4$ and $8,7 \cdot 10^4$, based on the height of the hill. The results show that, although counterintuitive, there are positions downstream of the hilltop where the wind potential significantly increases compared to the wind potential upstream of the hill. Finally, the resulting flow tubes from the wind-hill interaction and the recirculation areas were also observed.

Keywords: Flow over hills, wind tunnel, velocity profile, wind potential.

Lista de Figuras

Figura 1 - Tendências de capacidade elétrica provinda da energia eólica.....	1
Figura 2 - LCOE médio ponderado de projetos eólicos onshore de grande escala recém-comissionados, por país, 2010-2022.....	2
Figura 3 - Matriz energética brasileira, em GW.....	3
Figura 4 - Mosaico de imagens de satélite (SPOT Image), sobreposto ao relevo sombreado (a esquerda) e Modelo de rugosidade, sobreposto ao relevo sombreado (a direita).....	4
Figura 5 - Velocidade média trimestral.....	4
Figura 6 - Colina proposta para estudo.....	7
Figura 7 - Corpo delgado do Tubo de Pitot e a relação entre sua inclinação e erro de medição..	8
Figura 8 - Tubo de Pitot como medidor de velocidade na asa de uma aeronave.....	9
Figura 9 - Variação de velocidade e pressão através de um medidor de obstrução de Bernoulli generalizado.....	10
Figura 10 - Crescimento de uma camada-limite sobre uma placa plana.....	12
Figura 11 - Ilustração da interação forte entre as regiões viscosa e não viscosa na parte traseira do escoamento em torno de um corpo rombudo: (a) cenário idealizado e claramente falso do escoamento em torno do corpo rombudo; (b) cenário real do escoamento em torno de um corpo rombudo.....	14
Figura 12 - Crescimento da camada-limite e separação em uma configuração bocal-difusor..	14
Figura 13 - Comparação do componente de vorticidade (instantâneo) xz normal à seção transversal em 11 Números de Reynolds diferentes ($Re = 100$ a 10.595) em um valor escolhido arbitrariamente.....	15
instantâneo no tempo(...); (Traduzido).....	15
Figura 14 - Área de passagem do escoamento por uma turbina eólica de área circular.....	17
Figura 15 - Túnel de Vento aberto do tipo exaustor com pressão negativa.....	18
Figura 16 - Medidor de vazão tipo Área Diferencial.....	19
Figura 17 - Volume de Controle do TV para o experimento.....	19
Figura 18 - Seção de Testes.....	20
Figura 19 - Estrutura para o Tubo de Pitot e Tubo de Pitot utilizado no experimento.....	21
Figura 20 - Manômetro AeroAlcool, Módulo de Pressão 32x AA-TVCR3.....	22
Figura 21 - Exemplo de gráfico criado pelo Software AeroAlcool.....	22
Figura 22 - Anemômetro Digital ITAN 700 INSTRUTEMP.....	23
Figura 23 - Máquina de Fumaça Tec PORT F-950.....	24
Figura 24 - Câmera de alta velocidade Chronus 1.4.....	24
Figura 25 - Fonte Digital PLX para Diodos Laser.....	24
Figura 26 - Seção da colina.....	25
Figura 27 - Colina de teste.....	26
Figura 28 - Posição do Tubo de Pitot durante a construção da curva de calibração.....	27
Figura 29 - Posicionamento da colina na seção de testes com indicação dos pontos de medição.....	29

Figura 30 - Fluxograma do procedimento experimental.....	31
Figura 31 - Linhas de corrente percorrida pela fumaça, captura feita com câmera celular.....	45
Figura 32 - Linhas de corrente percorrida pela fumaça, captura feita com câmera de alta velocidade.....	45

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparação entre outros trabalhos de escoamentos sobre diferentes superfícies.....	5
Tabela 2 - Características do túnel de vento utilizado no experimento.....	18
Tabela 3 - Relação entre desvio padrão da média do diferencial de pressão e intervalo de medição.....	33
Tabela 4 - Diferencial de pressão medidos pelo medidor de área diferencial e pelo Tubo de Pitot estático, juntamente com suas respectivas incertezas.....	35
Tabela 5 - Tabela de volume específico do ar úmido no local de medição.....	36
Tabela 6 - Tabela de velocidade do ar no Ponto de Calibração.....	37
Tabela 7 - Tabela das propriedades do vento na posição 0.....	52
Tabela 8 - Tabela das propriedades do vento na posição 1.....	53
Tabela 9 - Tabela das propriedades do vento na posição 2.....	54

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Representação visual da relação entre o diferencial de pressão medido e o tempo de medição para 300 RPM.....	32
Gráfico 2 - Representação visual da relação entre desvio padrão da média e intervalo de medição para 300 RPM.....	33
Gráfico 3 - Exemplificação dos gráficos de desvio padrão da média em relação ao tempo para intervalo de medição de (a) 900 RPM e (b) 1500 RPM.....	34
Gráfico 4 - Representação visual da relação entre diferencial de pressão medido e a rotação do motor.....	35
Gráfico 5 - Relação entre velocidade obtida e rotação do motor.....	37
Gráfico 6 - Representação visual da curva de calibração do medidor por área diferencial a partir do Tubo de Pitot, incluindo a representação da incerteza dos pontos pedidos.....	38
Gráfico 7 - Perfil de velocidade na posição de Medição 0.....	39
Gráfico 8 - Perfil de velocidade na posição de Medição 1.....	40
Gráfico 9 - Perfil de velocidade na posição de Medição 2.....	41
Gráfico 10 - Perfis de velocidade das três posições.....	42
Gráfico 11 - Potencial eólico por área varrida pelas pás em função da altura das três posições de medição.....	44

Lista de Símbolos

USD	Dólares americanos
kWh	Quilowatt-hora
TWh	Terawatt-hora
P_e	Pressão estática
P_0	Pressão de estagnação
m	Metro
s	Segundo
R_e	Número de Reynolds
P	Pressão
ρ	Massa específica
g	Gravidade
V	Velocidade média
z	Posição vertical
cte	Constante
z_e	Posição vertical estática
P_0	Pressão na posição de estagnação
z_0	Posição vertical de estagnação
∂	Derivada Parcial
u, v	Componentes do vetor velocidade
x	Direção ao longo da parede sólida do túnel de vento
y	Direção normal à placa
μ	Coefficiente de viscosidade dinâmica
D	Tamanho característico do objeto de estudo
ν	Coefficiente de viscosidade cinemática
A	Área
Pot_{mec}	Potencial Mecânico
kg	Quilograma
W	Watt

Pot_{eol}	Potencial Eólico
U_{∞}	Velocidade do vento no infinito
∞	Infinito
σ	Incerteza
$\sigma_{média}$	Desvio padrão da média
n	Representação de número qualquer
$\overline{U_{\infty}}$	Velocidade média do vento no infinito
En	Notação para “ $\cdot 10^n$ ”
h	Altura
kPa	Quilopascal

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ENERGIA EÓLICA.....	1
1.2 RELAÇÃO ENTRE RELEVO E POTENCIAL EÓLICO.....	3
1.3 TRABALHOS RELACIONADOS A ESCOAMENTO SOBRE COLINAS.....	5
1.4 JUSTIFICATIVA.....	6
1.5 OBJETIVOS.....	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 TUBO DE PITOT.....	8
2.2 MEDIDOR DE VAZÃO POR ÁREA DIFERENCIAL.....	10
2.3 DESCOLAMENTO DA CAMADA LIMITE.....	11
2.4 Potencial Eólico.....	16
3 METODOLOGIA.....	18
3.1 DESCRIÇÃO E INTERAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	18
3.1.1 TÚNEL DE VENTO (TV).....	18
3.1.2 TUBO DE PITOT.....	20
3.1.3 MANÔMETRO.....	21
3.1.4 PRESSÃO ATMOSFÉRICA, TEMPERATURA E UNIDADE.....	23
3.1.5 MÁQUINA DE FUMAÇA E CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE.....	23
3.1.6 COLINA.....	25
3.1.5 MATERIAIS.....	26
3.2 MÉTODO.....	27
3.2.1 DETERMINAÇÃO DO PERÍODO DE MEDIÇÃO.....	27
3.2.2 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO.....	27
3.2.3 MEDIÇÕES NAS POSIÇÕES DE MEDIÇÃO SELECIONADAS.....	28
3.2.4 TRABALHANDO DADOS PARA OBTER-SE O PERFIL DE POTENCIAL EÓLICO.....	29
3.2.5 REPRESENTAÇÃO VISUAL POR FUMAÇA.....	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1 PERÍODO DE COLETA DE DADOS.....	32
4.2 CALIBRAÇÃO.....	34
4.3 VELOCIDADES.....	38
4.3.1 POSIÇÃO DE MEDIÇÃO 0.....	39
4.3.2 POSIÇÃO DE MEDIÇÃO 1.....	40
4.3.3 POSIÇÃO DE MEDIÇÃO 2.....	41
4.3.4 COMPARAÇÃO DE PERFIS DE VELOCIDADE.....	42
4.4 POTENCIAL EÓLICO.....	43
4.5 VISUALIZAÇÃO POR FUMAÇA.....	44
4.6 FONTES DE ERRO.....	46
5 CONCLUSÃO.....	48

5.1 TRABALHOS FUTUROS.....	49
REFERÊNCIAS.....	50
APÊNDICE.....	52

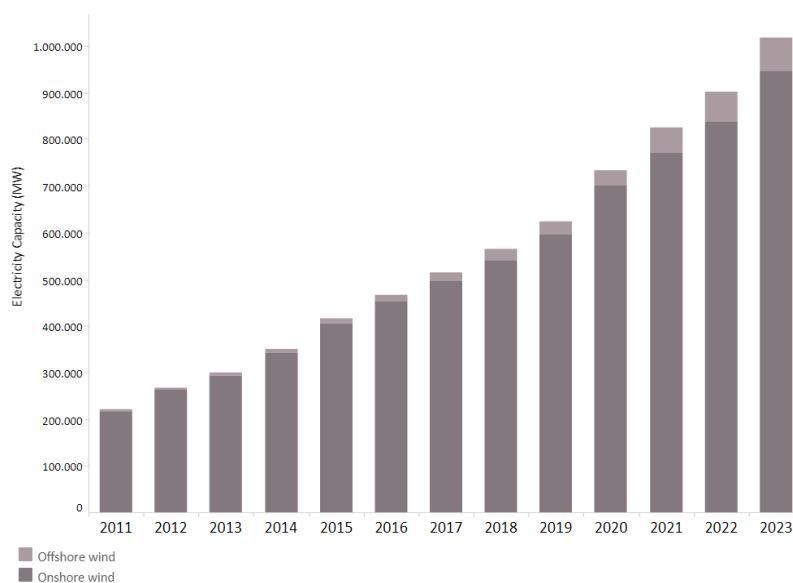
1 INTRODUÇÃO

1.1 ENERGIA EÓLICA

As turbinas eólicas surgiram há mais de um século, a partir do desenvolvimento do gerador elétrico, em 1830, segundo a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2024). As primeiras tentativas de aproveitar energia eólica ocorreram no Reino Unido e nos Estados Unidos em 1887 e 1888, respectivamente. Entretanto, considera-se que a produção de energia eólica moderna, na qual a energia cinética dos ventos é transformada em energia elétrica, foi desenvolvida na Dinamarca em 1891, quando se utilizaram turbinas de eixos horizontais.

Segundo a IRENA (2024), a capacidade global de geração de energia renovável sofreu um aumento por um fator de 98, indo de 7,5 GW em 1997 para 733 GW em 2018. Em particular, entre 2010 e 2020, a capacidade eólica cresceu 521 GW, e a produção de energia eólica subiu em um fator de 5,2 entre 2009 e 2019, chegando a 1412 TWh, sendo que apenas uma pequena parte dessa produção é de turbinas *offshore*, ver Figura 1.

Figura 1 - Tendências de capacidade elétrica provinda da energia eólica.

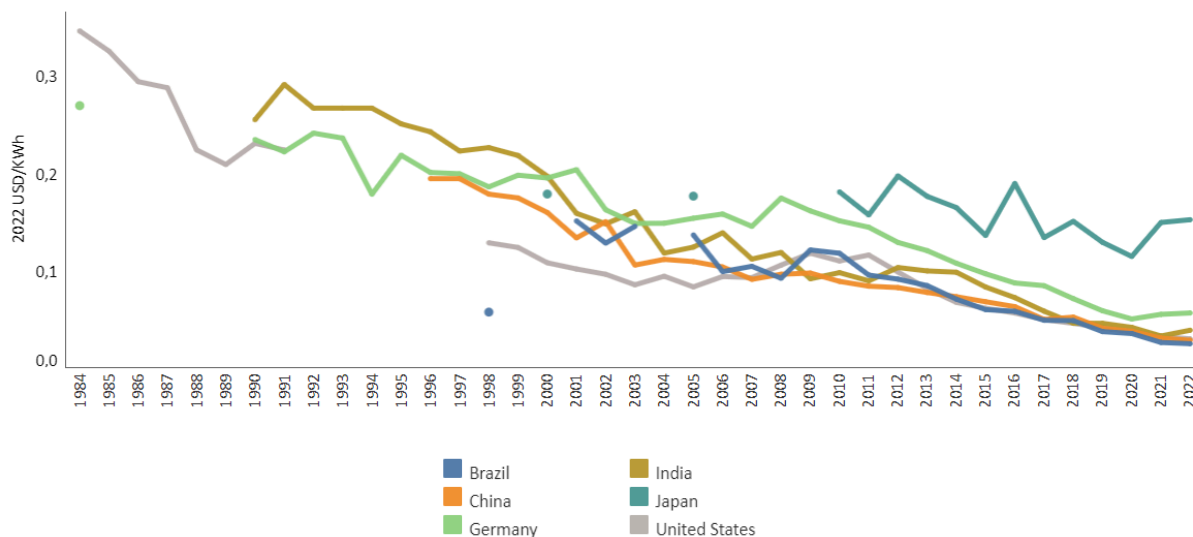


Fonte: IRENA (2024).

Ainda consoante a IRENA (2024), à medida que a tecnologia avança, os preços caem e as capacidades de geração aumentam. Entre 2010 e 2020, o custo nivelado da eletricidade (LCOE) de energia eólica em terra caiu 56%, de USD 0,089/kWh para USD 0,039/kWh (Figura 2). Aliado à queda de preços, notavelmente no Brasil, onde se possui um dos menores

custos nivelados de energia eólica do mundo, ainda existe uma busca por técnicas para se obter melhores eficiência e resultados (IRENA, 2024).

Figura 2 - LCOE médio ponderado de projetos eólicos *onshore* de grande escala recém-comissionados, por país, 2010-2022.

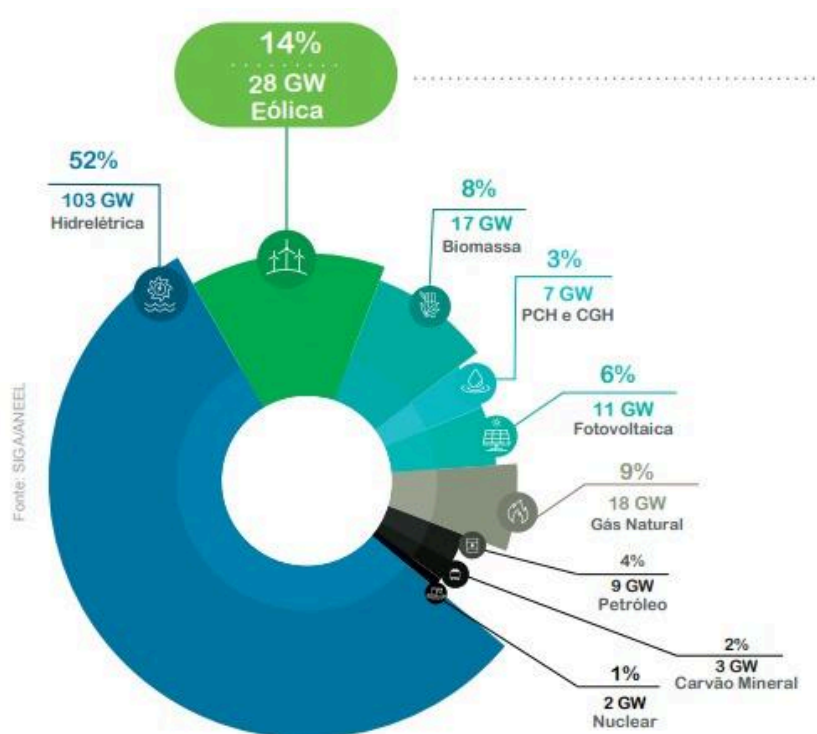


Fonte: IRENA (2024), adaptado.

No Brasil, segundo a Agência Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica, 2024), com origem no arquipélago de Fernando de Noronha em 1992, a produção de energia eólica é responsável por 12,4% de toda a geração de eletricidade injetada no Sistema Integrado Nacional (SIN) em 2022, o que corresponde a 81,45 TWh de energia gerados e a um aumento de 18,85% em relação à geração eólica no ano de 2021 (Figura 3).

Mostra-se importante destacar a qualidade do vento brasileiro para a instalação de parques eólicos. Para produzir energia eólica, são necessários ventos estáveis, com a intensidade certa e sem mudanças bruscas de velocidade ou de direção. O Brasil possui uma abundância desse tipo de vento, o que explica em grande medida o sucesso da produção de energia eólica no país nos últimos anos. As características de ventos adequados brasileiros resultam num fator de capacidade que é praticamente o dobro da média mundial (ABEEólica, 2024).

Figura 3 - Matriz energética brasileira, em GW.



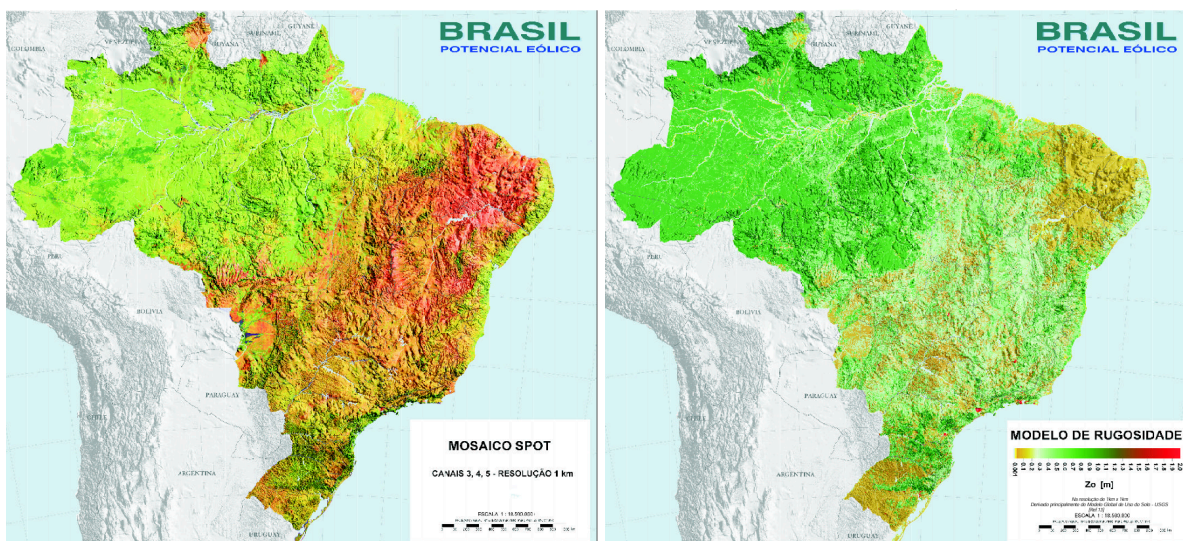
Fonte: ABEEólica (2024).

1.2 RELAÇÃO ENTRE RELEVO E POTENCIAL EÓLICO

Em 2002, o estudo do potencial eólico brasileiro para aproveitamento energético, o qual estava sendo objeto de estudos e inventário desde 1970, culminou na publicação do “Atlas do Potencial Eólico Brasileiro” (2001).

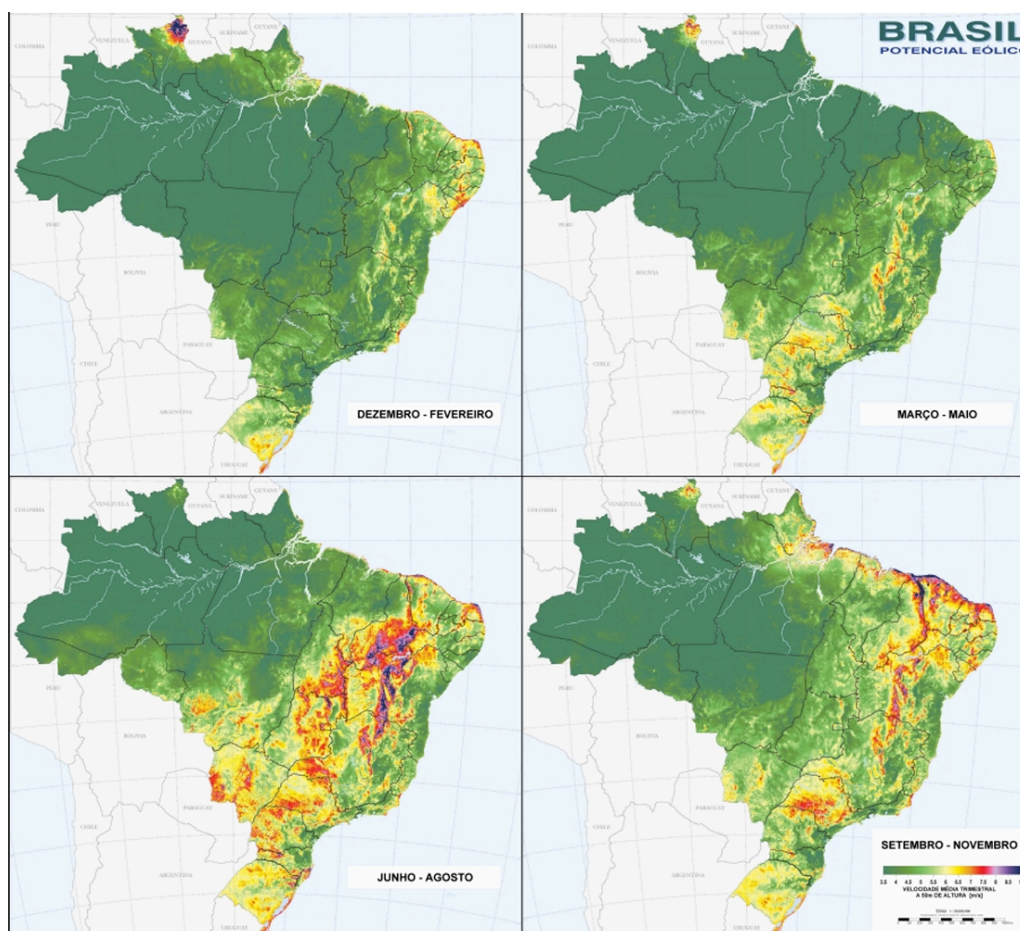
Por meio de simulações computacionais, imagens de satélites, dados reais coletados em diversas regiões pelo país de relevo, temperatura, precipitação e regime de vento, foram montados mapas de potenciais eólicos por região ao longo do ano. Nesse estudo, pode-se notar uma relação entre o relevo do Brasil e sua rugosidade (Figura 4), com velocidade média anual esperada para cada região (Figura 5). Disso, pode-se inferir que o relevo do local vai influenciar consideravelmente a velocidade do vento e, conseqüentemente, o potencial eólico da região.

Figura 4 - Mosaico de imagens de satélite (SPOT Image), sobreposto ao relevo sombreado (a esquerda) e Modelo de rugosidade, sobreposto ao relevo sombreado (a direita).



Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro

Figura 5 - Velocidade média trimestral.



Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro

1.3 TRABALHOS RELACIONADOS A ESCOAMENTO SOBRE COLINAS

Alguns autores realizaram trabalhos de escoamentos sobre diferentes superfícies, com diferenças uns para os outros. Dentre eles, destacam-se os da Tabela 1:

Tabela 1 - Comparação entre outros trabalhos de escoamentos sobre diferentes superfícies.

Autores	CFD/ Exp.	Tipo de TV	Objeto de estudo	Número de Reynolds	Forma de medição/ Método CFD	Ano
DUPRAT, C.	CFD	-	Colinas periódicas	395-590	LES/DES/DNS	2011
BREUER, M.	Ambos	Fechado	Colinas periódicas	100-10595	PIV LESOCC & MGLET	2008
JENA, S.	CFD	-	Estrutura cúbica	Não menciona	FLUENT	2022
BAYRON, P.	Exp.	Aberto	Turbina	67000	Anemômetro de fio quente	2024
PO-HUA,	CFD	-	Colinas periódicas	2800-10595	LES	2012
CASTAGN A, J.	CFD	-	Colina assimétrica 3D	6500	DNS	2012
MAIA, C. S. A.	Exp.	Aberto	Placa Plana	Não menciona	Pressão diferencial - Tubo de Pitot	2023

Fonte: Próprio Autor.

Discorrendo brevemente sobre cada trabalho apresentado na Tabela 1, Duprat et al., (2011) e os outros autores propõem um novo modelo para aproximar o perfil de velocidade na região próxima à parede de fluxos turbulentos submetidos a gradientes favoráveis de pressão no artigo *A wall-layer model for large-eddy simulations of turbulent flows with/out pressure gradient*. Nele, os autores simulam diferentes tipos de escoamentos, como em colinas periódicas e canais de escoamento, e obtêm sucesso nas simulações.

Em *Flow over periodic hills – Numerical and experimental study in a wide range of Reynolds numbers* (Breuer et al., 2008), os autores apresentam uma abordagem numérica/experimental complementar na investigação sobre o escoamento turbulento sobre um arranjo periódico de colinas em Números de Reynolds variados na faixa $100 \leq R_e \leq 10595$. Para isso, foram realizadas inúmeras simulações diferentes usando DNS e LES em malhas muito finas aplicando dois métodos numéricos independentes.

Diferentemente dos trabalhos anteriores, em *Numerical Method to Generate and Evaluate Environmental Wind Over Hills: Comparison of Pedestrian Winds Over Hills and Plains* (Jena, S; Gairola, A., 2022), os autores realizam um trabalho numérico com caráter

informativo sobre zonas de alta e baixa pressão no nível de pedestres sobre escoamentos em torno de zonas de não escoamento para tentar simular a interação do vento com prédios.

Bayron et al. (2024), no artigo *A wind tunnel study of adverse pressure gradient impact on wind turbine wake dynamics*, fazem uma análise experimental do gradiente de pressão em uma turbina de vento, fazendo utilização de um túnel eólico.

Po-Hua et al. (2012) em seu artigo *Simulations of laminar and turbulent flows over periodic hills with immersed boundary method* e Castagna et al. (2012) em *Direct numerical simulation of a turbulent flow over an axisymmetric hill* realizam simulações de CFD sobre colinas. Os trabalhos se diferenciam em relação ao objeto de estudo. Enquanto no primeiro artigo os autores realizam simulações sobre colinas periódicas, o foco de estudo do segundo artigo é o escoamento sobre uma colina assimétrica tridimensional.

Finalmente, Maia (2023), em sua dissertação de mestrado *Estimativa do potencial eólico a partir de experimento em túnel de vento utilizando placa plana de camada limite*, realiza testes de análise de perfis de velocidade em uma placa plana com um flap na tentativa de simular uma camada limite mais desenvolvida.

1.4 JUSTIFICATIVA

Com a permanente evolução do setor elétrico no Brasil, e a atual busca, não somente no Brasil, mas no mundo, por fontes de energia limpa, uma das fontes na qual tem ocorrido maior investimento são aquelas de energia eólica.

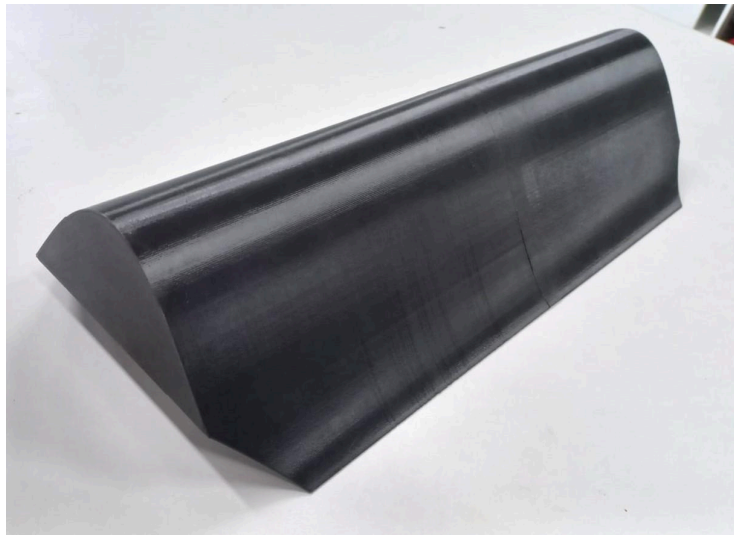
Dentro desse contexto, em 2015, a política ambiental da Furnas Centrais Elétricas S.A., que datava de 1998, passou por uma revisão e agora está alinhada com a Política Ambiental das Empresas Eletrobras. Assim, a empresa criou um setor de investimento, pesquisas e desenvolvimento com respeito à energia eólica, visando "estar entre as três maiores empresas globais de energia limpa e entre as dez maiores do mundo em energia elétrica" (ELETROBRAS FURNAS, 2024). Com isso em vista, tornou-se imprescindível que fossem realizados estudos tanto por Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) quanto experimentais para que, ao final, obtenha-se valores de melhor qualidade para a evolução da empresa nesse setor. Assim, o escopo do presente trabalho encontra-se justamente no desenvolvimento de uma metodologia experimental para fins de obtenção do potencial eólico de ventos sobre terrenos - especificamente, sobre colinas.

1.5 OBJETIVOS

No presente trabalho, tem-se como objetivos principais:

- traçar perfis de velocidade do escoamento do ar sobre a colina proposta (Figura 6);
- identificar pontos de maiores velocidades do ar e suas posições relativas à colina;
- calcular pontos de alto potencial eólico teórico para possíveis análises e instalações de turbinas eólicas em pontos estratégicos;
- visualizar de linhas de corrente para uma melhor compreensão do comportamento do vento quando sob influência de colinas.

Figura 6 - Colina proposta para estudo.



Fonte: Próprio Autor.

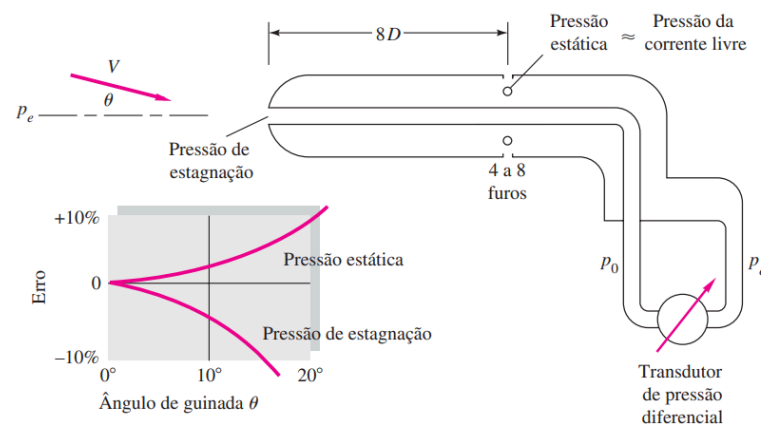
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Antes do procedimento experimental, deve-se referenciar os pontos principais que serão utilizados, além de apontar como os equipamentos se comportam quando sobre condições específicas (como será descrito nos tópicos 2.1 e 2.2), as equações que modelam comportamentos esperados durante o experimento (tópico 2.3) e as modelagens matemáticas de princípios que serão utilizados (tópico 2.4).

2.1 TUBO DE PITOT

Medidores de vazão por diferencial de pressão são os medidores de vazão que funcionam com base na relação de Bernoulli, sendo o Tubo de Pitot um exemplo desse tipo de medidor. Segundo Cole (1935) *apud* Aguirre (2013), o tubo de Pitot foi concebido em 1732 pelo engenheiro francês Henri Pitot (1695–1771) e, posteriormente, adaptado pelo também engenheiro francês Henry Philibert Gaspard Darcy (1803–1858) ao formato mais conhecido, ver Figura 7.

Figura 7 - Corpo delgado do Tubo de Pitot e a relação entre sua inclinação e erro de medição.



Fonte: White (2007).

Dentre seus principais usos, Aguirre (2013) destaca o uso do Tubo de Pitot como medidor de velocidade em aeronaves (Figura 8). As duas bandeirolas instaladas no meio do corpo do Pitot são utilizadas para medir dois ângulos da aeronave em voo.

Figura 8 - Tubo de Pitot como medidor de velocidade na asa de uma aeronave.



Fonte: Aguirre (2013)

A partir do funcionamento do Tubo de Pitot, tem-se um tubo delgado com orifícios laterais para medir a pressão estática do fluxo (P_e) e um orifício frontal para medir a pressão de estagnação do escoamento (P_0). Neste último ponto, a velocidade é desacelerada para ser 0,0 m/s (Figura 9).

Caso o Número de Reynolds (R_e) seja maior que 1000, pode-se desprezar a influência do atrito no escoamento, segundo White (2007). Assim, tem-se a equação que modela o princípio físico por trás do Tubo de Pitot é a equação de Bernoulli (Equação 2.1). A partir dela, tem-se uma relação entre a pressão e a velocidade do fluxo de um escoamento:

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = cte. \quad (2.1)$$

Onde P representa a pressão estática do escoamento, V representa a velocidade do escoamento, ρ representa a massa específica do fluido, g representa o valor da gravidade e z representa a posição vertical do escoamento.

Como o resultado da equação é sempre constante em um escoamento com um fluido com propriedades constantes, existe uma equivalência entre quaisquer dois pontos no escoamento. Pode-se ainda realizar algumas considerações para simplificar o equacionamento para a funcionalidade do Tubo de Pitot. Assim, sabe-se que a velocidade medida pelo orifício frontal (P_0) equivale a 0 m/s e que a diferença de energia resultante da variação de elevação $\rho g(z_e - z_0)$ é desprezível. Com isso, tem-se a fórmula de Pitot (Equação 2.2) (White, 2007):

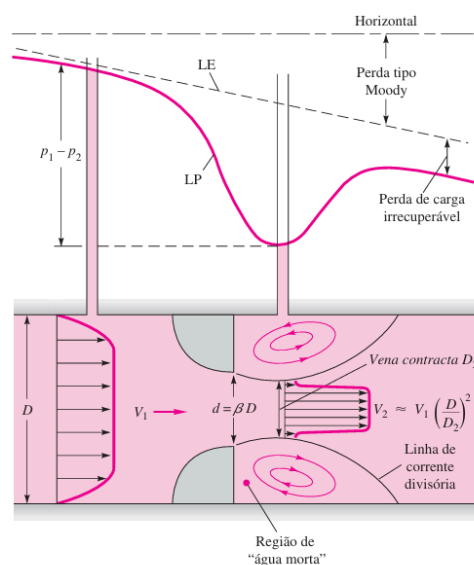
$$V \cong \left[2 \frac{(P_0 - P_e)}{\rho} \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

Com a Equação 2.2, pode-se calcular a velocidade de um escoamento a partir de um diferencial de pressão. Entretanto, deve-se destacar algumas desvantagens, como, por exemplo: a) o Tubo de Pitot deve estar alinhado diretamente com o escoamento para reduzir os erros de medição (Figura 9); b) em gases, velocidades muito baixa causam variações de pressão baixas demais para serem medidas precisamente; e c) devido à resposta lenta dos tubos cheios de fluido que o ligam aos transdutores, o Tubo de Pitot não é útil para medidas de escoamento não permanente (White, 2007).

2.2 MEDIDOR DE VAZÃO POR ÁREA DIFERENCIAL

Supondo um escoamento em um duto de diâmetro D que passa por uma obstrução de diâmetro d (Figura 9):

Figura 9 - Variação de velocidade e pressão através de um medidor de obstrução de Bernoulli generalizado.



Fonte: White (2007).

Após deixar a obstrução, o escoamento pode se estreitar ainda mais através de uma *vena contracta* de diâmetro $D_2 < d$, como mostra a Figura 9 (White, 2007). Aplicando-se as equações de Bernoulli (Equação 2.1) e da continuidade para escoamento incompressível permanente sem atrito (Equação 2.2), e realizando-se as devidas substituições, obtém-se a equação para a velocidade V_2 , ou seja, a velocidade considerada de corrente livre nesse experimento (Equação 2.4).

$$Q = \frac{\pi}{4}D^2V_1 = \frac{\pi}{4}D_2^2V_2 \quad (2.3)$$

$$V_2 \approx \left[\frac{2(\Delta P)}{\rho(1-D_2^4/D^4)} \right] \quad (2.4)$$

Onde Q representa a vazão como um produto da velocidade do escoamento pela seção do objeto por onde esse escoamento ocorre.

No entanto, embora seja utilizada a Equação 2.4 para se calcular a velocidade, é importante ressaltar que, como o atrito no duto foi desprezado, essa equação vai ser uma fonte de erros, e, portanto, qualquer medição feita utilizando essa equação deve ser corrigida.

2.3 DESCOLAMENTO DA CAMADA LIMITE

Para se obter as equações que modelam o comportamento do escoamento, considera-se o escoamento como sendo viscoso, incompressível¹ e bidimensional em x e y (Figura 10)². Assim, utilizando-se como base as relações de continuidade e de quantidade de movimento em x e y (Equação 2.5), tem-se as equações completas de movimento (White, 2007).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.5a)$$

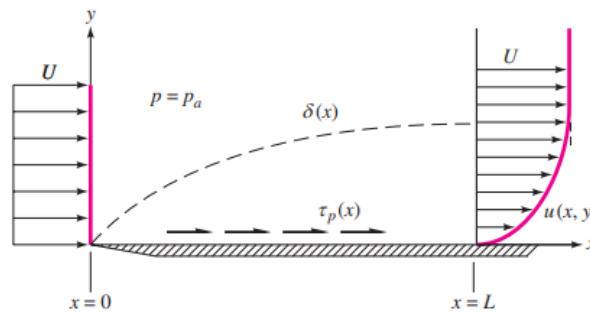
$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.5b)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2.5c)$$

¹ Para mach < 0,3, considera-se o escoamento incompressível (White, 2007).

² Para uma parede curva, x representa o comprimento de arco ao longo da parede e y é normal a x em todo lugar, com alterações desprezíveis nas equações de camada-limite, desde que o raio de curvatura da parede seja grande comparado à espessura da camada-limite.

Figura 10 - Crescimento de uma camada-limite sobre uma placa plana.



Fonte: White (2007).

Prandtl (1904) *apud* White (2007) resolveu as equações com condições típicas de entrada e saída e de não deslizamento na placa. Ele deduziu corretamente que a camada sob cisalhamento é muito fina quando o Número de Reynolds é considerado muito alto, de modo que as seguintes aproximações seriam válidas:

$$v \ll u \quad (2.6a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \ll \frac{\partial u}{\partial y} \text{ e } \frac{\partial v}{\partial x} \ll \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.6b)$$

Ou seja, a componente da velocidade u é muito maior que a componente de velocidade v e, ao mesmo tempo, as variações das componentes de velocidade ao longo do eixo y (Figura 10) também são muito maiores que as variações ao longo do eixo x .

Realizando-se as substituições, de (2.6) em (2.5), tem-se:

$$\frac{\partial P}{\partial y} \approx 0 \text{ ou } P = P(x) \quad (2.7)$$

Em outras palavras, a equação da quantidade de movimento de y pode ser desconsiderada inteiramente e a pressão varia apenas ao longo da camada-limite, não através dela. Admite-se que o termo do gradiente de pressão na Equação 2.5b já seja conhecido da equação de Bernoulli para escoamentos não viscosos externos.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{dP}{dx} = -\rho U \frac{dU}{dx} \quad (2.8)$$

Finalmente, tem-se que as três equações completas do movimento (Equação 2.5) ficam reduzidas às duas Equações de Camada-limite de Prandtl para escoamento incompressível bidimensional:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.9a)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \approx U \frac{dU}{dx} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (2.9b)$$

Onde $\tau = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)$ quando o escoamento for laminar e $\tau = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) - \overline{\rho u'v'}$ quando o escoamento for turbulento. Essas equações devem ser resolvidas para $u(x, y)$, considerando $U(x)$ uma função conhecida por meio da análise do escoamento não viscoso externo. Para isso, tem-se duas condições de contorno para u e uma para y :

- Quando $y = 0$, ou seja, representando uma condição de não escorregamento na parede;

$$u = v = 0 \quad (2.10a)$$

- Quando $y = \delta(x)$, ou seja, representando a borda superior da camada limite;

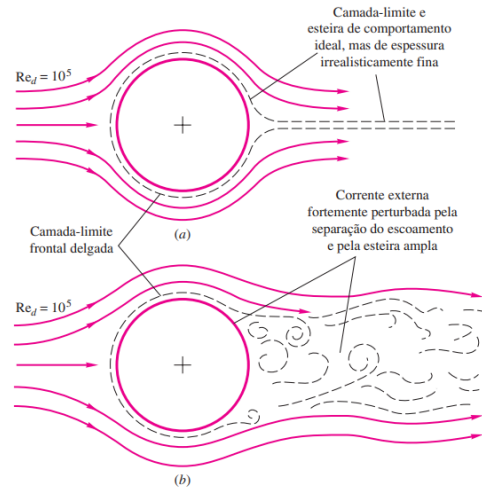
$$u = U(x) \quad (2.10b)$$

Há necessidade da componente extra de velocidade quando o escoamento é turbulento, o que se torna evidente quando há escoamentos sobre superfícies diferentes de placas planas. Para um corpo rombudo, mesmo a Números de Reynolds (Equação 2.11) muito altos, há uma discrepância no conceito da justaposição viscosa/não viscosa (White, 2007). Na Figura 11 são mostrados dois esboços de escoamento ao redor de um corpo rombudo bi ou tridimensional, na qual a primeira imagem é uma representação idealizada e a segunda é uma representação realista.

$$R_e = \frac{\rho \cdot V \cdot h}{\mu} = \frac{V \cdot h}{\nu} \quad (2.11)$$

Onde ρ é a massa específica, V é a velocidade média, h é o tamanho característico do objeto de estudo, especificamente, no presente trabalho, h é a altura da colina, μ é a viscosidade dinâmica e ν é a velocidade cinemática.

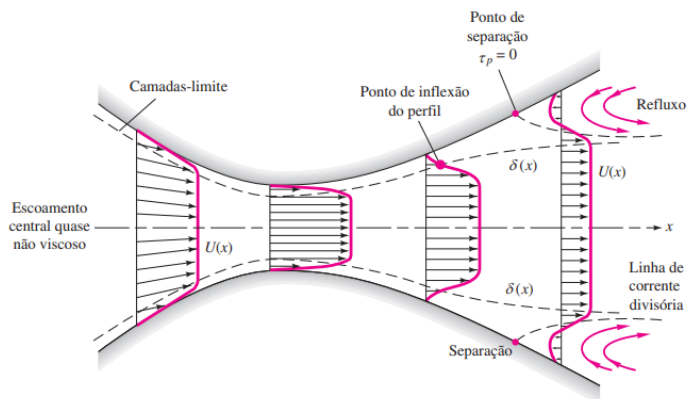
Figura 11 - Ilustração da interação forte entre as regiões viscosa e não viscosa na parte traseira do escoamento em torno de um corpo rombudo: (a) cenário idealizado e claramente falso do escoamento em torno do corpo rombudo; (b) cenário real do escoamento em torno de um corpo rombudo.



Fonte: White, 2007.

Para escoamento sobre colinas, espera-se um comportamento semelhante ao desenvolvimento da camada limite em uma configuração bocal-difusor (Figura 12), porém com a parede superior plana.

Figura 12 - Crescimento da camada-limite e separação em uma configuração bocal-difusor.

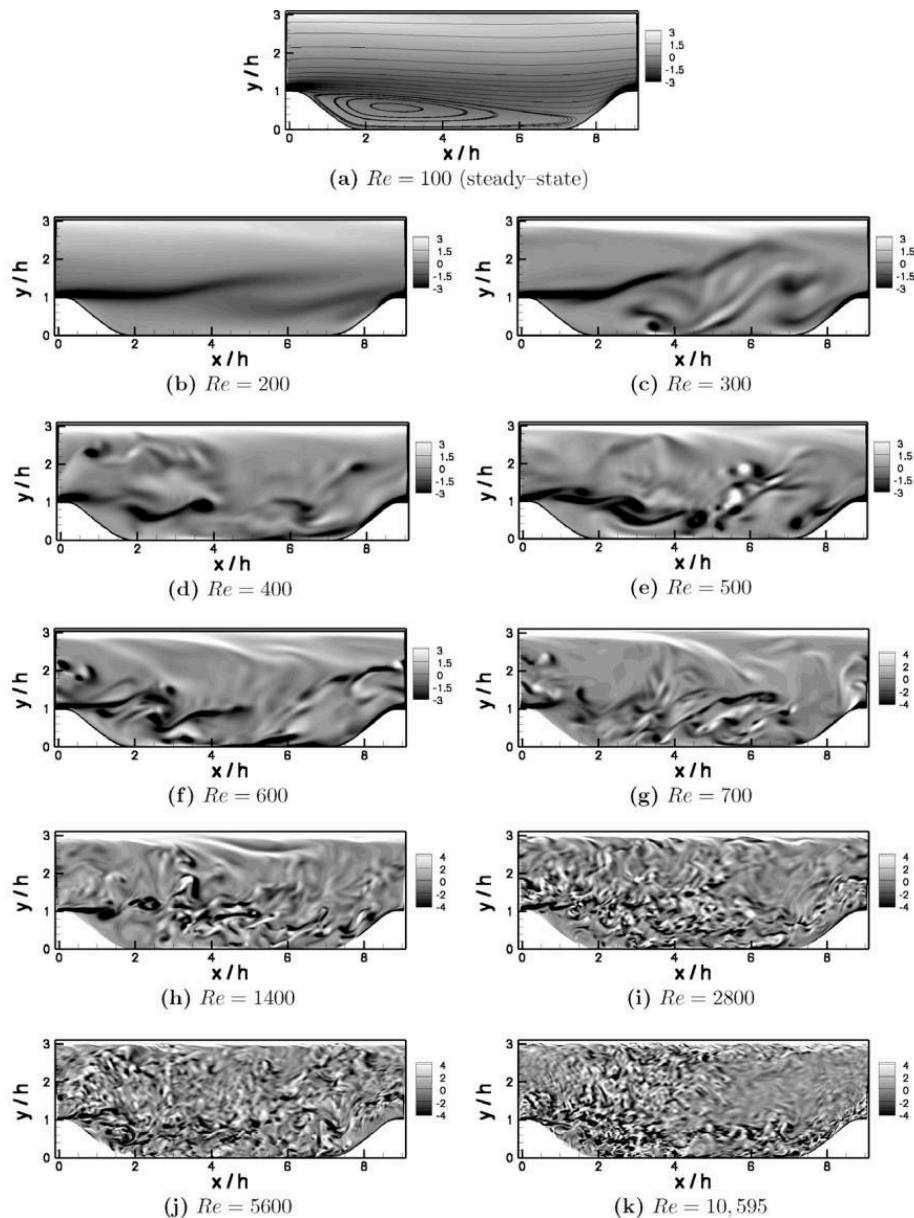


Fonte: White, 2007.

Do conjunto de imagens da Figura 13 (Breuer, 2008), pode-se ter uma noção do valor do Número de Reynolds a partir do qual se espera um escoamento turbulento. No conjunto, observa-se um escoamento permanente quando $Re = 100$, onde, mesmo possuindo uma

recirculação, ele não se desprende. A partir de $Re = 200$, o autor já considera o escoamento como sendo turbulento.

Figura 13 - Comparação do componente de vorticidade (instantâneo) xz normal à seção transversal em 11 Números de Reynolds diferentes ($Re = 100$ a 10.595) em um valor escolhido arbitrariamente instantâneo no tempo(...); (Traduzido).



Fonte: Breuer et al., 2008.

Os autores Po-Hua et al. (2012) consideram escoamentos com $25 \leq Re \leq 100$ sobre colinas como sendo laminar, enquanto escoamentos com valores de $Re > 2800$ seriam

turbulentos. Por sua vez, os autores Castagna et al. (2012) consideram valores de $R_e > 6500$ como sendo turbulentos.

2.4 Potencial Eólico

A partir da equação de energia cinética para qualquer objeto, tem-se:

$$E_c = m \frac{V^2}{2} \quad (2.12)$$

Onde m é massa, V é a velocidade do objeto.

A massa m para o escoamento de ar sobre uma turbina eólica pode ser reescrita como:

$$m = \rho \cdot Vol \quad (2.13)$$

Onde ρ é a massa específica do ar e Vol é o volume de ar que passa sobre a turbina eólica.

O volume, Vol , pode ser reescrito como:

$$Vol = A \cdot \Delta S \quad (2.14)$$

Onde A é a área de passagem do escoamento pela turbina (Figura 14) e ΔS é o comprimento associado ao volume de ar que passa pela turbina.

Figura 14 - Área de passagem do escoamento por uma turbina eólica de área circular³.



Fonte: Valor Econômico - Globo (2024).

ΔS ainda pode ser escrito em função de um incremento de tempo e da velocidade do escoamento:

$$\Delta S = V \cdot \Delta t \quad (2.15)$$

Então, realizando-se uma série de substituições utilizando as equações apresentadas (Equação 2.12 até Equação 2.15), obtém-se a equação da energia cinética disponível do vento:

$$E_{c,vento} = (\rho \cdot A \cdot V \cdot \Delta t) \cdot \frac{V^2}{2} \quad (2.16)$$

Reescreve-se a Equação 2.16, em função da potência disponível do vento:

$$Pot_{vento} = \frac{E_{c,vento}}{\Delta t} = \frac{\rho \cdot A \cdot V^3}{2} \quad (2.17)$$

Por fim, reescreve-se a equação da potência disponível no vento em relação à área de uma turbina eólica qualquer. Essa variável é denominada Potencial Eólico:

$$Pot_{eol} = \frac{Pot_{vento}}{A} = \frac{\rho V^3}{2} \quad (2.18)$$

³ Turbinas eólicas com diferentes geometrias apresentam diferentes área de passagem do escoamento.

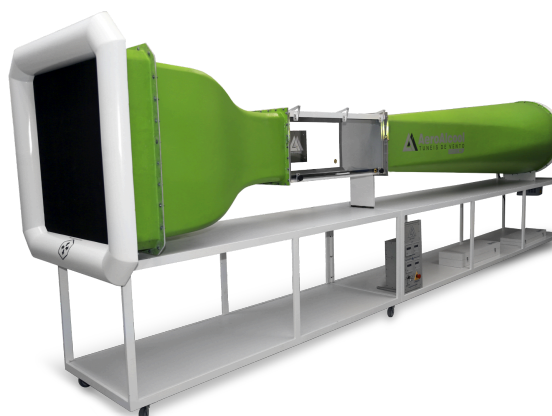
3 METODOLOGIA

3.1 DESCRIÇÃO E INTERAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

3.1.1 TÚNEL DE VENTO (TV)

Nesse experimento, utiliza-se um Túnel de Vento aberto do tipo exaustor, modelo AA-TVSH1 (H1C): TÚNEL DE VENTO SUBSÔNICO (Figura 15), que está localizado na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação no Campus Samambaia da Universidade Federal de Goiás - UFG. O equipamento foi adquirido pela empresa Eletrobras/FURNAS e emprestado à UFG com o intuito de incentivar pesquisas na área. Ele foi acoplado com um medidor de vazão tipo Área Diferencial (Figura 16) para realizar as medições.

Figura 15 - Túnel de Vento aberto do tipo exaustor com pressão negativa.



Fonte: AEROALCOOL.

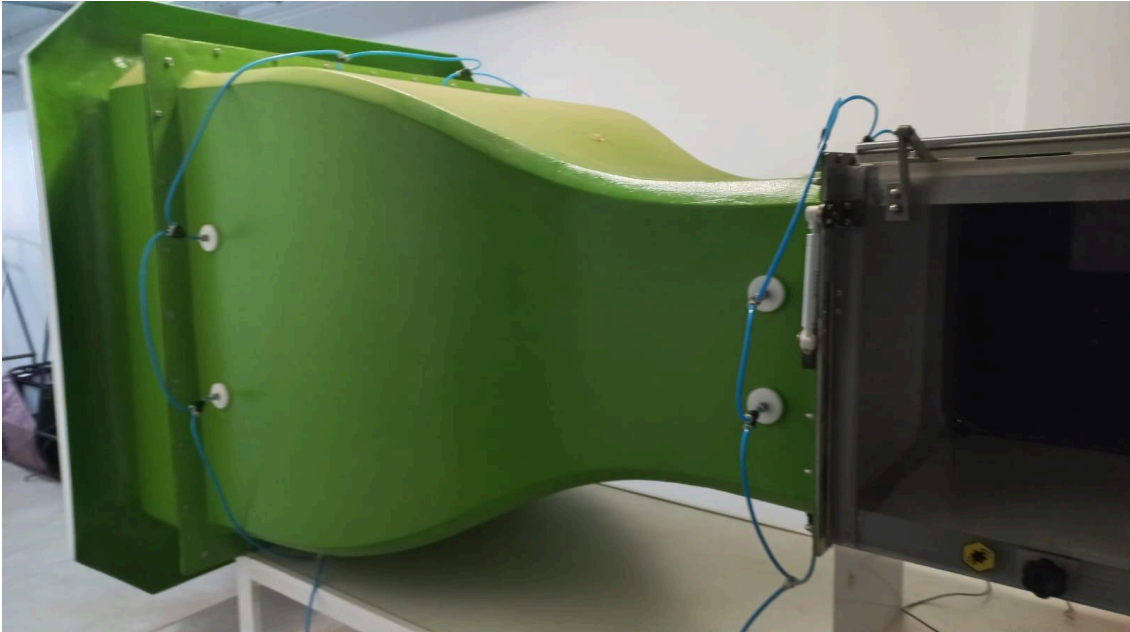
As características do túnel de vento citado podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características do túnel de vento utilizado no experimento.

Características	TV
Tipo de TV	Túnel de Vento Subsônico
Circuito	Aberto
Dimensões de plataforma	1,30 m x 1,98 m x 6,2 m (Largura, Altura e comprimento)
Dimensões Câmara de ensaios	0,462 m x 0,462 m x 1,20 m
Velocidade do ar	0 a 40 m/s
Seção de Entrada	1,0 m x 1,0 m
Pressão	Negativa

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando Google Planilhas.

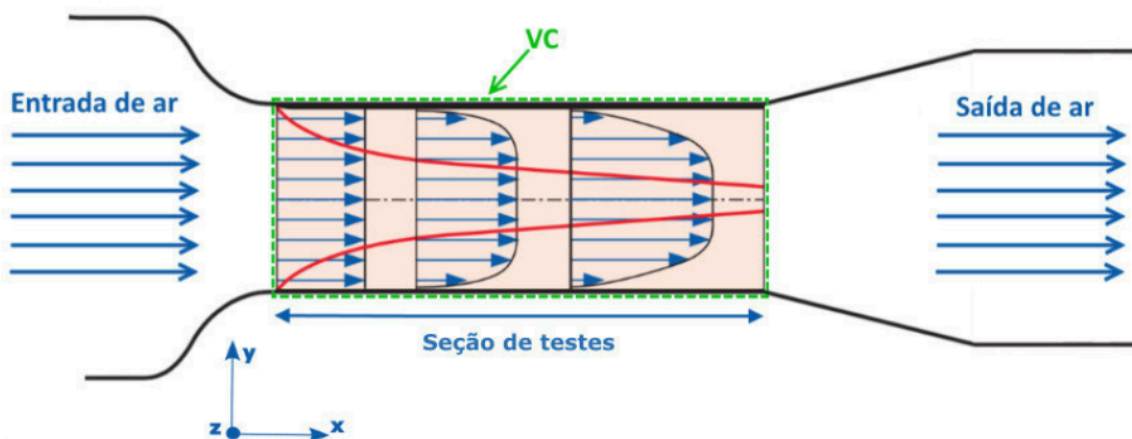
Figura 16 - Medidor de vazão tipo Área Diferencial.



Fonte: Próprio Autor.

A região de estudo se limita à área de seção de testes do túnel de vento. Assim, define-se o Volume de Controle como o volume entre o início e o final da seção de testes, bem como suas paredes (Figura 17).

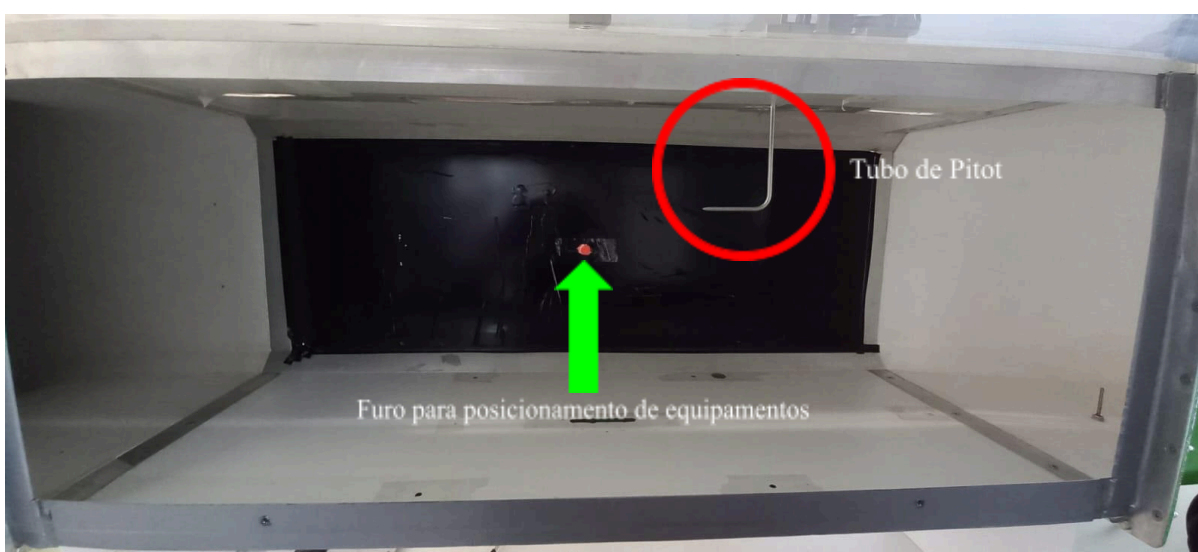
Figura 17 - Volume de Controle do TV para o experimento.



Fonte: Cardoso (2020)

A seção de teste (Figura 18) ainda possui uma das faces feitas de acrílico transparente removível para facilitar a montagem e visualização do experimento, porém, quando fechada fica devidamente vedada para minimizar qualquer influência no experimento. Ainda foram removidas porções das superfícies da seção de teste para o posicionamento do Tubo de Pitot e outros equipamentos nos pontos desejados, os quais, quando não estão em uso, são devidamente vedados com o intuito de evitar-se entradas de ar na seção de testes, um dos quais, está apontado na Figura 18.

Figura 18 - Seção de Testes.



Fonte: Próprio Autor.

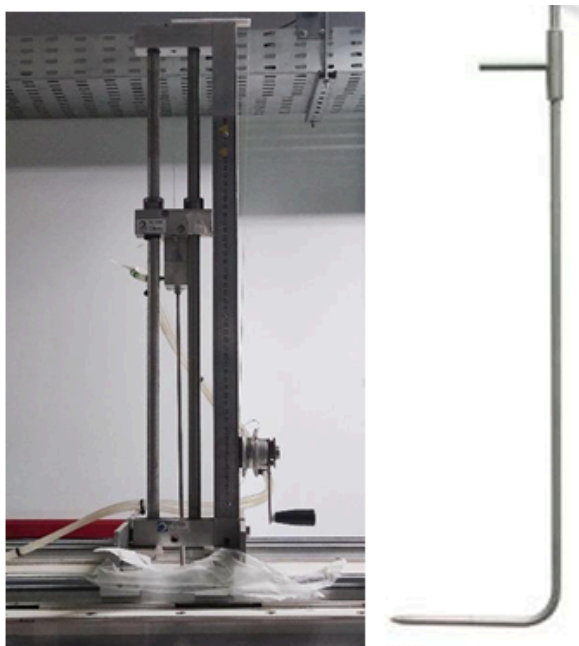
3.1.2 TUBO DE PITOT

Utiliza-se também um Tubo de Pitot calibrado para coletar as pressões estáticas (P_e) e pressões de estagnação (P_0). As pressões coletadas pelo Tubo de Pitot são consideradas corretas e são utilizadas para calibrar o medidor de vazão tipo Área Diferencial acoplado no Túnel de Vento.

Seu deslocamento horizontal é possível graças a duas guias às quais se fixa o suporte do Tubo de Pitot, concedendo à estrutura somente um grau de liberdade, ou seja, um deslocamento somente horizontal (Figura 19). Já para seu deslocamento vertical, utiliza-se um sistema de polia com guias para ajustar a altura do Tubo de Pitot na seção de testes.

A estrutura para o Tubo de Pitot ainda vem provida de uma escala graduada com resolução de 1 milímetro para facilitar o posicionamento do ponto de medição da seção de testes.

Figura 19 - Estrutura para o Tubo de Pitot e Tubo de Pitot utilizado no experimento.



Fonte: Maia (2023).

3.1.3 MANÔMETRO

A partir das pressões estática e de estagnação de ambos os aparelhos de medição, utiliza-se tubos flexíveis para transferir essas pressões para um manômetro (Figura 20), o qual detecta a diferença entre as pressões coletadas por cada equipamento.

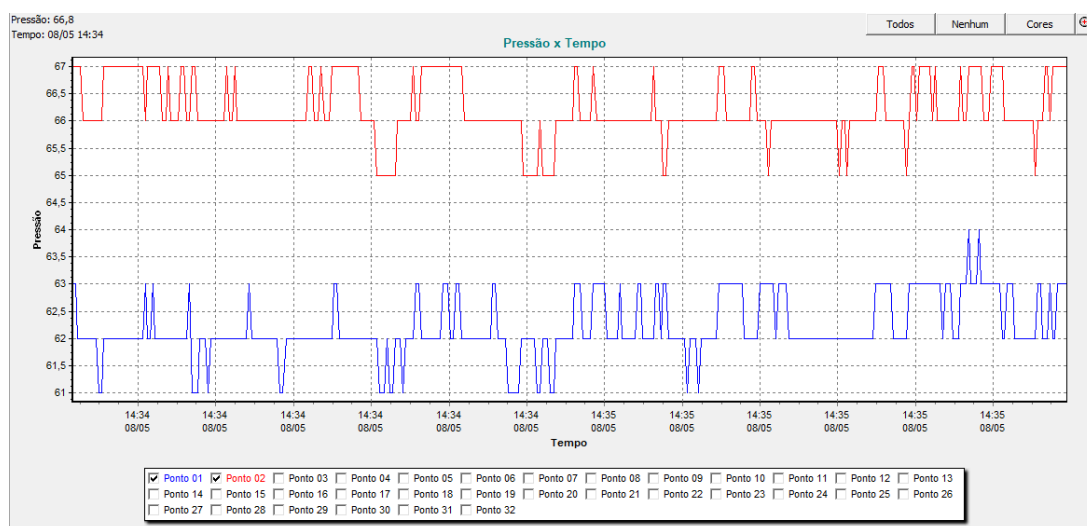
Figura 20 - Manômetro AeroAlcool, Módulo de Pressão 32x AA-TVCR3.



Fonte: Próprio Autor.

Os dados coletados pelo Manômetro são interpretados pelo *Software* AeroAlcool (FURNAS, ANEEL, Finep) e os valores do diferencial de pressão são gravados pelo programa (Figura 21). Na Figura a seguir, pode-se ver um gráfico exemplar da interpretação dos dados pelo *Software* AeroAlcool com o ponto 01 representando o diferencial de pressão medido pelo medidor de vazão por diferencial de área e o ponto 02 representando o diferencial de pressão medido pelo Tubo de Pitot.

Figura 21 - Exemplo de gráfico criado pelo *Software* AeroAlcool.



Fonte: Próprio Autor utilizando *Software* AeroAlcool.

3.1.4 PRESSÃO ATMOSFÉRICA, TEMPERATURA E UNIDADE

Os valores da pressão atmosférica foram coletados a partir do *Software* “Barometer” da empresa Examobile, o qual coleta os dados de pressão da estação meteorológica mais próxima, localizada a aproximadamente 5 km de distância do local de teste (Aeroporto Internacional de Goiânia - Santa Genoveva).

Para coletar tanto os valores de umidade quanto os valores de temperatura locais, utiliza-se o Anemômetro digital ITAN 700 (Figura 22).

Figura 22 - Anemômetro Digital ITAN 700 INSTRUTEMP.



Fonte: Próprio Autor.

3.1.5 MÁQUINA DE FUMAÇA E CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE

Para o último processo experimental realizado, utiliza-se uma máquina de fumaça F-950 TECPORT com fumaça à base de glicerina (Figura 23), uma câmera de alta velocidade Chronus 1.4 (Figura 24) para obter imagens de como se comportam as linhas de corrente sobre a colina e uma máquina de laser multidirecional (Figura 25) para facilitar a captação de imagem por parte da câmera de alta velocidade.

Figura 23 - Máquina de Fumaça Tec PORT F-950.



Fonte: SEEKPNG.

Figura 24 - Câmera de alta velocidade Chronus 1.4



Fonte: CHRONOS HIGH-SPEED CAMERA USER MANUAL.

Figura 25 - Fonte Digital PLX para Diodos Laser.



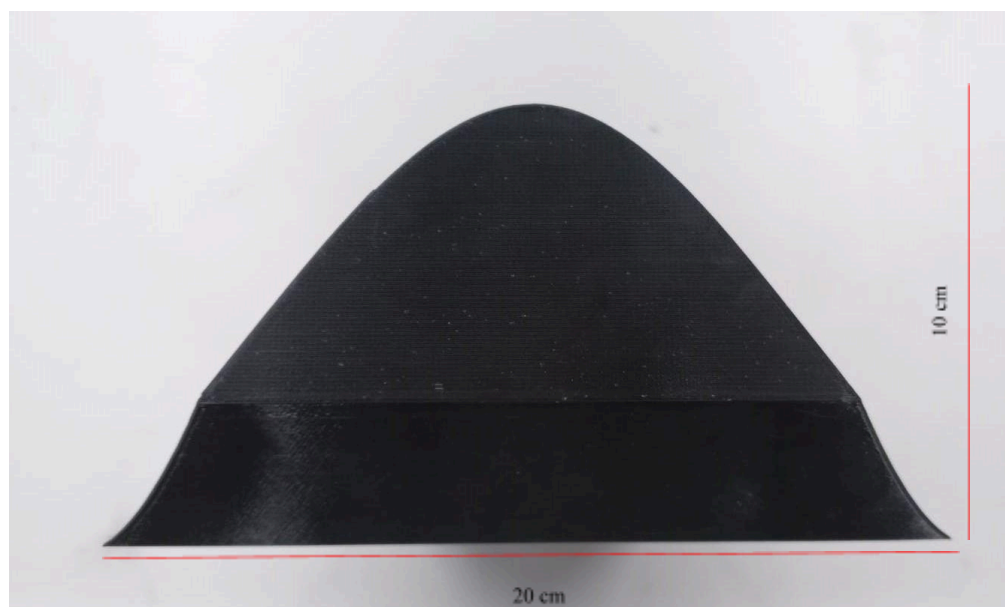
Fonte: LASER LINE.

3.1.6 COLINA

A colina objeto de estudo foi impressa por uma impressora 3D no formato gaussiano com 200 mm de base e 100 mm de altura (Figura 26), inspirado pelo procedimento realizado por Breuer et al. (2008). O chanfro presente na colina (Figura 27) existe como adequação geométrica à seção de teste do túnel de vento e não permite passagem de ar.

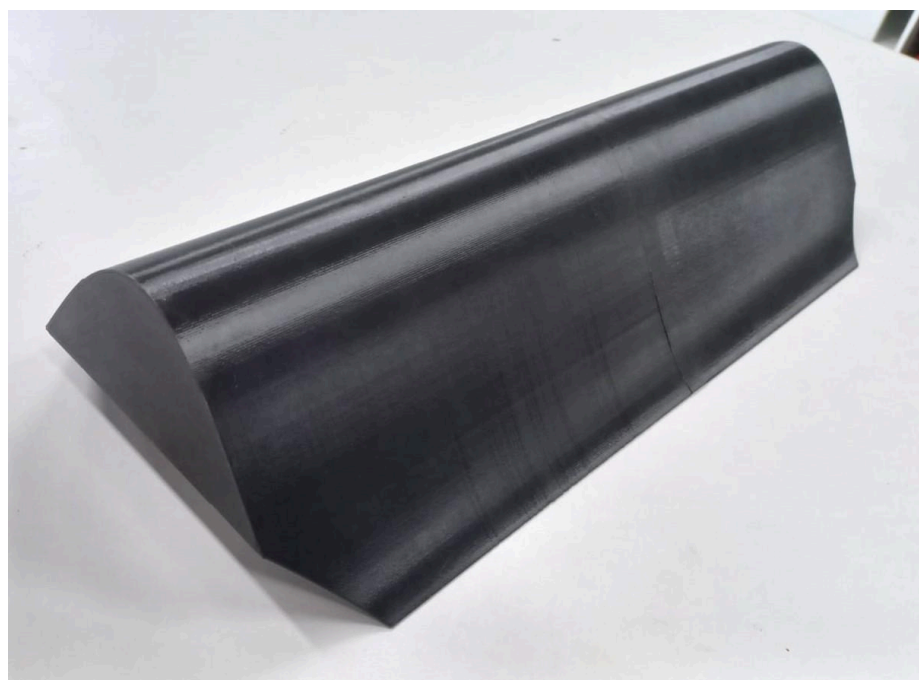
O posicionamento da colina na seção de testes ocorreu da seguinte forma: posicionou-se a colina na seção de teste do túnel de vento com seu início a 500 mm da entrada da seção de teste. Ela foi fixada utilizando fita dupla face na superfície inferior da seção de testes e, a fim de suavizar as inclinações da colina nas suas bordas de ataque e fuga e evitar que ocorra a entrada de ar por baixo da colina, incluíram-se pedaços de fita em toda a extensão da borda da colina em contato com a superfície inferior da área de teste.

Figura 26 - Seção da colina.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 27 - Colina de teste.



Fonte: Próprio Autor.

3.1.5 MATERIAIS

De forma resumida, utilizam-se os seguintes equipamentos e *softwares*:

- Túnel de Vento (Eletrobras/FURNAS, ANEEL, Finep)
- Medidor de Diferencial de Pressão acoplado ao Túnel de Vento
- Tubo de Pitot AeroAlcool (Eletrobras/FURNAS, ANEEL, Finep)
- Manômetro AeroAlcool, Módulo de Pressão 32x AA-TVCR3
- Barômetro examobile barometer
- Higrômetro Digital INSTRUTEMP Digital Anemometer ITAN 700
- Termômetro Digital INSTRUTEMP Digital Anemometer ITAN 700
- *Software* HVAC engineering calculator
- *Software* AeroAlcool (Eletrobras/FURNAS, ANEEL, Finep)
- Câmera de alta velocidade Chronus 1.4
- Fonte Digital PLX para Diodos Laser LASER LINE
- Módulo LASER iZi Modelo Luz verde 532 nm
- Máquina de Fumaça Tec PORT F-950
- Colina impressa 3D (200 mm de base, 100 mm de altura, forma gaussiana)

3.2 MÉTODO

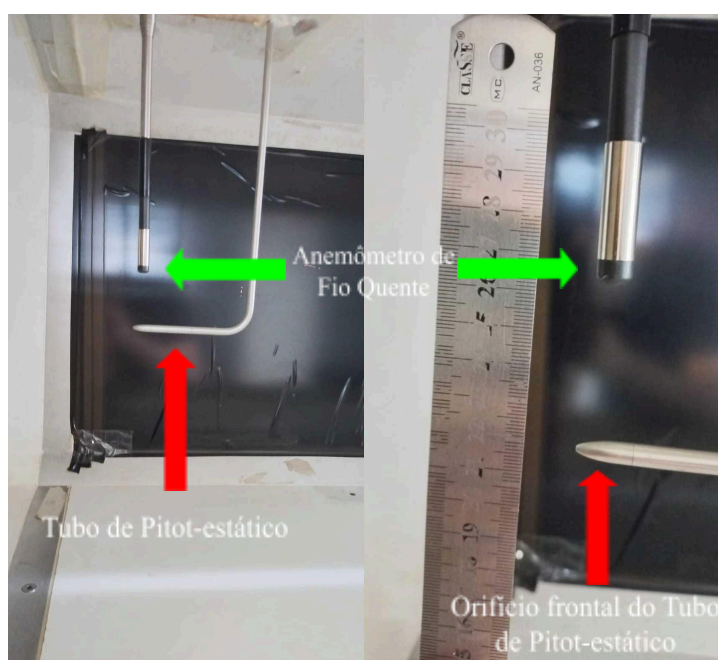
3.2.1 DETERMINAÇÃO DO PERÍODO DE MEDIÇÃO

Antes que qualquer medição seja realizada, é necessário determinar o período das medições. Com o intuito de reduzir os desvios padrão das medições, realizou-se uma sessão de coleta de dados por um longo período (aproximadamente 100 segundos). Coletados os dados, calcula-se o desvio padrão da média dos valores e cria-se um gráfico relacionando o desvio padrão de medição com o tempo de medição. Assim, pode-se ter uma noção de quanto tempo é necessário para se obter uma medição em que o desvio padrão se estabiliza.

3.2.2 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO

Primeiramente, utiliza-se o Tubo de Pitot para calibrar o medidor de vazão por área diferencial presente no túnel de vento. Para isso, posiciona-se a ponta de medição do Tubo de Pitot na entrada da seção de teste do túnel de vento, denominada Posição de Calibração. Essa posição é definida a 22 cm de altura na parte central da seção de teste, visando reduzir a influência das paredes no escoamento medido (Figura 28).

Figura 28 - Posição do Tubo de Pitot durante a construção da curva de calibração.⁴



Fonte: Próprio Autor.

⁴ O anemômetro de fio quente foi removido da seção de teste antes das medições e não foi responsável pela coleta de nenhum dado.

Para realizar a curva de calibração necessária, efetua-se 5 medições do diferencial de pressão utilizando simultaneamente o Tubo de Pitot e o medidor de vazão por área diferencial, para 5 velocidades de rotação do motor do túnel de vento. As velocidades de rotação selecionadas foram de 300, 600, 900, 1200 e 1500 RPMs.

Determinadas as velocidades de rotação do motor, a ordem de medição foi realizada de forma aleatória, a fim de evitar que erros sistemáticos alterem significativamente os valores obtidos. Para cada medição, o tempo foi de pelo menos 30 segundos, com os primeiros 30 segundos destinados a permitir que o escoamento entre em regime permanente, seguido pela coleta de dados por um período adicional. Vale mencionar que esses tempos não são exatos e podem oscilar para mais ou para menos.

Durante os períodos de coleta de dados, foram anotados ainda os valores médios de umidade relativa do ar, da pressão atmosférica e da temperatura local. Utiliza-se como valor final a média dos valores obtidos durante cada período de medição.

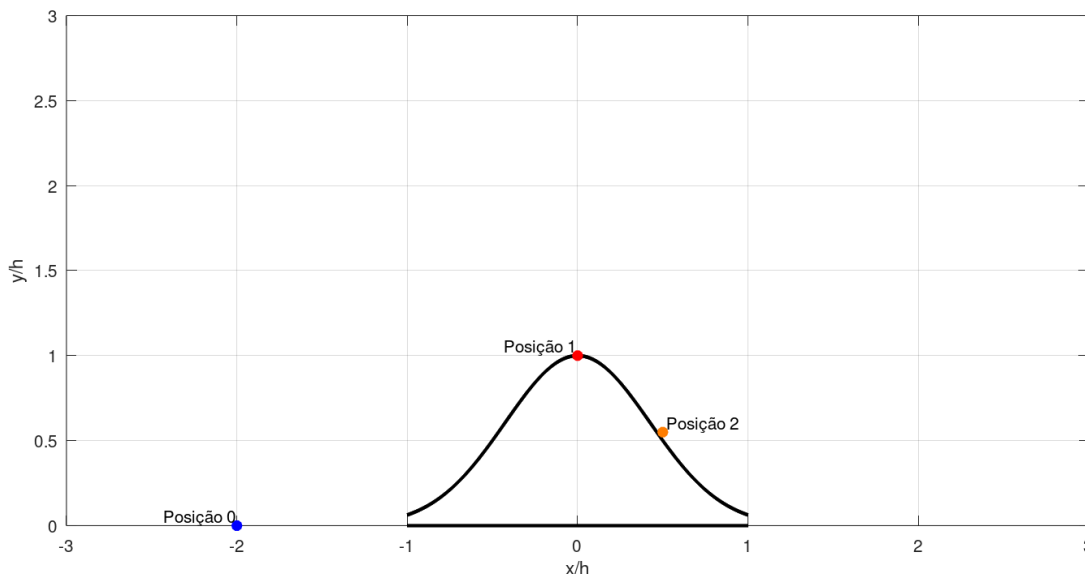
3.2.3 MEDIÇÕES NAS POSIÇÕES DE MEDIÇÃO SELECIONADAS

Após todas as medições para a curva de calibração, foram realizadas as medições para o experimento de vazão sobre o objeto de estudo propriamente dito, ou seja, a colina.

Em cada posição de medição, foram selecionados 20 pontos de medição, sendo 10 pontos nos primeiros 10 mm (variando de 1 mm em 1 mm) e os outros 10 pontos variando uniformemente entre 10 mm acima do primeiro ponto de medição da posição de medição e aproximadamente 3 vezes a altura da colina. A velocidade do ar (U_{∞}) que chega na colina foi medida utilizando-se o medidor por área diferencial e cada ponto de medição foi medido com o Tubo de Pitot. Após essas medições ainda foram selecionados mais pontos em áreas que possuem altas variações do perfil de velocidade entre pontos medidos a fim de ter uma visão melhor do perfil de velocidade, caso fosse necessário suavizar a curva do perfil de velocidade.

Embora a princípio existissem planos para a medição em 8 regiões distintas da colina, devido a limitações de tempo, essas medições foram realizadas em somente 3 regiões, as quais são chamadas de “Posições de Medição”: 100 mm a montante da colina (Posição de Medição 0); diretamente acima do pico da colina (Posição de Medição 1); e a 150 mm a jusante do começo da colina (Posição de Medição 2). Na Figura 29 pode-se visualizar uma representação gráfica das posições de medição em relação à colina utilizada, com os eixos de referências representados como uma razão pela altura “h” da colina.

Figura 29 - Posicionamento da colina na seção de testes com indicação dos pontos de medição.



Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o software GNU Octave.

A priori, desejava-se realizar medições para as 5 RPMs distintas mencionadas anteriormente. Entretanto, como isso não foi possível, as medições sobre as posições de medição selecionadas foram realizadas com velocidade de rotação do motor do túnel de vento a 900 RPM, uma vez que essa era a velocidade média das velocidades de rotação propostas. Ademais, diferentemente das medições realizadas durante a calibração dos equipamentos, essas medições foram realizadas somente 1 vez por ponto por posição.

Novamente, assim como foi realizado durante a coleta dos dados para a construção da curva de calibração, a seleção de quais pontos medir foi feita de forma aleatória. Além disso, durante o período de coleta de dados, também foram coletados os valores de pressão atmosférica, umidade relativa do ar e temperatura local para cada ponto de cada região de medição.

3.2.4 TRABALHANDO DADOS PARA OBTER-SE O PERFIL DE POTENCIAL EÓLICO

Dos valores obtidos para a temperatura, utiliza-se a Tabela A.2 de White (2007) para encontrar uma faixa de viscosidade do ar durante as medições. Com esses valores, calcula-se uma faixa para os Números de Reynolds durante o experimento utilizando Equação 2.11.

Finalizadas as medições, obtem-se as médias das diferenças de pressão (Equação 3.1) medidas juntamente com a sua incerteza (Equação 3.2) do Tipo A.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.1)$$

$$\sigma_{m\acute{e}dia} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} * \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (3.2)$$

Feito isso, utiliza-se também a pressão atmosférica, a umidade relativa e a temperatura local para se determinar a massa específica do ar úmido utilizando-se o *Software HVAC engineering calculator*. Com esses valores, utiliza-se a Equação 2.4 para se obter as velocidades do ar medidas pelo medidor por Área Diferencial e a Equação 2.2 para obter-se as velocidades do ar medidas pelo Tubo de Pitot. Deve-se utilizar também a Equação 3.3 para determinar as incertezas das velocidades calculadas por meio da propagação de incertezas.

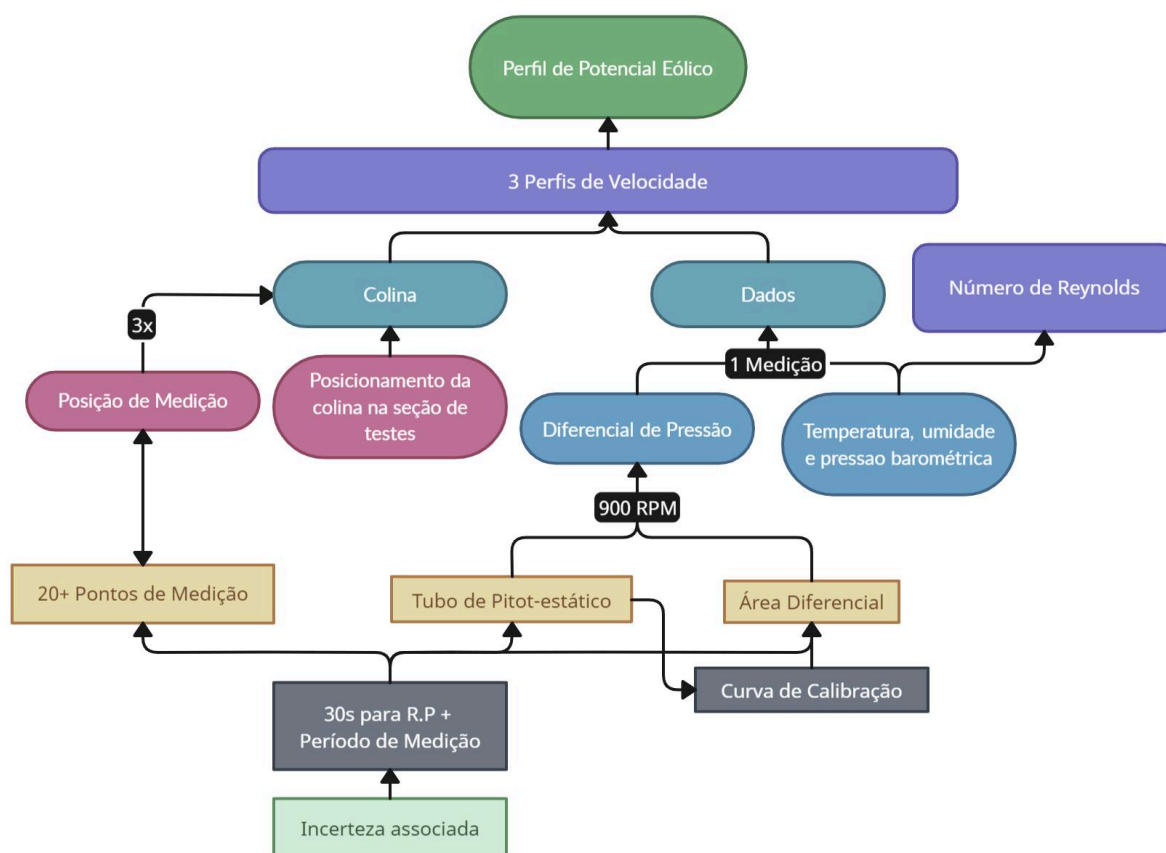
$$\sigma_F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1} \sigma_1\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} \sigma_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n} \sigma_n\right)^2} \quad (3.3)$$

Onde $F = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Disso, traça-se os perfis de velocidade do escoamento nas 3 regiões de medição selecionadas (perfis de verticais de velocidade, nas posições indicadas na Figura 29) e, em seguida, utiliza-se a Equação 2.18 para obter os perfis de potencial eólico.

Para uma melhor visualização do procedimento experimental, criou-se o fluxograma visto na Figura 30.

Figura 30 - Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: Próprio Autor.

3.2.5 REPRESENTAÇÃO VISUAL POR FUMAÇA

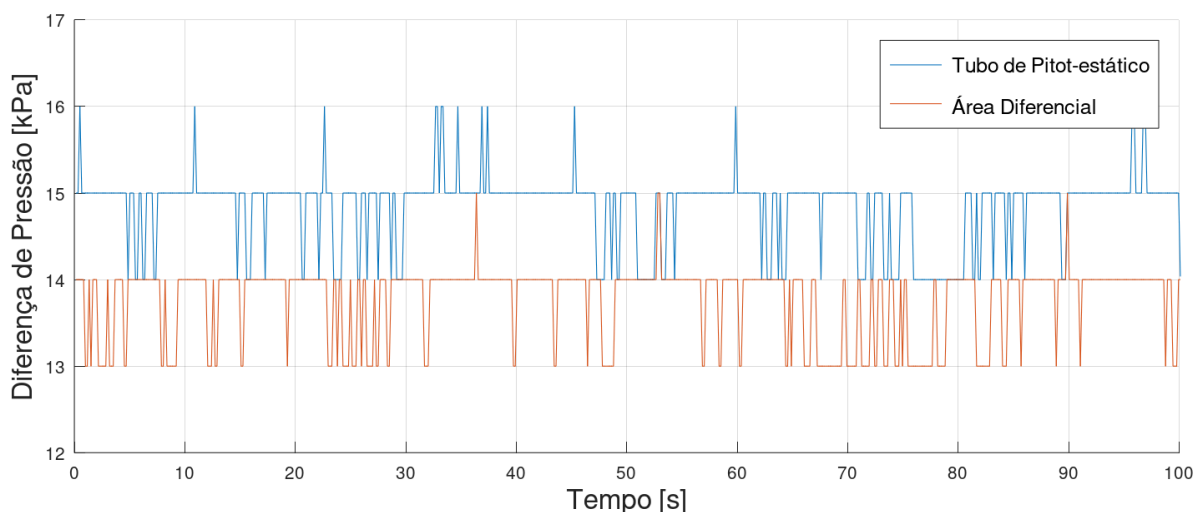
Posiciona-se uma máquina de fumaça Tec PORT F-950 à base de glicerina na entrada do túnel de vento. Para reduzir a dispersão da fumaça, utiliza-se uma velocidade de rotação do motor de 507 RPM. A máquina é posicionada na parte frontal do Túnel de Vento, em proximidade com a colmeia da entrada de ar, de forma que a fumaça se concentre na parte inferior da seção de testes. Utiliza-se uma câmera de alta velocidade Chronus para capturar os tubos de corrente descritos pela fumaça. Esse procedimento requer uma fonte de luz consideravelmente alta, portanto, utiliza-se também uma Fonte Digital PLX para Diodos Laser em união com um módulo LASER iZi modelo luz verde 532 nm para facilitar a iluminação e possibilitar a captura dos tubos de corrente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PERÍODO DE COLETA DE DADOS

Primeiramente, deve-se determinar a quantidade de tempo para obter o regime estatisticamente permanente, ou seja, para se ter a média e o desvio padrão os mais constantes possíveis ao longo do tempo. Para isso, realizou-se uma medição inicial de aproximadamente 100 segundos na posição de calibração supramencionada tanto para o Tubo de Pitot quanto para o medidor de área diferencial, obtendo-se os valores com os quais constrói-se o Gráfico 1.

Gráfico 1 - Representação visual da relação entre o diferencial de pressão medido e o tempo de medição para 300 RPM.



Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o *software* GNU Octave.

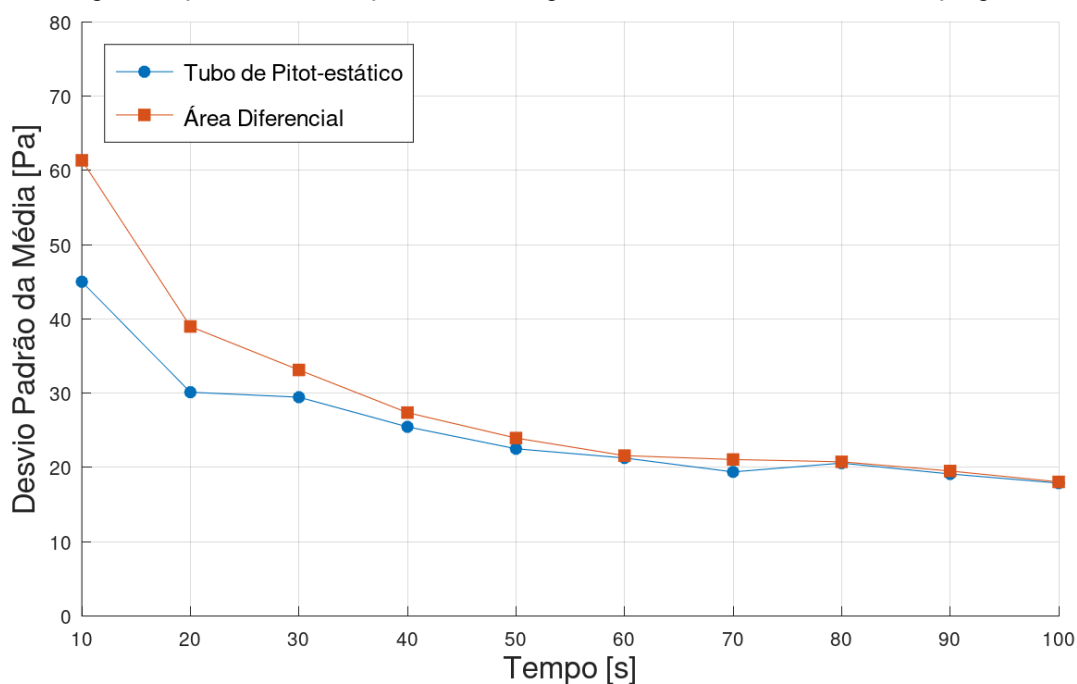
Desses valores, calcula-se o desvio padrão da média (Equação 4.2) para os primeiros 10 segundos de medição. Repete-se esses cálculos também para os primeiros 20 segundos, 30 segundos e assim sucessivamente até que se realize esse procedimento para os primeiros 100 segundos de medição desse mesmo sinal. Com isso, constrói-se a Tabela 3 e o Gráfico 2.

Tabela 3 - Relação entre desvio padrão da média do diferencial de pressão e intervalo de medição.

Intervalo de Tempo (s)	Desv. Pad. M. Área Diferencial [Pa]	Desv. Pad. M. Tubo de Pitot [Pa]
10	61,34	38,60
20	38,97	30,12
30	33,12	29,45
40	27,37	25,46
50	23,95	22,51
60	21,59	21,27
70	21,06	19,40
80	20,76	20,58
90	19,52	19,12
100	18,05	17,89

Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando Google Planilhas.

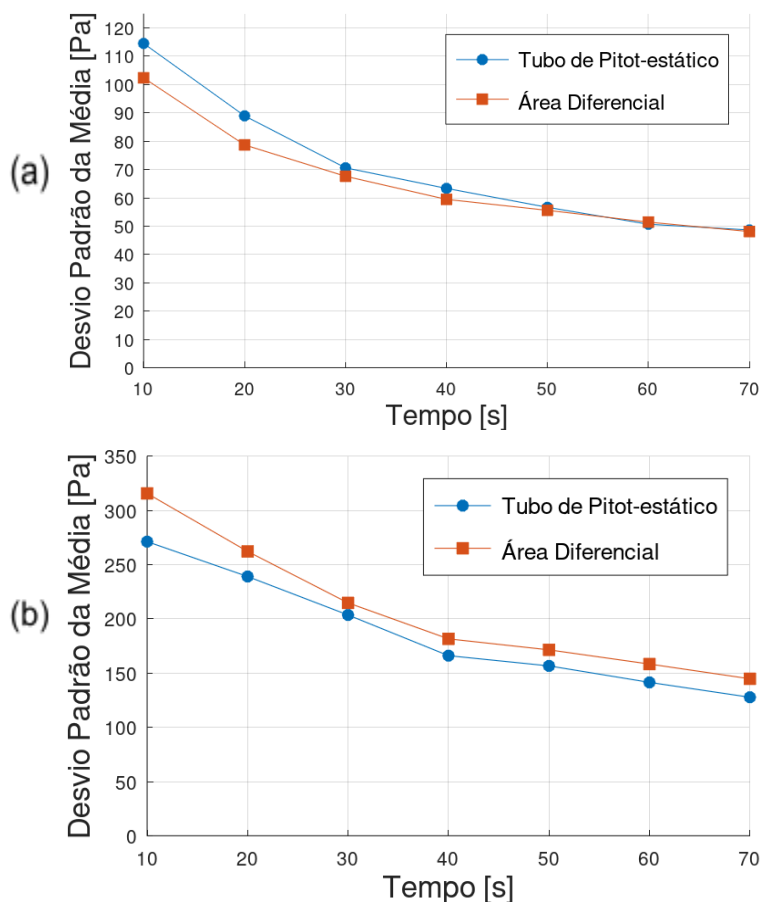
Gráfico 2 - Representação visual da relação entre desvio padrão da média e intervalo de medição para 300 RPM.



Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o *software* GNU Octave.

Repete-se ainda esse mesmo procedimento para as outras velocidades citadas na seção 3.2.2, como exemplificado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Exemplificação dos gráficos de desvio padrão da média em relação ao tempo para intervalo de medição de (a) 900 RPM e (b) 1500 RPM.



Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o *software* GNU Octave.

Dos Gráficos 2 e 3, afere-se que a partir de intervalos de tempo maiores do que 60 segundos, o desvio padrão variou pouco em comparação com intervalos de tempo menores do que 60 segundos. Assim, opta-se por utilizar 60 segundos como o tempo para todo e qualquer período de medição nos experimentos que serão apresentados na sequência.

4.2 CALIBRAÇÃO

Com o intervalo de medição determinado, pode-se começar os experimentos de medição propriamente ditos. Primeiramente, coloca-se o Tubo de Pitot na Posição de Calibração a fim de construir a curva de calibração. Disso, obtém-se a Tabela 4.

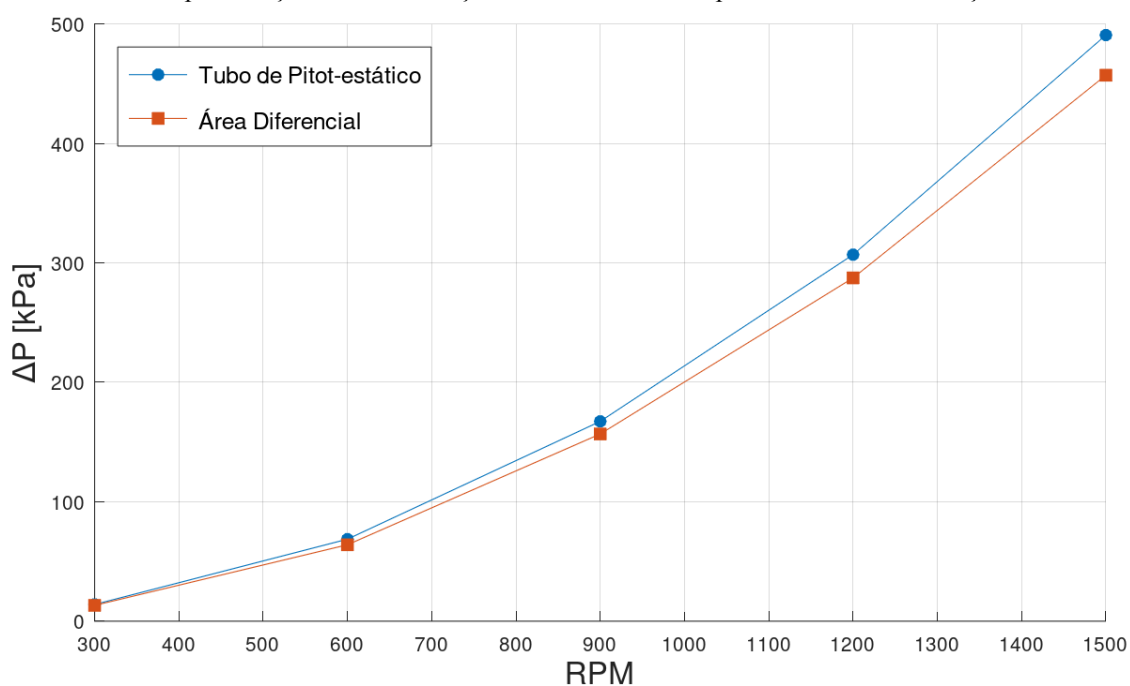
Tabela 4 - Diferencial de pressão medidos pelo medidor de área diferencial e pelo Tubo de Pitot estático, juntamente com suas respectivas incertezas.

RPM	Área Diferencial		Tubo de Pitot	
	ΔP (kPa)	$\sigma \Delta P$ (\pm kPa)	ΔP (kPa)	$\sigma \Delta P$ (\pm kPa)
300	13,24	0,31	14,00	0,41
600	63,98	0,49	68,68	0,29
900	156,75	0,62	167,30	0,55
1200	287,40	0,91	306,85	0,84
1500	457,1	1,7	490,7	1,7

Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando Google Planilhas.

Desse diferencial de pressão, constrói-se o Gráfico 4, relacionando o diferencial de pressão medido com a rotação do motor.

Gráfico 4 - Representação visual da relação entre diferencial de pressão medido e a rotação do motor.



Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o *software* GNU Octave.

No Gráfico 4, percebe-se que, embora os valores de diferenciais de pressão para ambos os medidores sejam bastante próximos em rotações baixas, eles se distanciam em velocidades mais altas de rotação. Assim, mostra-se necessário realizar uma correção dos dados medidos pelo medidor por área diferencial.

Com os valores de pressão coletados e utilizando-se os valores de umidade relativa, temperatura local e pressão atmosférica, monta-se a Tabela 5 de volumes específicos médios do ar úmido no momento das medições utilizando o *Software HVAC engineering calculator*.

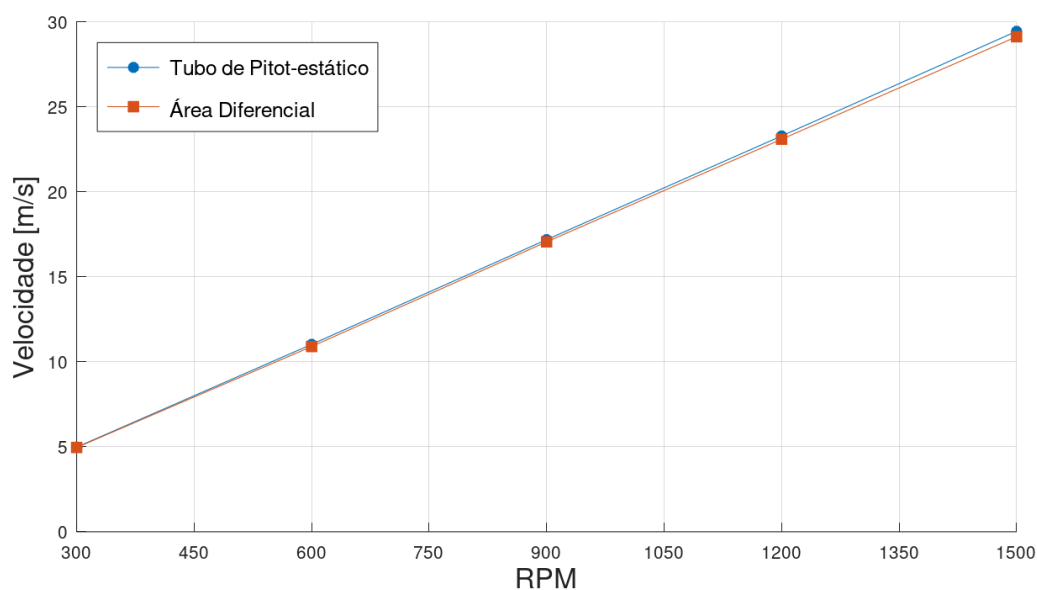
Tabela 5 - Tabela de volume específico do ar úmido no local de medição.

	Massa Específica [kg/m^3]				
RPM	300	600	900	1200	1500
Teste 1	1,152	1,155	1,157	1,156	1,157
Teste 2	1,147	1,149	1,155	1,155	1,153
Teste 3	1,147	1,149	1,152	1,149	1,152
Teste 4	1,143	1,149	1,149	1,149	1,151
Teste 5	1,055	1,046	1,048	1,047	1,045
Média	1,129	1,130	1,132	1,131	1,132

Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando Google Planilhas.

Finalmente, pode-se obter as velocidades do ar para cada velocidade de rotação do motor, utilizando-se as Equações 2.2 e 2.4 para calcular as velocidades do escoamento, a Equação 3.2 para calcular a incerteza do volume específico do ar úmido, e a substituição das Equações 2.2 e 2.4 na Equação 3.3 para obtenção das incertezas associadas às velocidades obtidas, como pode ser observado na Tabela 6 e no Gráfico 5. Devido ao pequeno número amostral, ainda se deve corrigir a incerteza para um grau de liberdade de 4, ou seja, para uma confiança de 95%, multiplicando-a, por um $t_{student} = 2,57$.

Gráfico 5 - Relação entre velocidade obtida e rotação do motor.



Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o *software* GNU Octave.

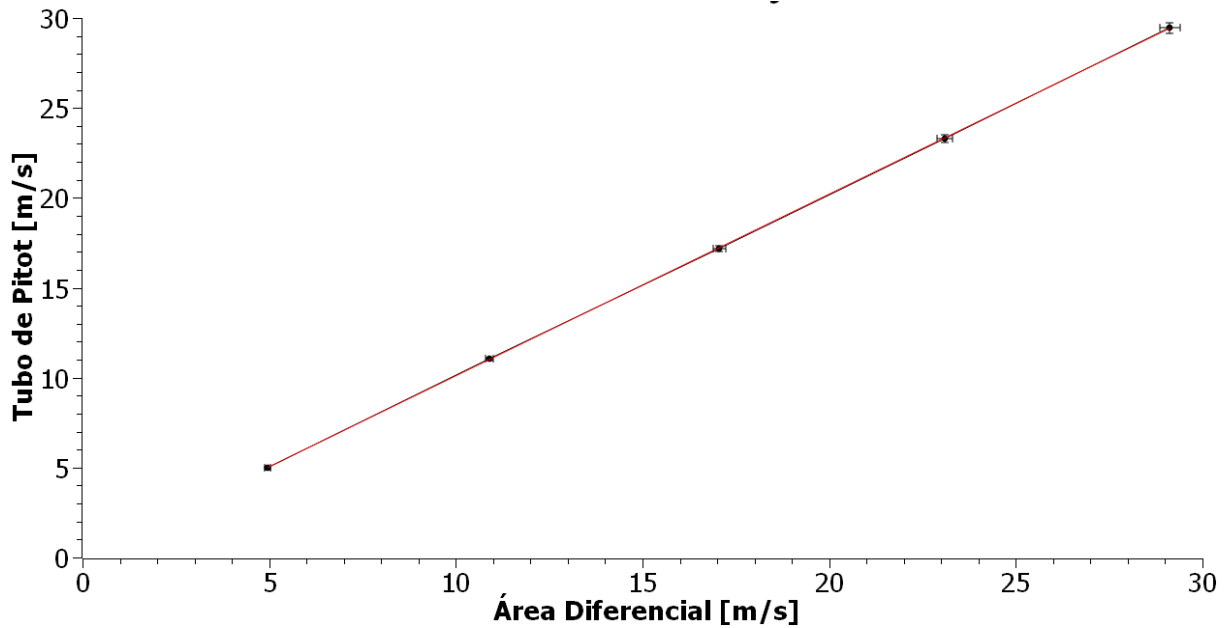
Tabela 6 - Tabela de velocidade do ar no Ponto de Calibração.

RPM	Velocidade			
	Vel. Área Dif. (m/s)	σ Vad (\pm m/s)	Vel. Tubo Pitot (m/s)	σ Vtp (\pm m/s)
300	4,96	0,18	4,98	0,21
600	10,90	0,27	11,03	0,27
900	17,06	0,41	17,19	0,42
1200	23,10	0,55	23,29	0,56
1500	29,13	0,71	29,45	0,74

Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando Google Planilhas.

Desses valores obtidos, pode-se ver que, por mais que para baixas rotações os valores de velocidade obtidos sejam próximos, à medida que a rotação do motor sobe, os valores tendem a divergir, ou seja, mostra-se necessário a construção de uma curva de calibração entre os sensores. Assim, constrói-se a curva de calibração (Gráfico 6) cuja equação (Equação 4) será utilizada para corrigir a velocidade medida pelo medidor de vazão por área diferencial.

Gráfico 6 - Representação visual da curva de calibração do medidor por área diferencial a partir do Tubo de Pitot, incluindo a representação da incerteza dos pontos pedidos.



Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o *software* SciDAVis.

Do gráfico, tem-se uma curva de calibração dos seguintes valores:

$$V_{Tubo\ de\ Pitot} = A * V_{Área\ Diferencial} - B \ (m/s) \quad (4)$$

onde $A = 1,0108 \pm 0,0085$ e $B = -0,02 \pm 0,10$
com $R^2 = 0,99998$

Com essa curva, pode-se saber a velocidade do ar úmido real no túnel de vento a partir dos valores obtidos pelo medidor por área diferencial.

4.3 VELOCIDADES

Extrai-se o perfil de pressão das posições de medição em relação à razão de alturas $\frac{x}{h}$, com os pontos de posicionamento do Tubo de Pitot variando entre $0 < \frac{y}{h} \leq 3$, sendo h equivalente à altura da colina. U_{∞} extrai-se utilizando o medidor por área diferencial e posteriormente essa velocidade é corrigida pela Equação 4. Utiliza-se também os equipamentos listados anteriormente para obter a massa específica do ar úmido durante a medição. Nos experimentos de medição de velocidade para traçar os perfis de velocidade, somente a rotação do motor de 900 RPM foi utilizada como consequência das limitações de tempo.

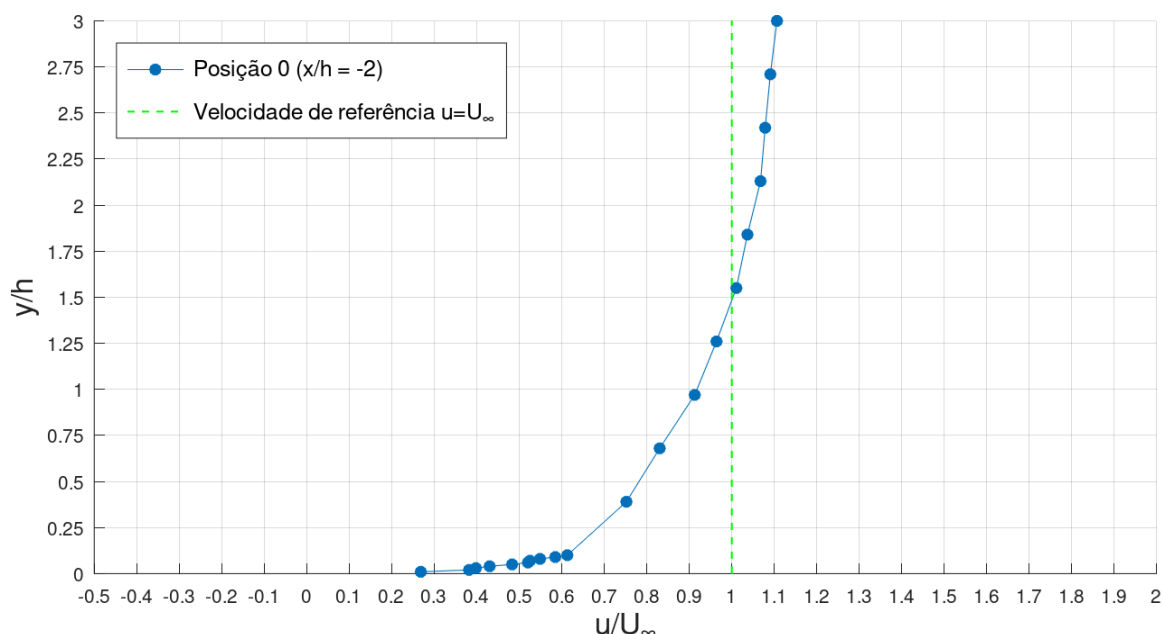
Durante os experimentos, a menor e a maior temperaturas mensuradas foram de 27,7 °C e 31,0 °C. Com esses valores, utiliza-se a Tabela A.2 (p. 828 White, 2007) para obter-se uma faixa de viscosidade cinemática (ν) de entre $1,57E^{-5}$ e $1,61E^{-5} m^2 s^{-1}$. Pode-se, então, utilizar a Equação 2.11, juntamente com o valor de $\overline{U}_\infty = 13,72 m/s$ e com o valor do comprimento característico do objeto de estudo de $L = 0,1 m$, para se obter uma faixa com o Número de Reynolds entre $8,5 \cdot 10^4$ e $8,7 \cdot 10^4$.

4.3.1 POSIÇÃO DE MEDIÇÃO 0

Para a medição da velocidade nos pontos selecionados na Posição de Medição 0 (Figura 29), posiciona-se a ponta de coleta de dados do Tubo de Pitot aproximadamente 10 cm a montante da colina, devido ao corpo do Tubo de Pitot, o que corresponde a aproximadamente 40 cm da entrada da seção de testes do túnel de vento, ou seja, $\frac{x}{h} = -2,0$. Devido às limitações de tempo, foi realizada somente uma medição por ponto de medição.

Dessa posição, obtém-se a Tabela 7 [Apêndice 1] e seu respectivo gráfico de perfil de velocidade do ar (Gráfico 7) a partir das Equações 2.2 e 2.4.

Gráfico 7 - Perfil de velocidade na posição de Medição 0.



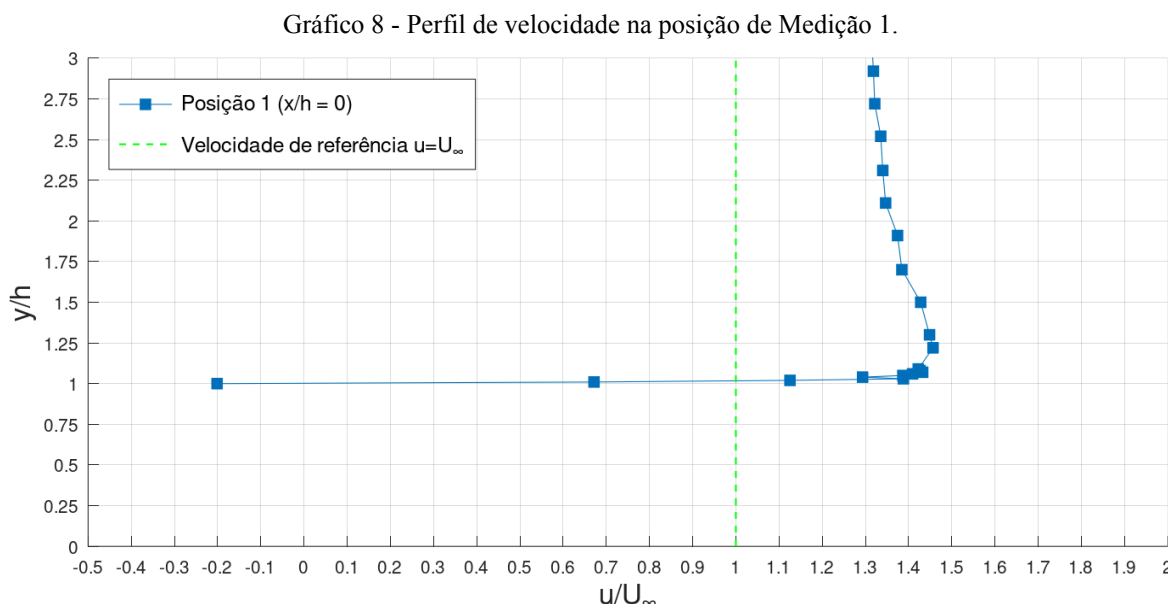
Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o *software* GNU Octave.

Desses dados (Tabela 7), mesmo tendo posicionado o Tubo de Pitot a montante da colina, já é possível notar uma aceleração do vento em relação ao U_∞ quando $\frac{y}{h} > 1,55$,

obtendo-se uma velocidade de $110,63\% \pm 1,20\%$, em relação ao U_∞ quando $\frac{y}{h} = 3$. Esse aumento, no entanto, tende a ficar constante.

4.3.2 POSIÇÃO DE MEDIÇÃO 1

Para a medição da velocidade nos pontos seleccionados na Posição de Medição 1 (Figura 29), posiciona-se a ponta de coleta de dados do Tubo de Pitot aproximadamente na metade da largura da colina, em $\frac{x}{h} = 0,0$, o que corresponde a aproximadamente 50 cm da entrada da seção de testes do túnel de vento. Assim como para a posição 0, extrai-se o perfil de velocidade do ar sobre a colina seguindo o mesmo procedimento, porém, medindo-se entre $1,00 \leq \frac{y}{h} \leq 3,13$, como pode ser visto no Gráfico 8 (Tabela 8) [Apêndice 1].



Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o *software* GNU Octave.

Desse perfil de velocidade, apresentado no Gráfico 8, primeiramente, nota-se que u/U_∞ atingiu valor negativo. Tal valor é provavelmente devido às recirculações de ar como consequência do descolamento da camada limite, por isso, seu valor é provavelmente temporário e um novo teste nesse mesmo ponto poderia facilmente resultar em um valor completamente diferente.

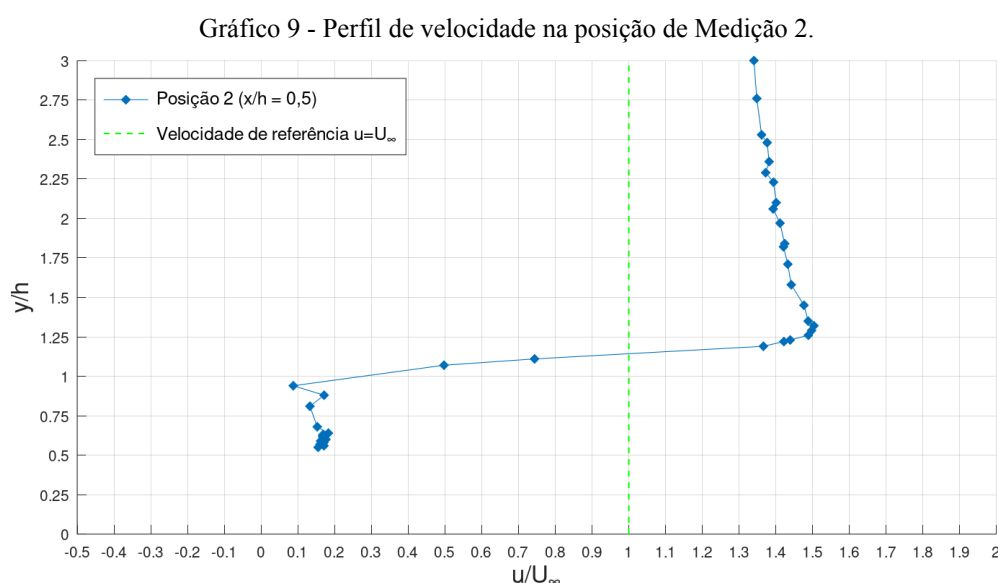
Por conseguinte, destaca-se o grande aumento de velocidade nas proximidades da superfície da colina em $1,00 \leq \frac{y}{h} \leq 1,02$, além de uma velocidade de $45,66\% \pm 1,63\%$ em $\frac{y}{h} = 1,22$ com relação ao U_∞ . Esse aumento, além de ser consideravelmente maior do

que o aumento na posição 0, ainda se encontra em uma posição muito mais próxima da superfície da colina. Esse efeito é algo esperado no escoamento sobre a colina (Breuer et al., 2008).

4.3.3 POSIÇÃO DE MEDIÇÃO 2

Novamente, para se extrair o perfil de velocidade do vento na Posição de Medição 2 (Figura 29), posiciona-se a ponta de coleta de dados do Tubo de Pitot aproximadamente em $\frac{x}{h} = 0,5$, o que corresponde acerca de 55 cm da entrada da seção de testes do túnel de vento.

Devido ao descolamento da camada limite, os valores próximos da superfície da colina ficam distribuídos de forma irregular. Portanto, diferentemente do procedimento para as posições 0 e 1, além dos 20 dados coletados, seguindo o mesmo procedimento realizado para as posições anteriores, coleta-se também mais 20 dados em posições distribuídas uniformemente entre $0,55 \leq \frac{y}{h} \leq 3,00$, como visto no Gráfico 9 e na Tabela 9 [Apêndice 1].



Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o *software* GNU Octave.

Desse último perfil de velocidade (Gráfico 9), assim como no anterior, destaca-se dois principais pontos de relevância. Primeiramente, para valores de $\frac{y}{h}$, em que $0,55 \leq \frac{y}{h} \leq 0,94$, nota-se um perfil de velocidade mais baixo, caótico e oscilante, pois apresenta os maiores desvios padrão em comparação com os demais experimentos. Assim como a velocidade negativa presente no perfil de velocidade na posição 1, esses resultados

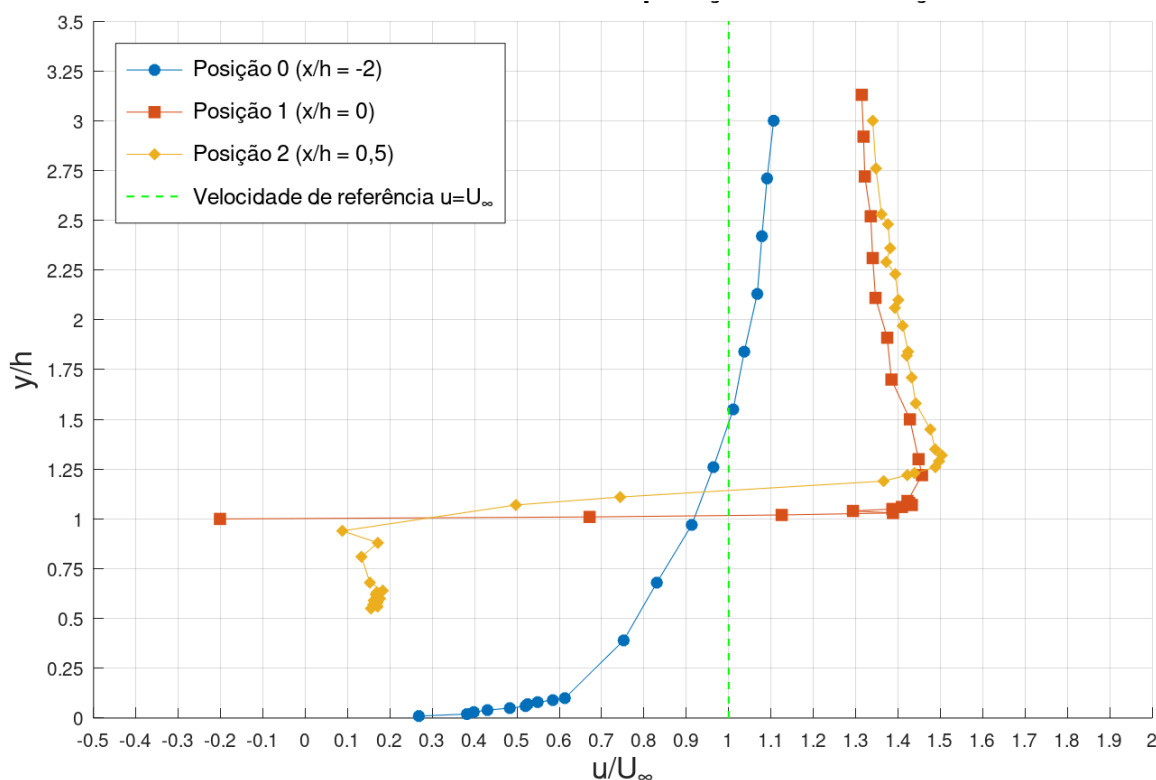
também existem como consequências de recirculações do ar após o descolamento da camada limite.

Também, nota-se uma razão de velocidade bastante elevada quando $\frac{y}{h} > 1,19$. Em particular, percebe-se que, mesmo estando a jusante do cume da colina, quando $\frac{y}{h} = 1,22$, o perfil possui um valor de velocidade de $142,18\% \pm 1,6\%$ em relação ao U_∞ , um valor próximo em comparação com o ponto na posição 1 de mesma altura. Além disso, quando $\frac{y}{h} = 1,32$, nota-se uma velocidade de $150,3\% \pm 1,7\%$ em relação ao U_∞ . Como será visto na próxima seção, as velocidades mais altas estão associadas a potenciais eólicos mais elevados.

4.3.4 COMPARAÇÃO DE PERFIS DE VELOCIDADE

Pode-se comparar os três perfis de velocidade gerados para determinar o ponto de maior velocidade do vento, ver Gráfico 10.

Gráfico 10 - Perfis de velocidade das três posições.



Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o software GNU Octave.

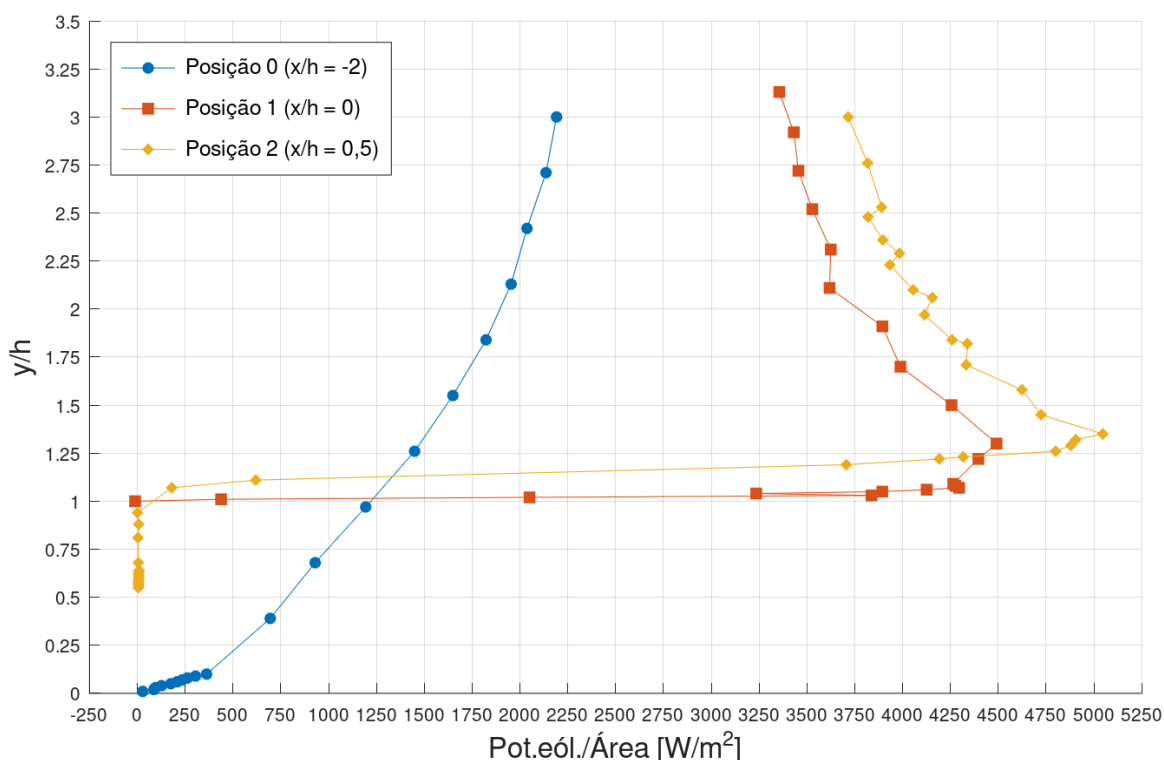
Do Gráfico 10, torna-se evidente que, embora o perfil da Posição 0 ($\frac{x}{h} = -2,0$) possua uma região na qual ocorre um aumento de velocidade, esse aumento, não somente mostra-se pouco em comparação com o aumento das outras posições de medição, mas também passa a existir somente a partir uma altura $\frac{y}{h} = 1,5$. Isso significa que seria necessária uma turbina eólica 1,5 vez maior do que a própria colina para se obter qualquer tipo de benefício do aumento da velocidade do escoamento. Esses problemas não estão presentes quando se observa o perfil das outras duas posições.

Comparando-se os perfis obtidos da Posição 1 ($\frac{x}{h} = 0,0$) e Posição 2 ($\frac{x}{h} = 0,5$), nota-se um comportamento semelhante entre as duas, com um rápido crescimento da velocidade próximo à altura do cume da colina, ou seja, quando $\frac{y}{h} \cong 1$, seguido de um ponto de velocidade máxima e uma desaceleração da sua velocidade. Entretanto, percebe-se que o perfil na Posição 2 apresenta velocidades maiores do que o perfil na Posição 1 quando $\frac{y}{h} > \sim 1,25$.

4.4 POTENCIAL EÓLICO

A partir dos perfis de velocidade traçados, pode-se utilizar a Equação 4.7 para obter-se o potencial eólico esperado para cada ponto de cada posição medida, ver Gráfico 11 e Tabelas 7-9 [Apêndice 1].

Gráfico 11 - Potencial eólico por área varrida pelas pás em função da altura das três posições de medição.



Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando o software GNU Octave.

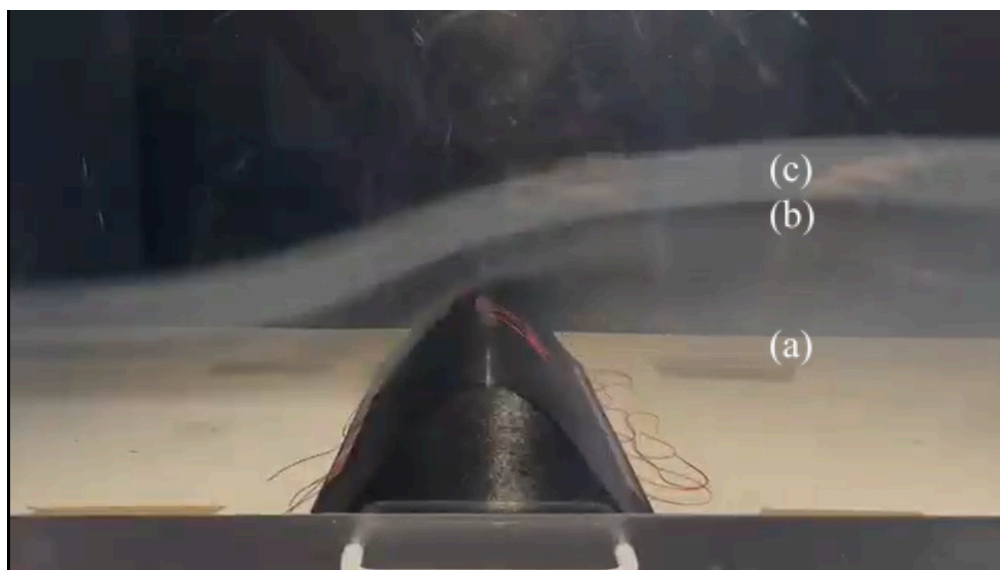
Do Gráfico 11, as maiores eficiências energéticas das posições 1 e 2 ficam ainda mais nítidas em comparação com o potencial energético visto na posição 1. Os potenciais eólicos atingem valores de aproximadamente $304,1\% \pm 1,1\%$ e $329,0\% \pm 1,1\%$, em relação ao valor esperado do potencial eólico da posição 1, quando $\frac{y}{h} = 1,30$ e $\frac{y}{h} = 1,32$, de $(1477,1 \pm 4,1) W/m^2$ e $(1490,9 \pm 4,2) W/m^2$ respectivamente.

Além disso, é possível visualizar a diferença dos potenciais eólicos entre as posições 1 e 2. Em particular, nota-se um aumento de potencial eólico de $9,21\% \pm 0,32\%$ entre os picos do potencial, mesmo com o ponto 2 a jusante da colina.

4.5 VISUALIZAÇÃO POR FUMAÇA

Para se criar uma representação visual do escoamento sobre a colina, posiciona-se a máquina de vapor Tec PORT F-950 rente à superfície inferior da entrada de ar do túnel de vento de forma centralizada entre suas superfícies laterais e utiliza-se uma câmera de um iPhone para obter a Figura 31.

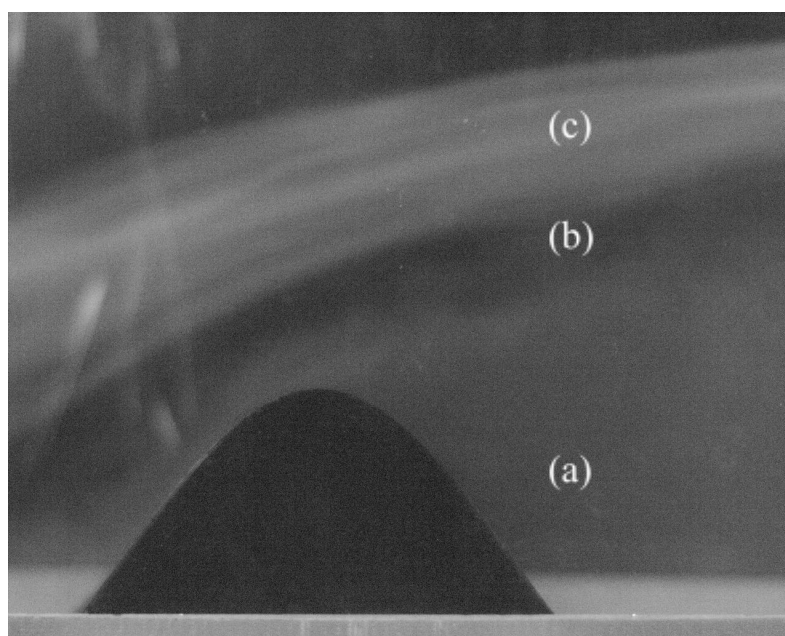
Figura 31 - Linhas de corrente percorrida pela fumaça, captura feita com câmera celular.



Fonte: Próprio Autor.

Para uma melhor análise, utiliza-se uma câmera de alta velocidade Chronus, juntamente com uma Fonte Digital PLX para Diodos Laser com módulo LASER iZi modelo luz verde 532 nm para obter a Figura 32.

Figura 32 - Linhas de corrente percorrida pela fumaça, captura feita com câmera de alta velocidade.



Fonte: Próprio Autor.

Nas Figuras 31 e 32, pode-se observar o percurso do ar quando em escoamento sobre a colina. Nota-se também um descolamento das camadas de fumaça, fenômeno que pode ser notado principalmente próximo ao cume da colina, onde, em ordem ascendente, tem-se uma

camada menos espessa de fumaça (a), seguida de uma camada com uma considerável ausência da fumaça (b), seguida novamente por uma camada com uma quantidade considerável de fumaça (c).

Outro fenômeno que se pode inferir das imagens são as recirculações e vórtices de ar resultantes do descolamento total da camada limite a jusante da colina em relação à direção do vento. Isso é representado pela névoa de fumaça para a direita da colina (a), com quase nenhuma diferenciação entre camadas.

4.6 FONTES DE ERRO

Assim como qualquer experimento, este pode possuir fontes de erros as quais podem ter prejudicado ou alterado os resultados de alguma forma. Dentre essas fontes, destaca-se:

- calibração de instrumentos: instrumentos considerados como calibrados podem estar na verdade descalibrados durante o período de coleta de dados ou podem ter sofrido influência de entradas espúrias não consideradas durante as medições, especialmente o manômetro digital utilizado;
- limpeza do túnel de vento: a limpeza do túnel de vento, ou falta de limpeza, pode ser responsável por leves alterações na entrada do ar na seção de testes, principalmente perturbando a direção de entrada;
- colmeia do túnel de vento: a colmeia presente na entrada do túnel de vento encontra-se em diversos locais deformada, com pouca limpeza e pouco uniforme. Isso pode ter contribuído para uma uniformização do escoamento ruim e níveis de turbulência maiores do que os esperados em um túnel de vento com boa manutenção;
- uso de pressão atmosférica durante os cálculos: como o túnel de vento é do tipo exaustor, a seção de testes fica submetida a pressões negativas, ou seja, menor do que a pressão utilizada para obter a massa específica do ar durante os experimentos. Embora essa variação na pressão não altere consideravelmente os valores de massa específica, ela ainda pode representar fonte de erro;
- desenvolvimento da camada limite: diferentemente do que ocorre na natureza, quando a camada limite pode se desenvolver sem barreiras físicas (Camada Limite Atmosférica, ou CLA), o escoamento no túnel de vento interage com a colina quando

ele está pouco desenvolvido. Portanto, valores obtidos por esse experimento podem destoar dos valores esperados naturalmente⁵.

- Tubo de Pitot: o Tubo de Pitot possui alguns problemas intrínsecos que podem ter afetado o experimento. Dentre eles destaca-se o fato de o Tubo de Pitot ser um equipamento intrusivo, ou seja, é posicionado diretamente dentro do fluxo, podendo alterar suas propriedades. Além disso, o Tubo de Pitot não é recomendado para medidas em escoamento não permanente, devido à resposta lenta dos tubos cheios de fluido que os ligam aos transdutores (White, 2007).
- medições unitárias: devido às limitações de tempo mencionadas anteriormente no trabalho, somente foi possível realizar uma única medição por ponto quando realizadas as medições para a construção dos perfis de velocidade. Como consequência disso, as medições estão sujeitas a erros sistemáticos de medição.

⁵ Para mais detalhes, recomenda-se a leitura do trabalho de CARDOSO (2020) e MAIA (2023).

5 CONCLUSÃO

De forma geral, pode-se concluir que se obteve êxito no quesito de concluir alguns dos objetivos propostos no presente trabalho, e outros de forma parcial. Pode-se concluir também que o Tubo de Pitot, juntamente com o túnel de vento e com o restante dos equipamentos utilizados, foram suficientes para cumprir os objetivos mencionados. Entretanto, a utilização de outros equipamentos próprios para medições de vazão com rápidas mudanças de velocidade pode gerar resultados melhores.

De início, realizou-se a relação entre o desvio padrão da média com o intervalo de tempo de medição. Com isso, pode-se notar que, a partir de certo intervalo de tempo, o valor de desvio padrão da média para de sofrer altas variações. Assim, percebe-se que o valor escolhido para medições de 60 segundos mostra-se satisfatório. Isso pode ser visto também na diferença entre os valores finais de potência eólica obtidos e suas incertezas, as quais são ordens de grandeza menores que os valores obtidos.

Dos valores de velocidade e de potência, pode-se perceber que a interação entre o escoamento e a colina não é algo a ser desconsiderado. Isso pode ser visualizado no fato de que tais interações resultaram em aumentos substanciais de velocidade do vento (um aumento de mais de 50% de velocidade em alguns casos) e ainda mais de potência eólica (um aumento de quase 230%) em relação a quando o posicionamento de uma turbina eólica em uma colina é negligenciado.

Finalmente, pode-se ver através da fumaça como ocorre a interação do vento com a colina. Nela, nota-se um descolamento total da camada limite da colina. Nesse caso, tem-se um comportamento específico do perfil de velocidade em que esta a jusante da colina é maior do que sobre o pico da colina. No entanto, como o experimento foi realizado para somente 1 das 5 rotações de motor propostas em primeira instância, é possível que, em outras velocidades, ocorra um descolamento parcial da camada limite, ou nenhum descolamento, o que alteraria os resultados vistos. Isso sugere a necessidade de se realizar um estudo caso a caso sobre o comportamento de um vento específico sobre um relevo específico.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos recomenda-se uma repetição do experimento realizado com a correção das possíveis fontes de erro: recalibração dos instrumentos; limpeza mais aprofundada do túnel de vento em sua totalidade, incluindo a colmeia, a entrada de ar, o comprimento todo do túnel de vento e a saída de ar; manutenção da colmeia de entrada para promover uma entrada de ar mais uniforme; uso de dados melhores e equipamentos mais precisos; implantação das técnicas desenvolvidas nos trabalhos de Cardoso (2020) e Maia (2023). Em particular, recomenda-se a substituição do Tubo de Pitot como instrumento de medição para um equipamento mais adequado para altas variações de velocidade, como um anemômetro de fio quente. Isso auxiliaria na redução do desvio padrão da medição nos pontos onde ocorrem rápidas mudanças de velocidade.

Além disso, recomenda-se uma ampliação do trabalho, com a inclusão de mais colinas, de forma que ocorra a interação do fluxo com duas ou mais colinas e a inclusão de colinas com formas diferentes. Pode ser positivo também uma análise com valores para Números de Reynolds diferentes, ou seja, com controle de velocidade, unidade e/ou temperatura, para aproximá-los das condições encontradas em locais estratégicos para implantação de turbinas eólicas.

REFERÊNCIAS

- AEROÁLCOOL.** Túnel de vento AA-TVSH1. Disponível em: <<http://aeroalcool.com.br/index.php/tuneis-de-vento/25-gallery/tuneis-de-vento/29-aa-tvsh1>>. Acesso em: 26 jun. 2024.
- AMARANTE, Odilon A.; BROWER, Michael; ZACK, John; SÁ, Antonio Leite de.** Atlas do potencial eólico brasileiro. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA.** O setor. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/energia-eolica/o-setor/>>. Acesso em: 21 jun. 2024.
- BAALS, Donald D.; CORLISS, James M.** Wind Tunnel of NASA. Washington: NASA, 1976.
- BAYRON, P. KELSO, R. CHIN, R.** A wind tunnel study of adverse pressure gradient impact on wind turbine wake dynamics. ELSEVIER. North Terrace, Adelaide, South Australia, 5005, Australia, fev, 2024. Disponível em: <A wind tunnel study of adverse pressure gradient impact on wind turbine wake dynamics - ScienceDirect>. Acesso em: 26 jun. 2024.
- BREUER, M.; PELLER, N.; RAPP, CH.; MANHART, M.** Flow over periodic hills – Numerical and experimental study in a wide range of Reynolds numbers. ELSEVIER. Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Universität München, fev, 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045793008001126>>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- CARDOSO, F. R. M.** Caracterização experimental de túneis de vento para a análise de potencial eólico. Dissertação de Mestrado (UFG), Goiânia, 2020.
- CASTAGNA, J. YAO, Y. YAO, J.** Direct numerical simulation of a turbulent flow over an axisymmetric hill. ELSEVIER. London, UK; Bristol UK, Lincoln, UK, abril 2012. Disponível em: <Direct numerical simulation of a turbulent flow over an axisymmetric hill - ScienceDirect>. Acesso em: 26 jun. 2024.
- COLE, E. S.** *Pitot-tube practice. Transactions of the American society of mechanical engineers*, 57(8): 281- 294, 1935.
- DUPRAT, C.; BALARAC, G.; MÉTAIS, O.; CONGEDO, P. M.; BRUGIÈRE, O.** A wall-layer model for large-eddy simulations of turbulent flows with/out pressure gradient. Physics of Fluids. AIP Publishing, 1024 rue de la Piscine, 38041 Grenoble, France, jan, 2011. Disponível em: <<https://pubs.aip.org/aip/pof/article-abstract/23/1/015101/937513/A-wall-layer-model-for-large-eddy-simulations-of?redirectedFrom=fulltext>>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- ELETOBRAS FURNAS.** Citação exata do trecho. Disponível em: <<https://www.furnas.com.br/energialimpa/?culture=p>t>>. Acesso em: 23 de maio de 2023.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Wind energy. Disponível em: <<https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>>. Acesso em: 21 jun. 2024.

JENA, S. GAIROLA, A. Numerical Method to Generate and Evaluate Environmental Wind Over Hills: Comparison of Pedestrian Winds Over Hills and Plains. SEMARAK ILMU. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Lab, Civil Engineering, Graphic Era University, Dehradun, Uttarakhand, India, aug, 2022. Disponível em: <https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/CFD_Letters/article/view/779>. Acesso em: 25 jun. 2024.

KRON TECHNOLOGIES. User Manual Chronos 1.4 & Chronos 2.1-HD. Software Version 0.7.0, RE-PDEV-10009 Rev 1.2. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.krontech.ca/wp-content/uploads/2021/09/RE-PDEV-10009-Chronos-User-Manual-Full-Software-Version-0.7.0.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2024.

LASERLINE. Fontes para laser. Disponível em: <<https://www.laserline.com.br/produtos/cientifica/fontes-para-laser>>. Acesso em: 12 jun. 2024.

MAIA, C. S. A. Estimativa do potencial eólico a partir de experimento em túnel de vento utilizando placa plana de camada limite. Dissertação de Mestrado (UFG), Goiânia, 2023.

PO-HUA, C. CHUAN-CHIEH, L. HSIN-WEI, H. SHIH-HUANG, L. CHAO-AN, L. Simulations of laminar and turbulent flows over periodic hills with immersed boundary method. ELSEVIER. National Tsing Hua University, Hsinchu 30013, Taiwan, dec. 2012. Disponível em: <Simulations of laminar and turbulent flows over periodic hills with immersed boundary method - ScienceDirect>. Acesso em: 26 jun. 2024.

SEEKPNG. Máquina de fumaça F-950 Tecport 110V. Disponível em: <https://www.seekpng.com/ipng/u2q8w7e6r5y3e6o0_mquina-de-fumaa-f-950-tecport-110v-maquina/>. Acesso em: 12 jun. 2024.

TURBINAS GIGANTES GANHAM MERCADO DE GERAÇÃO EÓLICA. Valor Econômico, 2019. Disponível em: <<https://valor.globo.com/empresas/noticia/2019/06/25/turbinas-gigantes-ganham-mercado-de-geracao-eolica.ghtml>>. Acesso em: 01 jul. 2024.

WHITE, F. M. Mecânica dos Fluidos. 6. ed. São Paulo, Brasil: The McGraw-Hill Companies, Inc and ARTMED Editora S.A., 2007.

APÊNDICE

Tabela 7 - Tabela das propriedades do vento na posição 0.

Posição 0	Altura · 10 ²		Velocidade · 10 ²		Potencial Eólico	
Potencial Eól.	y/h	σ y/h (±)	u/U _∞	σ u/U _∞ (±)	W/m ²	σ W/m ² (±)
Ponto 1	1,00	0,58	26,83	0,35	28,23	0,62
Ponto 2	2,00	0,58	38,18	0,45	87,1	1,2
Ponto 3	3,00	0,58	39,79	0,47	95,3	1,2
Ponto 4	4,00	0,58	43,03	0,49	126,5	1,3
Ponto 5	5,00	0,58	48,31	0,54	175,0	1,4
Ponto 6	6,00	0,58	52,04	0,59	208,6	1,5
Ponto 7	7,00	0,58	52,51	0,59	234,5	2,1
Ponto 8	8,00	0,58	54,88	0,61	261,2	1,7
Ponto 9	9,00	0,58	58,47	0,65	304,3	1,8
Ponto 10	10,00	0,58	61,31	0,68	362,1	1,8
Ponto 11	39,00	0,58	75,20	0,82	694,8	1,7
Ponto 12	68,00	0,58	83,03	0,90	929,7	1,8
Ponto 13	97,00	0,58	91,28	1,00	1193,7	2,7
Ponto 14	126,00	0,58	96,40	1,05	1449,5	2,6
Ponto 15	155,00	0,58	101,07	1,10	1649,6	3,6
Ponto 16	184,00	0,58	103,68	1,13	1822,8	3,5
Ponto 17	213,00	0,58	106,76	1,16	1953,9	3,6
Ponto 18	242,00	0,58	107,85	1,17	2036,9	3,7
Ponto 19	271,00	0,58	109,07	1,18	2136,2	4,1
Ponto 20	300,00	0,58	110,63	1,20	2191,3	4,2

Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando Google Planilhas.

Tabela 8 - Tabela das propriedades do vento na posição 1.

Posição 1	Altura $\cdot 10^2$		Velocidade $\cdot 10^2$		Potencial Eólico	
	y/h	σ y/h (\pm)	u/U ∞	σ u/U ∞ (\pm)	W/m 2	σ W/m 2 (\pm)
Ponto 1	100,00	0,58	-20,14	2,06	-11,6	3,5
Ponto 2	101,00	0,58	67,15	1,71	438	30
Ponto 3	102,00	0,58	112,53	1,67	2050	60
Ponto 4	103,00	0,58	138,80	1,59	3838	28
Ponto 5	104,00	0,58	129,35	1,55	3235	44
Ponto 6	105,00	0,58	138,66	1,58	3894	29
Ponto 7	106,00	0,58	140,92	1,58	4126	21
Ponto 8	107,00	0,58	143,26	1,60	4296	14
Ponto 9	108,00	0,58	142,62	1,59	4276	13
Ponto 10	109,00	0,58	142,23	1,59	4265	13
Ponto 11	122,00	0,58	145,66	1,63	4396,3	9,4
Ponto 12	130,00	0,58	144,85	1,61	4491,4	9,7
Ponto 13	150,00	0,58	142,80	1,59	4256,3	8,3
Ponto 14	170,00	0,58	138,44	1,54	3989,1	7,4
Ponto 15	191,00	0,58	137,44	1,53	3894,6	6,8
Ponto 16	211,00	0,58	134,68	1,50	3618,4	6,8
Ponto 17	231,00	0,58	134,02	1,49	3624,7	6,0
Ponto 18	252,00	0,58	133,55	1,49	3528,2	6,3
Ponto 19	272,00	0,58	132,16	1,47	3455,6	6,9
Ponto 20	292,00	0,58	131,85	1,46	3431,5	6,5
Ponto 21	313,00	0,58	131,43	1,46	3355,8	6,2

Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando Google Planilhas.

Tabela 9 - Tabela das propriedades do vento na posição 2.

Posição 2	Altura · 10 ²		Velocidade · 10 ²		Potencial Eólico	
	y/h	σ y/h (±)	u/U _∞	σ u/U _∞ (±)	W/m ²	σ W/m ² (±)
Ponto 1	55,00	0,58	15,50	0,64	5,55	0,66
Ponto 2	56,00	0,58	17,10	0,57	7,57	0,72
Ponto 3	57,00	0,58	16,06	0,61	6,26	0,69
Ponto 4	58,00	0,58	17,06	0,58	7,46	0,71
Ponto 5	59,00	0,58	16,18	0,56	6,38	0,63
Ponto 6	60,00	0,58	17,64	0,57	8,39	0,77
Ponto 7	61,00	0,58	16,94	0,59	7,35	0,73
Ponto 8	62,00	0,58	16,68	0,55	7,00	0,65
Ponto 9	63,00	0,58	16,83	0,57	7,08	0,68
Ponto 10	64,00	0,58	18,30	0,51	9,30	0,72
Ponto 11	68,00	0,58	15,27	0,61	5,17	0,60
Ponto 12	81,00	0,58	13,28	0,70	3,40	0,52
Ponto 13	88,00	0,58	17,14	0,70	7,65	0,90
Ponto 14	94,00	0,58	8,8	1,7	0,98	0,57
Ponto 15	107,00	0,58	49,74	0,93	179,8	8,0
Ponto 16	111,00	0,58	74,4	1,4	619	27
Ponto 17	119,00	0,58	136,6	1,6	3706	32
Ponto 18	122,00	0,58	142,2	1,6	4192	25
Ponto 19	123,00	0,58	143,9	1,6	4317	21
Ponto 20	126,00	0,58	148,8	1,7	4800	13
Ponto 21	129,00	0,58	149,7	1,7	4879	12
Ponto 22	132,00	0,58	150,3	1,7	4905	10
Ponto 23	135,00	0,58	148,8	1,7	5047	12
Ponto 24	145,00	0,58	147,6	1,6	4724,1	8,8
Ponto 25	158,00	0,58	144,2	1,6	4624,0	8,6
Ponto 26	171,00	0,58	143,2	1,6	4332,6	8,2
Ponto 27	182,00	0,58	142,0	1,6	4338,6	7,6
Ponto 28	184,00	0,58	142,4	1,6	4258,5	7,5
Ponto 29	197,00	0,58	141,1	1,6	4114,7	8,0
Ponto 30	206,00	0,58	139,2	1,6	4156,0	6,8

Ponto 31	210,00	0,58	140,1	1,6	4055,9	7,3
Ponto 32	223,00	0,58	139,4	1,6	3933,3	6,5
Ponto 33	229,00	0,58	137,2	1,5	3983,7	6,6
Ponto 34	236,00	0,58	138,2	1,5	3897,0	6,5
Ponto 35	248,00	0,58	137,6	1,5	3819,4	6,4
Ponto 36	253,00	0,58	136,1	1,5	3890,7	6,5
Ponto 37	276,00	0,58	134,8	1,5	3817,6	6,4
Ponto 38	3,00	0,58	134,0	1,5	3715,9	6,8

Fonte: Elaborado pelo autor, utilizando Google Planilhas.