



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL (EECA)  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E  
SANITÁRIA (PPGEAS)

CÁSSIA SILVA DE AZEVEDO MAIA

**Estimativa do potencial eólico a partir de experimento em  
túnel de vento utilizando placa plana de camada limite**

GOIÂNIA  
2023



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

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

### E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 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 das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

#### 1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação     Tese     Outro\*: \_\_\_\_\_

\*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

#### 2. Nome completo do autor

Cássia Silva de Azevedo Maia

#### 3. Título do trabalho

Estimativa do potencial eólico a partir de experimento em túnel de vento utilizando placa plana de camada limite

#### 4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento  SIM     NÃO<sup>1</sup>

[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) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

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;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

**Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Pamplona Mariano, Professor do Magistério Superior**, em 16/01/2024, às 08:57, 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 **Cássia Silva De Azevedo Maia, Discente**, em 16/01/2024, às 09:04, 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](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4317068** e o código CRC **F067D18A**.

CÁSSIA SILVA DE AZEVEDO MAIA

**Estimativa do potencial eólico a partir de experimento em túnel de vento utilizando placa plana de camada limite**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da Escola de Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Linha de Pesquisa: Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos

Orientador: Professor Doutor Felipe Pamplona Mariano

Coorientador: Professor Doutor Marlipe Garcia Fagundes Neto

GOIÂNIA  
2023

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

Maia, Cássia Silva de Azevedo  
Estimativa do potencial eólico a partir de experimento em túnel de vento utilizando placa plana de camada limite [manuscrito] / Cássia Silva de Azevedo Maia. - 2023.  
97 f.: il.

Orientador: Prof. Felipe Pamplona Mariano; co-orientador Marilpe Garcia Fagundes Neto.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Goiânia, 2023.  
Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Túnel de vento. 2. Camada limite. 3. Planejamento fatorial. 4. Potencial eólico. I. Mariano, Felipe Pamplona, orient. II. Título.

CDU 628.1



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**

Ata nº **009/2023** da sessão de Defesa de Dissertação de **Cássia Silva de Azevedo Maia**, que confere o título de Mestra em Engenharia Ambiental e Sanitária, na área de concentração em **Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental**.

Aos **vinte e um dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e três**, a partir das **quinze horas**, no **Auditório do Prédio da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação do Campus Samambaia**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada **“Estimativa do potencial eólico a partir de experimento em túnel de vento utilizando placa plana de camada limite”**. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Felipe Pamplona Mariano (PPGEAS)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Joel Roberto Guimarães Vasco (PPGEAS)**, membro titular interno, e Professor Doutor **Leonardo Queiroz Moreira (EMC/UFV)**, membro titular externo e participação do coorientador Professor Doutor **Marlipe Garcia Fagundes Neto (EMC/UFV)**. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido a candidata **aprovada** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Felipe Pamplona Mariano**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **vinte e um dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e três**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Pamplona Mariano, Professor do Magistério Superior**, em 21/12/2023, às 17:06, 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 **Joel Roberto Guimaraes Vasco, Professor do Magistério Superior**, em 21/12/2023, às 17:07, 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 21/12/2023, às 17:07, 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 21/12/2023, às 17:09, 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.ufv.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufv.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4237186** e o código CRC **34FF7826**.

Referência: Processo nº 23070.067589/2023-01

SEI nº 4237186

## **Agradecimentos**

A Deus, pelo dom da vida e por sempre estar guiando minhas escolhas durante o longo trajeto.

Aos meus pais, por terem colocado, com muito amor, os estudos como prioridade em nossa casa.

Ao meu esposo, pela paciência, pelas orientações nas decisões difíceis, e pelo amor e apoio desde o início desta trajetória.

Aos meus amados filhos, que apesar de pequenos, souberam entender perfeitamente os momentos de ausência.

Aos familiares e amigos que se dispuseram a cuidar dos pequenos para que eu pudesse realizar os experimentos.

Ao meu orientador e coorientador, pela paciência e oportunidade de realizar esse desafio. Agradeço pela convivência, pelos aprendizados, pelas poucas conversas, pelos incentivos. Vocês são pessoas admiráveis.

Ao PPGEAS pela oportunidade e a todos os seus professores que deixaram seus ensinamentos e experiências.

Ao PPGMEC pela estrutura oferecida para a realização dos trabalhos. Agradeço a todos os funcionários, técnicos e professores da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação que disponibilizaram seu tempo para contribuir com o desenvolvimento deste trabalho.

À FURNAS Centrais Elétricas S.A. e ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) da ANEEL pela infraestrutura e suporte financeiro disponibilizados para a realização do presente trabalho.

## Resumo

A preocupação com os desequilíbrios ambientais é frequente em todo o mundo e o investimento em energias limpas e renováveis aumenta progressivamente. A avaliação dos recursos eólicos torna-se cada vez mais desafiadora, uma vez que leva em conta parâmetros ambientais, como as flutuações climáticas, além dos gastos financeiros em estudos de viabilidade de construção de parques eólicos. Para esses estudos, a estimativa do potencial eólico utiliza-se de modelos numéricos e experimentais como complemento às medições em campo. Este trabalho refere-se ao estudo experimental em túnel de vento disponibilizado por FURNAS Centrais Elétricas S.A. da variação da camada limite a partir de um aparato conhecido como placa plana de camada limite, que contém sondas de pressão instaladas e um mecanismo de flape instalado no bordo de fuga. A partir desses experimentos, objetiva-se desenvolver um modelo de controle da altura da camada limite para estimativa de potencial eólico. Foram feitas diferentes combinações de ângulos ( $-10^\circ$ ,  $+10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $+20^\circ$ ) e velocidades (6, 13, 20, 26 e  $33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Os resultados obtidos mostram que, ao modificar o ângulo do posicionamento do flape, a camada limite gerada sobre a placa sofre alteração significativa. Ao analisar o ângulo separadamente de cada velocidade, a camada limite gerada é significativamente diferente para todas as velocidades estudadas. O potencial eólico se mostrou melhor em altas velocidades e teve discreto aumento em ângulos de flape negativos.

**Palavras-chave:** Túnel de vento, camada limite, planejamento fatorial, potencial eólico.

## **Abstract**

Concern about environmental imbalances is frequent throughout the world and investment in clean and renewable energy is increasing progressively. The assessment of wind resources becomes increasingly challenging, as it takes into account environmental parameters, such as climate fluctuations, in addition to financial expenses in feasibility studies for the construction of wind farms. For these studies, the estimation of wind potential uses numerical and experimental models as a complement to field measurements. This work refers to the experimental study in a wind tunnel made, available by FURNAS of the atmospheric boundary layer variation from an apparatus known as a flat boundary layer plate, which contains installed pressure probes and a flap mechanism installed on the trailing edge. Different combinations of angles ( $-10^\circ$ ,  $+10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $+20^\circ$ ) and velocities (6, 13, 20, 26 and  $33 \text{ m.s}^{-1}$ ) were made. The results obtained show that, when modifying the flap positioning angle, the boundary layer generated on the plate undergoes significant changes. When analyzing the angle separately for each speed, the boundary layer generated is significantly different for all speeds studied. The wind potential was better at high speeds and had a slight increase at negative flap angles.

**Keywords:** Wind tunnel, boundary layer, factorial planning, wind potencial.

## Lista de Figuras

Figura 1. Matriz Elétrica Brasileira .....	22
Figura 2. Evolução da Capacidade Eólica no Brasil .....	22
Figura 3. Subdivisão da Troposfera.....	23
Figura 4. Subdivisão da CLA .....	25
Figura 5. Exemplos de aplicação do túnel de vento: Automobilística (a), Engenharia Civil (b), Aeronáutica (c) e (d). .....	29
Figura 6. Exemplo de aplicação de experimento em túnel de vento para estudo de terreno complexo .....	29
Figura 7. Esquema de um túnel de vento de circuito fechado.....	30
Figura 8. Esquema de um túnel de vento de circuito aberto.....	30
Figura 9. Pontos de pressão de estagnação e estática no Tubo de Pitot. ....	32
Figura 10. Esquema da posição correta do tubo de Pitot na medição do escoamento ...	34
Figura 11. Exemplos de tipos de sondas dos anemômetros .....	35
Figura 12. Exemplo de um anemômetro de fio quente .....	36
Figura 13. Túnel de Vento - TV .....	40
Figura 14. Desenho esquemático das partes do túnel de vento. ....	41
Figura 15. Planta Baixa da Localização do Túnel de Vento em milímetros. ....	42
Figura 16. Seção de Testes do túnel de vento.....	42
Figura 17. Placa plana para estudo de desenvolvimento de camada limite: posicionada no interior da seção de testes do túnel de vento (a), detalhe dos sensores de pressão (b). .....	43
Figura 18. Desenho esquemático da vista superior e lateral da placa plana de camada limite e seus sensores (medidas em milímetros) .....	43
Figura 19. Estrutura para o Tubo de Pitot e Tubo de Pitot utilizado no experimento....	44
Figura 20. Módulo de Pressão utilizado no experimento .....	45
Figura 21. Leitor de Umidade Relativa e Temperatura .....	46

Figura 22. Tela de entrada de dados do aplicativo utilizado para cálculo da massa específica do ar. ....	46
Figura 23. Transferidor utilizado no experimento.....	47
Figura 24. Gráfico da Rotação versus Velocidade do experimento de calibração do TV .....	48
Figura 25. Gráfico da Pressão versus Velocidade do experimento de calibração do TV	49
Figura 26. Inversor de Frequência no túnel de vento .....	49
Figura 27. Esquema de análise dos experimentos .....	50
Figura 28. Detalhe do sensor de leitura da placa de camada limite.....	51
Figura 29. Placa de Camada Limite destacando o conjunto de sensores escolhido .....	52
Figura 30. Desenvolvimento da CL ao longo das paredes de um TV .....	53
Figura 31. Desenvolvimento da CL dentro da seção de ensaios do TV.....	57
Figura 32. Fluxograma resumido da metodologia de estudo.....	62
Figura 33. Distribuições de velocidade média ao longo dos sensores de aquisição de pressão, para diferentes ângulos de posicionamento do flape da placa plana. ....	63
Figura 34. Resultados apresentados em gráficos de Resíduo da resposta para o estudo da combinação dos fatores velocidade e ângulo.....	67
Figura 35. Gráficos de Contorno do metamodelo (1) e (2) respectivamente. ....	70
Figura 36. Gráficos de Resíduos do metamodelo (1) e (2) respectivamente.....	71
Figura 37. Gráfico da Estimativa do Potencial Eólico para os diferentes ângulos e velocidades estudados.....	73
Figura 38. Gráficos resultados ANOVA para velocidade imposta de $6 \text{ m.s}^{-1}$ .....	88
Figura 39. Gráficos resultados ANOVA para velocidade imposta de $13 \text{ m.s}^{-1}$ .....	90
Figura 40. Gráficos resultados ANOVA para velocidade imposta de $20 \text{ m.s}^{-1}$ .....	91
Figura 41. Gráficos resultados ANOVA para velocidade imposta de $26 \text{ m.s}^{-1}$ .....	93
Figura 42. Gráficos resultados ANOVA para velocidade imposta de $33 \text{ m.s}^{-1}$ .....	94

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Características principais de diferentes estudos selecionados .....	38
Tabela 2. Características do túnel de vento utilizado no experimento .....	40
Tabela 3. Resultados da Calibração do Túnel de Vento.....	48
Tabela 4. Ângulos do flape e velocidades escolhidas para realizar o planejamento fatorial.....	51
Tabela 5. Análise de Variância para o estudo da combinação dos fatores velocidade e ângulo. ....	67
Tabela 6. Sumário do Modelo para o estudo da combinação dos fatores velocidade e ângulo .....	67
Tabela 7. Principais valores as velocidades estudadas .....	68
Tabela 8. Principais valores estatísticos dos metamodelos (1) e (2). ....	69
Tabela 9. Resultados do cálculo do Potencial Eólico.....	72
Tabela 10. ANOVA Fator Ângulo - $V = 6 \text{ m.s}^{-1}$ .....	88
Tabela 11. ANOVA Fator Ângulo - $V = 13 \text{ m.s}^{-1}$ .....	89
Tabela 12. ANOVA Fator Ângulo - $V = 20 \text{ m.s}^{-1}$ .....	91
Tabela 13. ANOVA Fator Ângulo - $V = 26 \text{ m.s}^{-1}$ .....	92
Tabela 14. ANOVA Fator Ângulo - $V = 33 \text{ m.s}^{-1}$ .....	94
Tabela 15. Coeficientes para Resposta Transformada – Modelo (1) .....	96
Tabela 16. Sumário Modelo para Resposta Transformada – Modelo (1) .....	96
Tabela 17. Coeficientes para Resposta Transformada – Modelo (2) .....	96
Tabela 18. Sumário Modelo para Resposta Transformada – Modelo (2) .....	97
Tabela 19. Análise de Variância para a Resposta Transformada – Modelo (2).....	97

## Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

BL	Boundary Layer
CE	Câmara de Ensaios
CL	Camada Limite
CLA	Camada Limite Atmosférica
E	Energia Cinética
$f_{inv}$	Inverso da função de distribuição F, avaliada pelos valores de probabilidade dos parâmetros do modelo da distribuição F.
$g$	Gravidade
GL	Grau de Liberdade
Hz	Hertz
$l$	Comprimento do cilindro do ar
$L_x$	Comprimento ao longo do eixo $x$
$L_z$	Largura da seção de ensaios na direção do eixo $z$
$m$	Massa do vento
MQR	Média quadrática do resíduo
MQR	Média quadrática do modelo
$p$	Gradiente de Pressão
$Pa$	Pascal
$P_{eol}$	Potencial Eólico
$P_{total}$	Pressão Total
$P_e$	Pressão Estática Aberta
$r$	Raio da turbina
$Re$	Número de Reynolds
$rpm$	Rotação por Segundo
$R^2$	Resíduos

$R^2 (Aj.)$	Resíduos Ajustado
$R^2 (Pred.)$	Resíduos Predito
$s$	segundos
SC	Superfícies de Controle
SQ Seq	Soma Quadrática
SQ (Aj.)	Soma Quadrática Ajustado
$SQ_T$	Soma quadrática em torno da média do modelo
$SQ_R$	Soma quadrática devido a regressão linear
TV	Túnel de Vento
$u, v$	Componentes do vetor velocidade
$u$	Velocidade
$V$	Velocidade Média
$\bar{V}$	Velocidade média do vento
Valor $F$	Valor da Distribuição $F$
Valor $P$	Valor da probabilidade escolhido como limite
VC	Volume de Controle
VIF	Fator de Inflação da Variância
$x$	Direção ao longo da parede sólida do túnel de vento
$y$	Direção normal à placa
$y_i$	Valor verdadeiro das observações
$\bar{y}$	Resposta média global das observações
$\hat{y}_i$	Vetor resposta das combinações da matriz $X$ e os coeficientes $\beta_i$
$\rho$	Massa Específica
$\mu$	Coefficiente de viscosidade dinâmica
$\delta$	Espessura da camada limite
$\partial$	Diferencial parcial

$\Delta P$       Variação de Pressão

$\Delta t$       Intervalo de tempo

$dA$       Área Infinitesimal

## Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	16
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1.	Energia Eólica.....	19
2.2.	Camada Limite Atmosférica (CLA).....	23
2.3.	Dinâmica dos Fluidos.....	26
2.3.1.	Túnel de Vento.....	27
2.3.2.	Tubo de Pitot.....	31
2.4.	Camada Limite - Análise Experimental em Túnel de Vento.....	36
3.	METODOLOGIA.....	39
3.1.	Descrição dos Equipamentos Utilizados.....	39
3.1.1.	Túnel de Vento.....	39
3.1.2.	Placa de Camada Limite.....	43
3.1.3.	Tubo de Pitot, Módulo de Pressão, termohigrômetro e outros.....	44
3.2.	Procedimento Experimental.....	47
3.2.1.	Calibração do Túnel de Vento.....	47
3.2.2.	Controle da camada limite utilizando a placa plana.....	49
3.2.3.	Desenvolvimento e controle da camada limite.....	52
3.4.	Procedimento Estatístico.....	59
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
4.1.	Análise da Altura da Camada Limite para os Diferentes Ângulos de Flape.....	63
4.2.	Demonstração Estatística dos Resultados.....	66
4.2.1.	ANOVA com 2 Fatores: Ângulo e Velocidade.....	66
4.2.2.	ANOVA com 1 Fator: Ângulo.....	68
	REFERÊNCIAS.....	76
	APÊNDICES.....	81

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Conceitos Fundamentais

No Brasil, o consumo de energia elétrica apresenta um crescimento contínuo, principalmente, com o desenvolvimento econômico e tecnológico decorrido nos últimos anos (BREITENBACH, 2016). A crescente industrialização, aumento da população e consequente aumento da utilização de equipamentos que consomem energia elétrica, necessita, paralelamente de um maior crescimento na geração, transmissão e distribuição, o que nem sempre ocorre na mesma velocidade do consumo (BREITENBACH, 2016).

Adicionado a isso, a geração de energia elétrica, proveniente das hidroelétricas, está comprometida devido às mudanças climáticas e a opção mais célere encontrada pelo governo federal e os órgãos brasileiros de gestão de energia para resolver esse problema foi recorrer ao uso de usinas termoeletricas, as quais geram energia elétrica através da queima de combustíveis fósseis, especificamente, derivados de petróleo e carvão (VIOLA, et al., 2015). Entretanto, recorrer ao uso de termoeletricas, além de outros malefícios, gera um aumento no efeito estufa (VIOLA, et al., 2015) e, como resultados negativos, tem-se o aumento da temperatura global, o que agrava ainda mais as mudanças climáticas, como o problema de redução do volume de chuvas e ondas de extremo calor (COIMBRA e TIBÚRCIO, 2006; PFISTER, 2015).

Assim, diante da necessidade de energia elétrica, tem-se um ciclo de aquecimento e destruição do meio ambiente. Portanto, é preciso investir em formas alternativas de se obter energia elétrica, especificamente, em fontes energéticas limpas e renováveis. Neste cenário, uma das opções é a energia eólica, energia provinda dos ventos, considerada uma fonte de energia limpa e renovável.

A energia proveniente de fontes eólicas é aquela em que a energia cinética do movimento dos ventos, em contato com as pás do aerogerador, ocasiona o movimento de rotação do eixo principal, originando a energia mecânica que aciona o gerador elétrico produzindo energia elétrica (ANEEL, 2008). Logo, os estudos sobre energia eólica abrangem desde projetos de turbinas até análises de potencial eólico em locais de interesse. E para isso, investimentos em pesquisas para melhorar as áreas como eficiência de turbinas e potencial eólico ainda são necessários. Especificamente, o presente trabalho é parte do projeto de pesquisa e desenvolvimento denominado “Desenvolvimento de

processos numéricos de alta ordem de convergência e experimentais de baixo custo para o estudo de escoamento de ventos sobre terrenos: estimativa do potencial eólico”, financiado por FURNAS Centrais Elétricas e pelo Programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

É importante destacar que a primeira etapa para o uso da energia eólica é conhecer o potencial eólico do local onde se pretende instalar uma turbina ou mesmo um parque eólico. O conhecimento do potencial eólico em um terreno influencia diretamente nas decisões das empresas de geração de energia elétrica, já que a aquisição correta de terrenos e dimensionamento de turbinas eólicas específicas para um dado regime de vento local produz energia elétrica com boa qualidade de forma a aumentar os índices de continuidade.

Para tanto, os testes para estimar ou obter o potencial eólico podem ser feitos diretamente em campo. Entretanto, segundo Conan (2016), as medições em campo são limitadas a locais esparsos que podem não refletir as condições de todo o local. Isto é particularmente verdadeiro em terrenos complexos. Portanto, na escala de um parque eólico, outras abordagens são necessárias como a Dinâmica dos Fluidos Computacional e Experimental, pois as ferramentas desenvolvidas nessa área podem prever o escoamento e ainda dimensionar turbinas eólicas mais eficientes. No presente trabalho serão apresentados estudos de Dinâmica dos Fluidos, que abrangem experimentos feitos em túneis de vento.

Túneis de vento são equipamentos experimentais que utilizam o princípio do movimento relativo entre o fluido e o modelo imerso. São projetados para desenvolver um escoamento artificial controlado, que modela a corrente livre, a qual deve ter velocidade constante ao longo do tempo e em toda área transversal de entrada da seção de testes (CARDOSO, 2020). São divididos em duas categorias, de circuito aberto ou fechado. Os sistemas de circuito aberto não recirculam o ar e são mais viáveis economicamente, pois eles são compostos por apenas três estruturas principais: um bocal, uma seção de teste e um difusor. Já em um túnel de circuito fechado, o ar recircula dentro do sistema. Desse modo, ele tem mais componentes e é um sistema mais complexo e custoso (QUEIROGA, 2022).

Túneis de vento são concebidos para suprimir a camada limite e minimizar a intensidade turbulenta na entrada da seção de testes, o que passa a ser o principal desafio

da presente dissertação, já que é necessário modelar experimentalmente o escoamento de massas de ar em ambientes abertos (ventos), especialmente escoamentos que formam a camada limite atmosférica (CLA). Para tanto, é necessário produzir um escoamento com intensidade de turbulência e camada limite proporcionais às mensuradas em campo aberto, dentro do túnel de vento. Além disso, a seção de testes é considerada curta, de 1,0 m de comprimento, tornando o controle da altura da camada limite mais restritivo.

Vários estudos já foram realizados (alguns mais recentes estão descritos nos tópicos seguintes) demonstrando as diferentes técnicas para simular o desenvolvimento e o controle da CLA em diferentes tipos de terrenos com túneis de vento de diferentes tamanhos e modelos. Destaca-se o trabalho de Cardoso (2020), realizado dentro do contexto do mesmo projeto de pesquisa e desenvolvimento, onde foram desenvolvidas em dois túneis de vento adquiridos por Furnas e ainda necessitam de continuidade, dada a importância do assunto.

No presente trabalho propõem-se utilizar o aparato experimental denominado “placa de camada limite”, o qual é constituído de uma placa plana, com rugosidade diferenciada e um mecanismo similar a um flape aeronáutico posicionado no seu bordo de fuga que, quando acionado, modifica a altura da camada limite produzida sobre a placa. Utilizando o planejamento fatorial, ANOVA e outras ferramentas estatísticas determina-se quais ângulos de flape alteram significativamente a altura da camada limite dentro da seção de testes do túnel de vento de circuito aberto.

## **1.2. Justificativa**

O setor elétrico brasileiro está em permanente evolução, fruto do avanço tecnológico, com conseqüente expansão acentuada do consumo de energia elétrica, agravando a disponibilidade dos recursos utilizados para a produção da mesma, além de ampliar o problema da crise ambiental. Uma das maneiras utilizadas no mundo para atender a expansão do consumo sem comprometer qualidade de vida e desenvolvimento econômico tem sido o investimento em energias limpas, como a energia eólica.

Dentro desse contexto, Furnas Centrais Elétricas S.A. está investindo em pesquisa e desenvolvimento no segmento de energias alternativas, com destaque para os sistemas eólicos. A empresa vem acompanhando tecnicamente os estudos na área de energia eólica desde 2008, sendo imprescindível explorar e desenvolver mais pesquisas seja em campo,

ou pela Dinâmica dos Fluidos Computacional e Experimental, de forma que ao final, obtenha-se modelos calibrados, robustos e preditivos, capazes de subsidiar tecnicamente instâncias decisórias das empresas de geração de energia elétrica com informações estratégicas e contextualizadas.

### **1.3. Objetivos**

No presente trabalho tem-se como objetivos globais, desenvolver um método experimental para:

- simular camadas limite atmosféricas utilizando túnel de vento com seção de testes de tamanho reduzido;
- estimar o potencial eólico de uma dada superfície.

Como objetivos específicos propõem-se:

- verificar se, com o túnel de vento e instrumentação disponíveis, é possível realizar simulações de camada limite;
- realizar simulações em túnel de vento utilizando placa plana de camada limite verificando se a camada limite sofre variação significativa ao combinar diferentes ângulos de flape da mesma e diferentes velocidades;
- desenvolver um modelo em que seja possível simular a camada limite em túnel de vento para a obtenção de potencial eólico utilizando placa plana de camada limite a partir de diferentes ângulos de flape da mesma.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Energia Eólica**

No princípio do segundo milênio, fontes energéticas como o vento, a água e a lenha dominavam a produção de calor e de força motriz (CASTRO, 2009). Como exemplos pode-se citar o beneficiamento de grãos e o bombeamento d'água, além de outras tecnologias como a tração animal e a navegação. Em épocas mais recentes, as novas fontes – o carvão, o petróleo, o gás e a nuclear – substituíram estas fontes tradicionais, em particular nos países que se foram industrializando. Castro (2009) adiciona que o ressurgimento das energias renováveis deu-se a partir das crises

petrolíferas da década de 70. Por um lado, a necessidade de assegurar a diversidade e segurança no fornecimento de energia e a obrigação de proteger o ambiente, cuja degradação é acentuada pelo uso de combustíveis fósseis, motivaram o renovado interesse pelas energias renováveis.

Vista como uma das mais promissoras fontes de energia renováveis (ANEEL, 2021), a energia eólica é caracterizada por uma tecnologia madura podendo ser vista em países como EUA, por exemplo. Castro (2009) acrescenta ainda que as turbinas eólicas, isoladas ou em pequenos grupos de quatro ou cinco, e, cada vez mais, em parques eólicos com quarenta e cinquenta unidades, são um elemento habitual da paisagem de países europeus, como Alemanha, Dinamarca, Holanda, Reino Unido e Espanha desde a década de 80.

A energia eólica pode ser definida como um tipo de energia renovável, obtida através da coleta e uso da energia cinética do vento, que é convertida em energia mecânica, gerando, assim, eletricidade (VAICBERG, VALIATT, QUEIROZ, 2021). Para Ribeiro (2013), a energia dos ventos é a energia cinética contida nas massas de ar em movimento, que ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação, em energia cinética de rotação com o emprego de aerogeradores (ou turbinas eólicas), para a geração de energia elétrica, sendo o principal componente dessa transformação.

A ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica, destaca alguns dos benefícios da energia eólica tais como:

- É renovável e contribui para que o Brasil cumpra seus objetivos no Acordo do Clima;
- Parques eólicos em funcionamento não emitem CO<sub>2</sub>;
- Gera renda e melhoria de vida para proprietários de terra com arrendamento para colocação das torres;
- Permite que o proprietário da terra siga com plantações ou criação de animais;
- Um dos melhores custos na tarifa de energia;
- Capacitação de mão de obra local;
- Contribui para o aumento do PIB e o IDHM.

Apesar das inúmeras vantagens, pode-se destacar também algumas desvantagens, tais como:

- O regime dos ventos é intermitente;
- Os parques eólicos podem mudar a paisagem da região onde são instalados, causando impactos ambientais;
- O impacto sonoro, causando incômodo à comunidade local;
- As aves que passam pelo local podem sofrer com o choque nas pás.

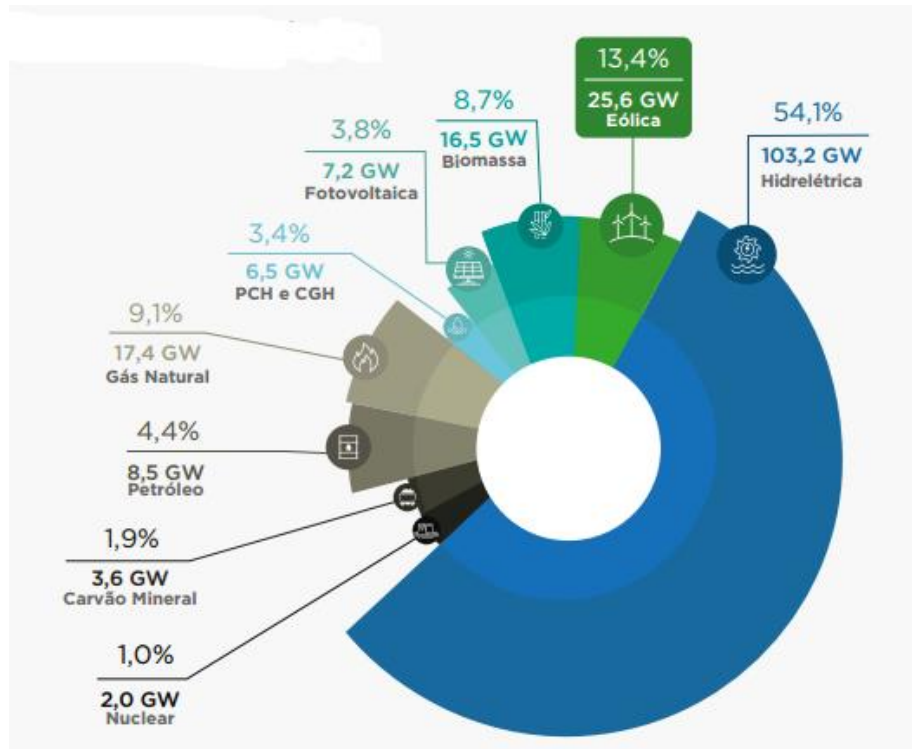
Apesar das desvantagens citadas acima, a energia eólica deixa seu rastro ecológico, de carbono e hídrico, menores comparada com outras fontes de energia. Dessa forma, verifica-se o crescimento da taxa de potência eólica instalada a nível mundial, de acordo com dados do Global Wind Energy Council – GWEC (2021), a indústria eólica global alcançou recorde de 93 GW de nova capacidade em 2020. O crescimento recorde foi impulsionado por uma onda de instalações na China e nos Estados Unidos – os dois maiores mercados de energia eólica do mundo – que, juntos, instalaram quase 75% dos novos parques em 2020 e respondem por mais da metade da energia eólica total do mundo.

O investimento em estudos e construção de parques eólicos no Brasil também obteve aumento significativo de novas instalações em 2022. Esse fato está vinculado a projetos em desenvolvimento por meio de PPAs privados (Power Purchase Agreement - acordo ou contrato de compra e venda de energia de longo prazo), que estão aumentando rapidamente no país devido aos preços muito competitivos da energia eólica, enquanto os leilões do governo desaceleraram nos últimos anos. De acordo com os últimos dados da ABEEólica, essa energia ocupa o segundo lugar na matriz elétrica brasileira, com cerca de 13,4% de participação, como observado na Figura 1 (ABEEólica, 2023).

De acordo com o Boletim Anual de Geração Eólica, o ano de 2022 terminou com 904 parques eólicos instalados e 25,63 GW de potência eólica instalada no país (ABEEólica, 2023) com uma previsão de 34,7 GW para o ano de 2026 (ABEEólica, 2022), como apresentado na Figura 2.

Contudo, em 2022, assim como em 2021, o Brasil foi o terceiro país que mais instalou usinas eólicas, ficando apenas atrás da China e dos Estados Unidos (GWEC, 2022). Desta forma, os estudos na área se tornam urgentes e necessários visto o grande crescimento do setor no país.

Figura 1. Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: ANEEL, 2023 - ABEEólica, 2023

Figura 2. Evolução da Capacidade Eólica no Brasil



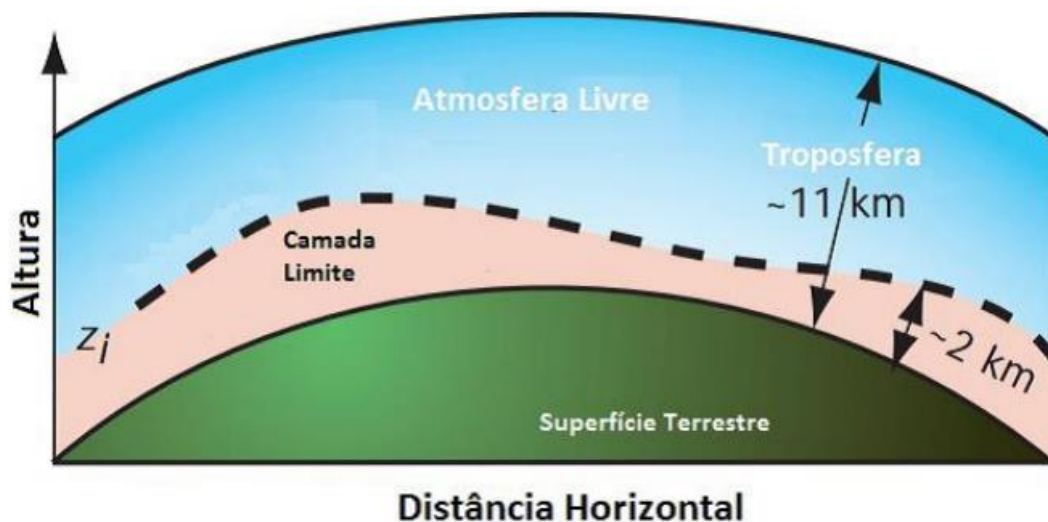
Fonte: ABEEólica, 2022

## 2.2. Camada Limite Atmosférica (CLA)

Um dos grandes avanços na Mecânica dos Fluidos ocorreu em 1904 e foi realizado a partir dos trabalhos do físico alemão Ludwig Prandl (1875-1953). Ele concebeu a ideia da camada limite, sendo uma região muito fina e adjacente à superfície do corpo onde os efeitos viscosos são muito importantes (FOX et al., 2014). Sendo que, fora da camada limite, o escoamento se comporta como se fosse de um fluido invíscido.

Na movimentação de massas de ar terrestre a região que ocorre os fenômenos meteorológicos é a troposfera, que é subdividida em atmosfera livre e camada limite. A camada limite é a que recebe a maior influência da superfície terrestre e recebe o nome de Camada Limite Atmosférica (STULL, 1988). Na Figura 3, pode-se observar essa subdivisão.

Figura 3. Subdivisão da Troposfera



Fonte: MARQUES (2017)

Conhecida também como camada limite planetária, a CLA pode ser definida como uma camada adjacente à superfície da terra em que o escoamento apresenta um elevado número de Reynolds, onde a turbulência gera transporte de energia, massa e quantidade de movimento entre a superfície e a atmosfera (MOREIRA, 2007). Já para Fontella (2014), a CLA é uma camada de ar que cobre a terra na qual o escoamento de ar é influenciado pela viscosidade. A mesma autora afirma ainda que as camadas de ar que sentem os efeitos da viscosidade junto à superfície do corpo sólido com o qual interagem, vão sendo desaceleradas, tendo velocidade relativa à superfície de contato nula no ponto de contato com a superfície e aumentando à medida que a distância da superfície aumenta, até o ponto em que uma molécula de ar, mais afastada, não sofre mais a interação das

moléculas de ar vizinhas que estão sendo desaceleradas pelas demais em função da viscosidade.

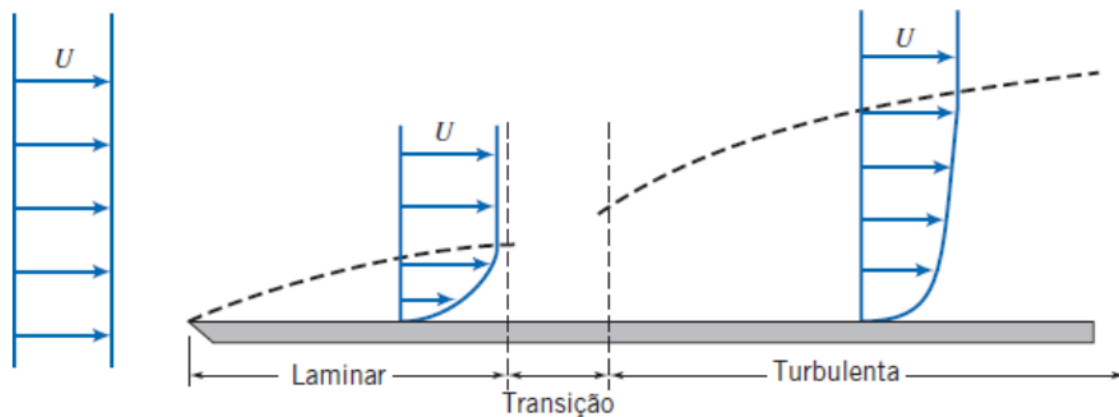
Scotton (2020) complementa afirmando que as massas de ar, ao se aproximarem da superfície terrestre, têm suas propriedades físicas modificadas, bem como a sua velocidade. Deste modo, a região da atmosfera que influencia nestas massas é designada de troposfera, a qual pode variar entre uma altitude de 100 m a 11000 m acima do solo. Entre estes limites, mais precisamente entre 100 m e, até, 3000 m, os processos de transporte são modificados e, assim, é originada a CLA.

De acordo com Mattuella (2012), é na CLA que são encontrados um dos maiores gradientes de velocidade, temperatura e umidade do ar que ocorrem na atmosfera. Nessa região, concentra-se a maior parte da atividade humana, estando diretamente influenciada por estruturas globais e locais. O conhecimento detalhado das características dos escoamentos sobre e no entorno de elevações situadas dentro da CLA é de grande interesse em muitas aplicações, especialmente àquelas ligadas à Engenharia do Vento, além de interessar também meteorologistas, engenheiros, ambientalistas, militares, esportistas, dentre outros. Como exemplos, podem-se citar estudos relacionados a identificação de cargas em edificações, pontes e linhas de transmissão, efeitos destrutivos em estruturas devido à ação do vento, estudos de dispersão de poluentes, estudos agro meteorológicos, segurança da aviação além de aplicações em prospecção de energia eólica e posicionamento de turbinas (MOREIRA, 2007; MATTUELLA, 2012).

Na metodologia do presente trabalho é adotada diretamente a teoria da camada limite que se aproxima da teoria da camada limite atmosférica, onde, como hipótese, é desprezado o gradiente de temperatura. De acordo com Scotton (2020), a camada limite é subdividida em três regiões: laminar, transição e turbulenta, conforme pode ser visualizado na Figura 4.

Na camada limite laminar, o escoamento é permanente e não há formação de recirculações. Na região de transição, por sua vez, o escoamento é mais instável - para um mesmo ponto de medição, a velocidade e a pressão não são constantes no tempo. Por fim, na região turbulenta, há grandes flutuações de velocidade e pressão. Para Blessmann (1982), a região turbulenta da camada limite é a mais importante para aplicação da Engenharia do Vento, pois grande parte das superfícies estão expostas a este tipo de escoamento e é, nesta região, que acontece a separação do escoamento.

Figura 4. Subdivisão da CLA



Fonte: FOX et al. (2014)

Mattuella et al. (2016) explicam que a avaliação do potencial eólico de uma região requer trabalhos sistemáticos de coleta e análise de dados sobre a velocidade e o regime de ventos. As análises mais importantes em um parque eólico baseiam-se no conhecimento da potência do vento. Caso essa etapa não seja realizada corretamente, além do investimento tornar-se inviável do ponto de vista econômico e financeiro, pode colaborar para erros na previsão da geração de energia. Desta forma, para avaliação do potencial eólico, pode-se utilizar as coletas de campo ou recorrer a Dinâmica dos Fluidos Computacional ou Experimental.

A análise experimental consiste na utilização de túneis de vento em que se faz a simulação da CLA, coletando dados de velocidade e intensidade turbulenta. Essa simulação pode ser feita de diversas formas. De acordo com Barbosa et al. (2002), várias técnicas têm sido usadas para aumentar artificialmente a camada limite. Exemplos típicos são o uso de cercas, grades uniformes, grades graduadas ou cisalhadas, jatos, pulsação, rugosidade da parede, degraus, telas, geradores de vórtices e estratificação térmica.

Para Pires et al. (2013), os métodos de simulação da CLA em túneis de vento podem ser divididos em tipos passivos e ativos. Os métodos passivos utilizam barreiras como grades, placas planas, placas triangulares, blocos de escrever, pináculos, tapetes, etc. Os métodos ativos são aqueles que utilizam jatos de ar para formar uma parede de fluido.

As alterações na superfície do terreno, tais como rugosidade e temperatura afetam diretamente o comportamento da CLA. Esta influência gera fluxos de calor (latente e sensível) que interagem com a parte baixa da troposfera, gerando assim processos

turbulentos que exercem diversas alterações sobre a dinâmica da CLA. A integração entre os fenômenos térmicos e dinâmicos é responsável pelo movimento e transferências de energia na direção vertical. A espessura da CLA varia significativamente em função do tempo e do espaço, podendo chegar de alguns metros a quilômetros. A variação em sua espessura está relacionada à variação de temperatura durante o dia. A variação de temperatura apresentada pela CLA é pouco influenciada pela radiação direta do Sol, pois pouco desta energia é absorvida pelo ar. No entanto, a radiação do solo é a maior responsável pelo aquecimento do ar na CLA. Em geral, dias mais quentes geram atividades mais intensas de turbulência, devido aos seus efeitos convectivos, uma vez que as massas de ar quente tendem a subir, tomando o lugar de massas mais frias. A variação da emissividade do solo é a principal responsável pelos fenômenos de transporte na CLA, sendo a turbulência um dos mais importantes processos de transporte usados para definir a CLA (MOREIRA, 2007).

Moreira (2007) acrescenta ainda que a natureza turbulenta na CLA é uma das características mais importantes. Essa turbulência, por um lado, difere do simulado dentro de um túnel de vento devido à coexistência de efeitos térmicos e cisalhantes no vento que interagem com os escoamentos médios, podendo ser afetada pela rotação da Terra. Porém, por outro lado, sua estrutura apresenta muita semelhança com as geradas em um túnel de vento. Ambas têm duas regiões distintas, uma interna e outra externa. A camada interna depende principalmente das características da superfície e não da rotação como é o caso para a camada exterior. A transição entre as camadas é caracterizada por uma sobreposição entre as regiões. Portanto, o conceito de CLA ajuda a explicar a variação da velocidade e da direção do escoamento de ar em função da altura em relação ao solo e da rugosidade desta superfície.

### **2.3. Dinâmica dos Fluidos**

A Mecânica dos Fluidos é área de estudos de fluidos em repouso ou em movimento. Ela permitiu o desenvolvimento de muitos campos instigantes no último quarto de século. Alguns exemplos incluem questões sobre meio ambiente e energia - por exemplo, contenção de derramamento de óleos, turbinas e usinas eólicas de grandes dimensões, geração de energia a partir de ondas do oceano, aspectos aerodinâmicos de

grandes edificações, mecânica dos fluidos da atmosfera e dos oceanos e de fenômenos atmosféricos como tornados, furacões e tsunamis (FOX et al., 2014).

De acordo com Filho e Silva (2020), muitos dos fenômenos produzidos pela interação fluido-estrutura não possuem uma descrição teórica simples, de tal forma que permita aos engenheiros utilizá-las de maneira prática no cotidiano industrial. Dentre os principais fenômenos está a turbulência, que é responsável por uma contribuição nos processos de difusão de energia, de quantidade de movimento e de massa. Devido à importância de se entender processos que apresentam alta complexidade matemática, a dinâmica dos fluidos engloba tanto a área computacional como a área experimental.

A dinâmica de fluidos computacional (DFC) utiliza métodos numéricos para simulação de fenômenos que envolvem os escoamentos de fluidos com ou sem troca de calor. A solução numérica da equação de Navier-Stokes permite obter distribuições de velocidade, pressão e temperatura na região de escoamento (COSTA e RIBEIRO, 2010). Já a parte experimental engloba os testes em túneis de vento de escoamentos sobre objetos, com ou sem transferência de calor e escoamentos que geram camada limite atmosférica com o auxílio de equipamentos de medição como, por exemplo, o anemômetro de fio quente.

Para Barbosa et al. (2002), a simulação de escoamentos atmosféricos em túneis de vento é particularmente útil para investigar os efeitos da turbulência gerada na camada superficial e da topografia e fluxo de calor não uniforme da parede na estrutura do escoamento, incluindo os processos de transporte turbulento. Obviamente, as faixas de operação do túnel de vento dependem das dimensões do próprio túnel, das dimensões de qualquer ambiente simulado, da velocidade do escoamento e das propriedades de turbulência e das características da instrumentação de medição.

Nas seções subsequentes são apresentados mais detalhes sobre o túnel de vento e os dois instrumentos de medição mais utilizados nos experimentos: anemômetro de fio quente e tubo de Pitot. Este último, por sua vez, será utilizado no presente trabalho.

### **2.3.1. Túnel de Vento**

Desde o ano de 1930, quando o efeito da turbulência existente numa corrente de ar livre se tornou evidente, passou-se a dar ênfase na construção de túneis de vento com

seção de testes providas de baixos níveis de turbulência e agitação do escoamento, passando a serem utilizados em outras áreas da engenharia, não só da aerodinâmica (BARBOSA, 2008). Assim, a prática de experimentação em túneis de vento e hidrodinâmicos tem aumentado e continua sendo a base no desenvolvimento de vários veículos e dispositivos que realizam suas funções sob as forças impostas pelo vento ou escoamento de água (BARLOW, et al., 1999).

Túneis de vento podem ser definidos como ferramentas utilizadas para tratar de projetos que envolvam o escoamento de ar em torno de objetos e as forças originadas desta interação ar-objeto em diversas aplicações (NÚÑEZ et al., 2012). Para tanto, o escoamento produzido na entrada da seção de testes deve ter um baixo nível de turbulência, mesmo em altas velocidades.

De acordo com Roballo (2009), o túnel de vento tem-se mostrado de grande utilidade em estudos de micro meteorologia, tendo como vantagens a facilidade de controlar a realização de medidas através de análises de sensibilidade, bem como custos de realização menores. Cardoso (2020) acrescenta ainda que a utilização do túnel de vento é vantajosa para pesquisa, pois além de reproduzir quase toda a complexidade do escoamento real de um fluido, fornece dados aerodinâmicos confiáveis para subsidiar as decisões de projeto, e isso a um baixo custo, se comparado a ensaios em escala 1:1.

Os experimentos em túneis de vento vêm sendo aplicados em diferentes áreas do conhecimento, tais como o desenvolvimento de projetos aeronáuticos e automobilísticos, dimensionamento de estruturas civis e arquitetônicas, esportes, projetos que envolvem o campo da energia eólica, dentre outras. As Figuras 5 e 6 apresentam alguns exemplos dessas aplicações.

Através do emprego de túneis de vento é possível medir velocidades globais e localizadas, bem como o campo de pressões na superfície dos objetos (NÚÑEZ, 2021). Núñez (2021) acrescenta que as partes constituintes de um túnel de vento são especificamente projetadas de tal forma que, na seção de testes, o escoamento tenha velocidades médias invariáveis e baixo índice de turbulência (flutuações da velocidade em torno da média). Dentre a grande variedade de túneis de vento existentes, os de baixa velocidade podem ser considerados aqueles que possuem uso mais genérico. Os equipamentos com seções transversais reduzidas são frequentemente utilizados para pesquisas mais específicas e para fins acadêmicos (BARLOW et al., 1999).

Figura 5. Exemplos de aplicação do túnel de vento: Automobilística (a), Engenharia Civil (b), Aeronáutica (c) e (d).



Fonte: FREDERIKSEN (2022).

Figura 6. Exemplo de aplicação de experimento em túnel de vento para estudo de terreno complexo

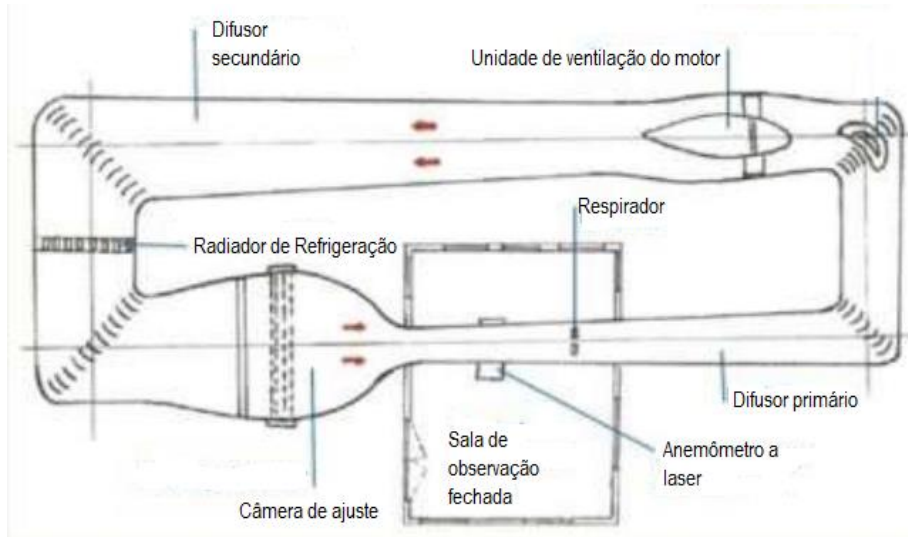


Fonte: MATTUELLA et al. (2016)

De acordo com Roballo (2009), os túneis de vento são formados por ventiladores, tubos para a circulação do ar, corredores para o escoamento e uma área reservada para os ensaios, equipada com uma balança, cujos sensores estão conectados a computadores. Podem ser de dois tipos: circuito fechado (Figura 7) - escoamento circulando em tubos

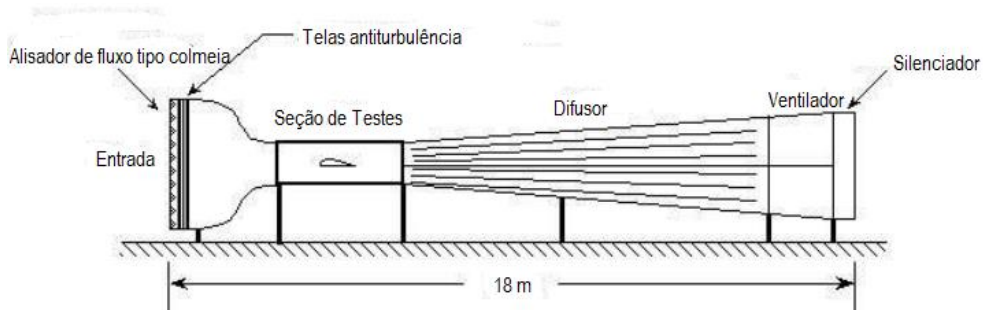
em forma de anel; ou aberto (Figura 8) - escoamento absorvido em um extremo e descarregado em outro.

Figura 7. Esquema de um túnel de vento de circuito fechado



Fonte: BARLOW (1984) – adaptado pelo próprio autor

Figura 8. Esquema de um túnel de vento de circuito aberto



Fonte: BARLOW (1984) – adaptado pelo próprio autor

Barlow et al. (1999) destacam as vantagens de um túnel de circuito aberto, tais como:

- o custo de construção normalmente é muito menor;
- se alguém pretende operar motores de combustão interna ou fazer visualização de fluxo extensivo via fumaça, não há problema de purga, desde que tanto a entrada quanto a exaustão estejam abertos para a atmosfera.

E como desvantagens tem-se:

- se localizado em uma sala, dependendo do tamanho do túnel para o tamanho da sala, pode exigir uma triagem extensiva na entrada para obter um escoamento de alta qualidade;
- se a entrada e/ou exaustão estiver aberta para a atmosfera, quando houver a ocorrência de vento ou tempo frio, pode afetar a operação;
- dependendo do tamanho e velocidade, o túnel exigirá mais energia para funcionar; podem ocorrer ruídos.

Já para o túnel de vento de circuito fechado, Barlow (1999) destaca as seguintes vantagens:

- com uso de palhetas e telas giratórias, a qualidade do fluxo pode ser bem controlada e independente de outras atividades e condições climáticas;
- necessita de menos energia dependendo do tamanho e velocidade da seção de testes;
- há menos ruído durante a operação.

E como desvantagens tem-se:

- o custo inicial é maior devido aos dutos de retorno e palhetas de canto;
- se usado extensivamente para experimentos de visualização de escoamento com fumaça ou execução de motores de combustão interna, deve haver uma maneira de retirar a fumaça e os gases do túnel;
- se o túnel tiver alta utilização, pode ser necessário ter um trocador de calor para manter a temperatura do ar - ou algum outro método de resfriamento.

O design de um túnel de vento está ligado ao objetivo final da pesquisa, o capital de investimento e o espaço disponível para a estrutura.

### **2.3.2. Tubo de Pitot**

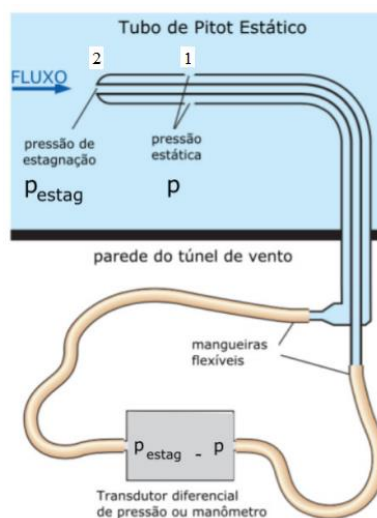
O tubo de Pitot pode ser definido como um mecanismo capaz de medir a velocidade relativa entre o fluido e o medidor. De acordo com Silveira e Possamai (2020), é um instrumento de medição de pressões utilizado para medir velocidades de fluidos em movimento. Ele surgiu da necessidade de medir a velocidade da água do rio Sena. Desta forma, em 1732, Henri Pitot, engenheiro francês especializado em hidráulica, apresentou como solução um instrumento que ficou conhecido como tubo de Pitot. Este era bastante

rudimentar, composto basicamente de um tubo de vidro curvado em um ângulo reto cuja parte vertical era mantida fora d'água, enquanto a horizontal, provido de uma geometria em forma de funil, era colocada dentro da corrente d'água (DELMÉE, 2003).

Com o avanço da tecnologia, esse instrumento passou por várias mudanças com intuito de aumentar as condições e faixas de aplicações e com o máximo de exatidão. Desta forma, a pitometria alcançou aplicações, como medições de correntes de líquidos ou gases, em tubos fechados ou escoamentos externos, em áreas da tecnologia, como na hidráulica, aeronáutica e na indústria de petróleo e gás (DELMÉE, 2003). Silveira e Possamai (2020) acrescentam que ele também é utilizado nos modelos físicos em laboratórios de aerodinâmica e também hidrologia para a medição indireta de vazões em canais e rios, em redes de abastecimento de água, em adutoras, em oleodutos e ainda a velocidade dos aviões, medindo a velocidade de escoamento do ar.

É de fundamental importância para o estudo do escoamento em regiões de interesse a determinação da velocidade de um fluido. Para isso, existem diversos métodos que possibilitam fazer essa medição, entretanto, o que utiliza a diferença entre pressão total e pressão estática é o mais utilizado (ANDERSON, 2001). A pressão estática é a pressão real ou termodinâmica que atua no fluido. Já a pressão dinâmica é a pressão medida devido à energia cinética do fluido em escoamento. A pressão de estagnação, também conhecida como pressão total (quando desconsiderada a força gravitacional), é a soma da pressão estática com a pressão dinâmica (SILVEIRA e POSSAMAI, 2020). Na Figura 9 é mostrado como são feitas as medidas de pressão estática, total e dinâmica.

Figura 9. Pontos de pressão de estagnação e estática no Tubo de Pitot.



Fonte: Çengel e Cimbala (2011)

A pressão estática pode ser medida quando o sensor estiver posicionado de forma perpendicular ao sentido do escoamento, desta forma não é medida a parcela da pressão dinâmica. Para que a pressão estática possa ser medida deve ser feito um furo na parede do tubo (ponto 1), e para a obtenção de um valor médio da pressão estática em um determinado ponto, pode ser usada mais de uma tomada de pressão ao longo da seção (BENEDICT, 1984).

A equação que governa o princípio físico por trás do Tubo de Pitot é a Equação de Bernoulli (Equação 2.1). Com ela é possível relacionar a variação de velocidade e pressões ao longo de um tubo de corrente.

$$\frac{P_2}{\rho g} = \frac{P_e}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \quad (2.1)$$

onde  $P_e$  é a pressão estática,  $V$  é a velocidade do escoamento,  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $g$  é a gravidade e os pontos 1 e 2 da Figura 9 representam a entrada e a saída do tubo de Pitot, respectivamente. Com a equação de Bernoulli, é possível encontrar a pressão total ( $P_{total}$ ) do escoamento, assumindo que o fluido está completamente parado no ponto 2 da Figura 9, como mostrado na Equação 2.2.

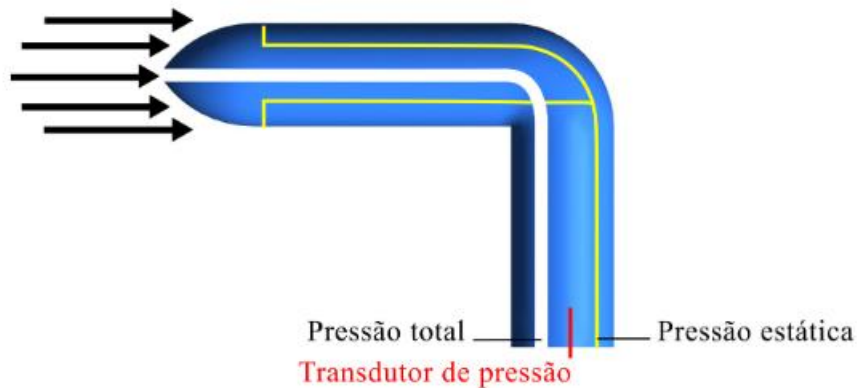
$$P_2 = P_{total} = P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 \quad (2.2)$$

A partir da Equação 2.2 e relacionando as pressões com a diferença de altura medida no manômetro e da massa específica do fluido manométrico, pode-se encontrar a velocidade do escoamento.

Manoukian et al. (2021) acrescenta que o tubo de Pitot funciona a partir de um transdutor de pressão ou um manômetro, que é responsável por medir a diferença entre a pressão de duas câmaras separadas: uma que é ligada aos orifícios presentes na parte exterior lateral do tubo e outra que provém do furo central do tubo. Para que o equipamento possa exercer suas funções, o tubo de Pitot deve estar montado com furo central alinhado com o escoamento (ÇENGEL, 2007), como representado esquematicamente na Figura 10.

A partir do furo central, que recebe o impacto do escoamento e mede a pressão do fluido somada a uma parcela de pressão relacionada à desaceleração do escoamento, é possível mensurar a pressão total e, por meio dos orifícios na lateral do seu corpo, obtém-se a pressão estática (MANOUKIAN et al., 2021).

Figura 10. Esquema da posição correta do tubo de Pitot na medição do escoamento



Fonte: MANOUKIAN et al., (2021)

### 2.3.3. Anemômetro de Fio Quente

O anemômetro de fio quente é o instrumento mais utilizado em túneis de vento para as medições das características das flutuações do vento. Estas características são de grande importância já que para simular a camada limite em um túnel de vento é necessário desenvolver um modelo físico do escoamento turbulento atmosférico de maneira que os parâmetros que caracterizam podem ser reproduzidos mais fielmente possível dentro do túnel (RODRÍGUEZ et al., 2014).

De acordo com Gandolfi (2020), o anemômetro é um dispositivo utilizado para medir a velocidade do escoamento de ar na atmosfera, em túneis de vento e em outras aplicações. O autor completa que, especificamente para o anemômetro de fio quente, este tem como princípio o fato de uma corrente de ar resfriar um objeto aquecido, em que a taxa do resfriamento é determinada pela velocidade do escoamento de ar. Já para Roballo et al. (2009), o anemômetro de fio quente consiste, basicamente, de um filamento aquecido que fica exposto ao escoamento de um fluido. Este filamento fica conectado a um circuito eletrônico que é capaz de monitorar sua variação de resistência elétrica estabelecendo, desta forma, uma relação de pertinência entre a velocidade do escoamento e a resistência observada no filamento aquecido. Para medição de velocidade, os números de fios geralmente correspondem às componentes do vetor velocidade que o sensor é capaz de medir.

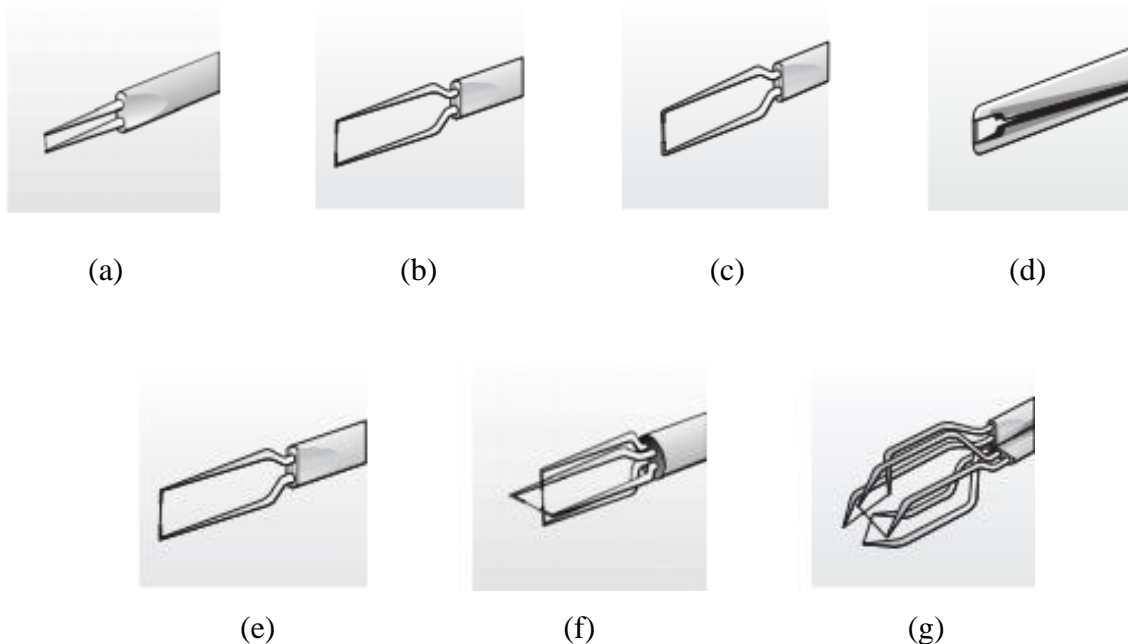
Para Filho e Silva (2020), os anemômetros de fio quente são dispositivos de alta precisão utilizados para medição de velocidade e temperatura em escoamentos de fluidos diversos. O autor descreve ainda que os sistemas de anemometria a fio quente funcionam,

em suma, através da transferência de calor por condução e convecção. Um elemento cilíndrico aquecido é exposto ao escoamento de um fluido, esse elemento funciona como um sensor que capta variações nas propriedades do escoamento, como velocidade e temperatura. Estas variações podem ser expressas, por exemplo, como variações de corrente elétrica (anemômetro de temperatura constante) ou variações de temperatura (anemômetro de corrente constante).

A anemometria de fio quente constitui um método de investigação pouco intrusivo devido às pequenas dimensões do elemento sensível. Essas pequenas dimensões, combinadas a um circuito eletrônico de controle, fazem com que esta técnica forneça elevadas frequências de resposta, podendo atingir a ordem de centenas de milhares de  $Hz$  (ROBALLO et al., 2009).

Na Figura 11 nas imagens (a) até (d) são apresentados alguns exemplos de sondas dos anemômetros. Os fios geralmente possuem tamanhos de  $5\mu m$  de diâmetro e 1,2 m de comprimento suspenso entre dois pinos em forma de agulha, podendo ser com fios banhados a ouro, níquel, quartzo, entre outros. Já nas imagens (e) até (g) da Figura 11 são mostradas as sondas que medem até as três diferentes componentes de velocidade nas versões unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais como simples, dupla e sondas de sensor triplo referentes ao número de direções.

Figura 11. Exemplos de tipos de sondas dos anemômetros



Fonte: JORSENSEN (2005)

Na Figura 12 pode-se verificar um anemômetro de fio quente real.

Figura 12. Exemplo de um anemômetro de fio quente



Fonte: Próprio Autor

Jorgensen (2005) destaca algumas vantagens do anemômetro de fio quente sobre outros equipamentos de medição:

- são de fácil utilização;
- a saída é uma tensão analógica, o que significa que nenhuma informação é perdida;
- possui a resolução temporal muito alta, o que o torna ideal para medição de espectros de sinais;
- é mais acessível que outros sistemas, como por exemplo o PIV (Velocimetria por imagem de partículas).

O desenvolvimento e aperfeiçoamento das técnicas de controle e dos componentes que compõem os anemômetros permitiram que este se tornasse um equipamento amplamente utilizado para estudos sobre turbulência.

No próximo tópico do presente trabalho serão apresentados diversos estudos que utilizaram túnel de vento experimental em suas respectivas pesquisas.

## **2.4. Camada Limite - Análise Experimental em Túnel de Vento**

Neste tópico será abordado, de forma sucinta, os principais trabalhos relacionados a experimentos em túnel de vento de camada limite atmosférica. A pesquisa foi feita utilizando o Portal de Periódicos da CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. As palavras-chaves empregadas na pesquisa tiveram a

finalidade de obter o máximo de artigos possíveis dentro do tema, sendo elas “boundary layer”, “wind energy” e “wind tunnel”, no intervalo de tempo entre 2013 até 2022. Objetiva-se com essa revisão apontar as variáveis de investigação e pesquisa que fazem parte do estudo de desenvolvimento e controle da camada limite experimental em diferentes terrenos no campo da energia eólica, verificando assim quais os métodos e técnicas mais utilizados nos últimos estudos em túnel de vento e para quais tipos de terrenos os estudos estão em evidência.

Os resumos dos sete artigos selecionados estão disponíveis no Apêndice 1 em ordem cronológica. Na Tabela 1, estão apresentadas as principais características dos artigos, enfatizando em qual tipo de terreno estão se concentrando os estudos, quais os instrumentos de medição os pesquisadores estão utilizando, quais os tipos de túnel de vento vem sendo feitos os experimentos e quais técnicas os autores estão aderindo para simular a camada limite atmosférica.

Tabela 1. Características principais de diferentes estudos selecionados

<b>Autores/Ano</b>	<b>Outros Métodos utilizados</b>	<b>Terreno</b>	<b>Medição</b>	<b>Túnel de Vento</b>	<b>Técnicas utilizadas CLA</b>
EFTHIMIOU et al., 2019	Campo / RANS-beta / TV	Acidentado	Anemômetro a laser Doppler	Escala: 1:225 / Vel; 4.75 - 6 m/s /	Não especifica quais
KAMADA et al., 2019	TV	Colina	PIV / Anemômetro de fio quente	Seção: 0.6 x 0.6 x 5 m / Vel máx: 35 m/s /	Grade de turbulência / hastes metálicas
Zheng et al., 2018	TV	Planaltos	PIV	Circuito fechado com 8 m de comprimento e seção de testes de 1,2 m x 0,9 m	Torres triangulares e blocos de madeira
DESMOND et al., 2017	CFD / TV	Floresta	Anemômetro a laser Doppler	TV EnFlo estratificado termicamente / Seção: 1.5 x 3.5 x 20 m / Escala: 1:300 / Vel:0.3 - 4.5 m/s	Painéis de aquecimento e resfriamento nos pisos e paredes / Tela de colmeia de tecido liso / espirais / ângulos metálicos
CONAN et al., 2016	LES / campo / TV	Colina	Anemômetro de fio quente e PIV (Velocimetria de Imagem de Partículas)	VKI-L2 / Seção: 0.35 x 0.35 x 2 m / Vel máx: 35 m/s / Escala: 1:500	Geradores de turbulência / cerca baixa / placas e blocos de lego
MATTUELLA et al., 2016	Campo / TV	Complexo (morro): plano / moderadamente áspero	Anemômetro de fio quente	TV Joaquim Blessmamm / Seção: 1.3 x 0.9 x 9.32 m / Vel máx: 42 m/s / Escala: 1:1000	Blocos de madeira / placas triangulares perfuradas
Pires et al., 2013	TV	Terreno rural	Anemômetro de fio quente	Subsônico e aberto/câmara de teste curta (465 mm x 1200 mm)	Espirais/ Torres/ Telas/ Tapetes

Fonte: Próprio Autor

Como pode-se observar, a maioria dos autores utiliza duas a três técnicas de estudo, buscando utilizar uma delas para validar os resultados encontrados. Em todos os trabalhos, o objeto de estudo foi terreno complexo e em praticamente todos utilizou-se o anemômetro de fio quente como instrumento de medição.

### **3. METODOLOGIA**

A metodologia apresentada neste trabalho é semelhante a implementada no trabalho de Cardoso (2020). Em seu estudo, foram utilizados diferentes diâmetros de tubos dentro da seção de testes do mesmo túnel de vento do presente trabalho, objetivando avaliar a mudança da camada limite além de estimar o potencial eólico para as diferentes situações.

Além desse trabalho, para a parte estatística, foram consultados autores como Montgomery (2013), Box et al. (2005) e Barros Neto et al. (2001). Na presente seção serão apresentados a descrição dos equipamentos utilizados, seguida de uma breve descrição do procedimento experimental. Em seguida será exposta a metodologia estatística utilizada.

#### **3.1. Descrição dos Equipamentos Utilizados**

##### **3.1.1. Túnel de Vento**

O Trabalho experimental será desenvolvido em túnel de vento – TV (Figura 13), que está localizado na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação no Campus Samambaia da Universidade Federal de Goiás - UFG. O mesmo foi adquirido por meio de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) pela empresa FURNAS S/A, dentre os quais inclui uma linha de estudo do comportamento de componentes de sistemas eólicos de transformação de energia elétrica, tendo como título “*Desenvolvimento de processos numéricos de alta ordem de convergência e experimentais de baixo custo para o estudo de escoamentos de ventos sobre terrenos – Estimativa do potencial eólico*” (Código: ANEEL – PD-00394-1906/2019).

Figura 13. Túnel de Vento - TV



Fonte: Próprio Autor

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

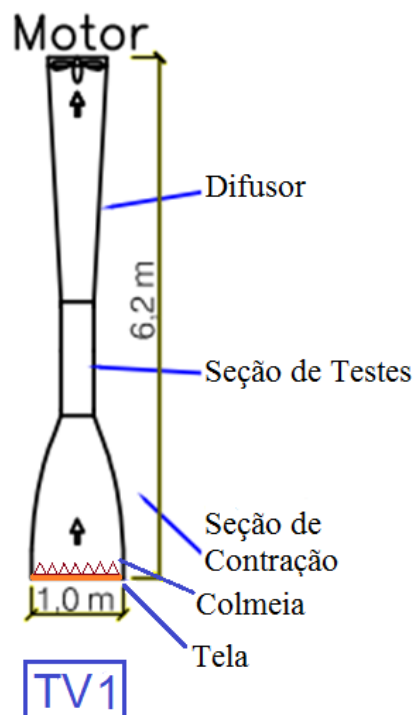
Tabela 2. Características do túnel de vento utilizado no experimento

<b>Característica</b>	<b>TV</b>
<b>Tipo de Circuito</b>	Aberto/Subsônico
<b>Seção de Testes</b>	Fechada (0,46 m x 0,46 m x 1,2 m)
<b>Tipo</b>	Sugador
<b>Comprimento</b>	6,2 m
<b>Seção de Entrada</b>	1,0 m x 1,0 m
<b>Seção de Contração</b>	4,7:1
<b>Chanfros</b>	presentes
<b>Comprimento do Difusor</b>	2,7 m
<b>Área do Difusor (Entrada)</b>	0,46 m x 0,46 m
<b>Diâmetro Seção do Difusor (Saída)</b>	0,85 m
<b>Quantidade de pás</b>	9
<b>Rotação máxima das pás</b>	1760 rpm
<b>Potência</b>	12,5 CV
<b>Velocidade nominal máxima</b>	37 m/s

Fonte: Próprio Autor

As partes do túnel de vento podem ser melhores observadas na Figura 14. A seção de entrada corresponde à primeira seção de contato com o ar, onde está localizada uma estrutura denominada de lábio de admissão, um conjunto de telas de proteção e de colmeias. As telas são utilizadas para reduzir a turbulência do escoamento, enquanto as colmeias são responsáveis por alinhar e direcionar o escoamento para a seção de contração. Após a saída da colmeia existe uma outra tela para minimizar a intensidade turbulenta. A seção de contração é responsável por acelerar o escoamento, até a seção de testes, sem permitir o desenvolvimento da camada limite. As seções de entrada, contração e de testes apresentam chanfros nos cantos, que minimizam a formação de recirculações secundárias nas quinas e mantém uniforme o escoamento dentro do túnel de vento. O difusor é o responsável por garantir a não interferência do escoamento de saída nos ensaios realizados na seção de testes e diminuir a potência exigida no ventilador.

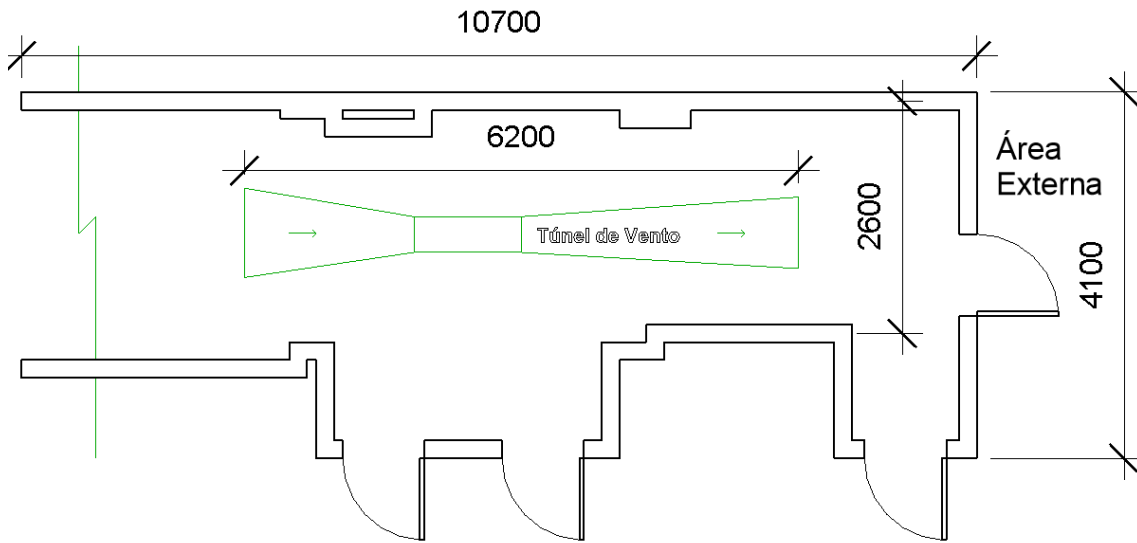
Figura 14. Desenho esquemático das partes do túnel de vento.



Fonte: CARDOSO (2020) com adaptações do Próprio Autor

O túnel de vento está atualmente posicionado no corredor na parte térrea do prédio da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação. Uma parte da planta baixa dessa localização pode ser observada na Figura 15.

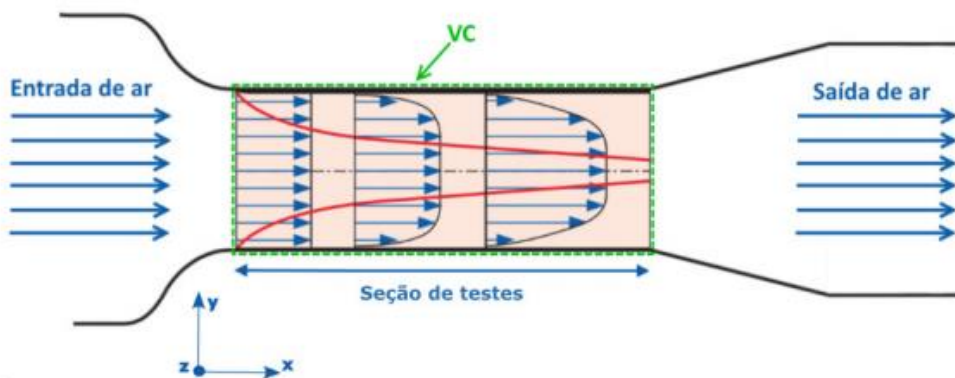
Figura 15. Planta Baixa da Localização do Túnel de Vento em milímetros.



Fonte: Próprio Autor

A região de estudos do presente trabalho se limita à seção de testes do túnel de vento. Tomando-se um volume de observação dentro do domínio de interesse, é definido o volume de controle (VC) como o volume ocupado pela seção de testes e suas paredes, ver Figura 16.

Figura 16. Seção de Testes do túnel de vento



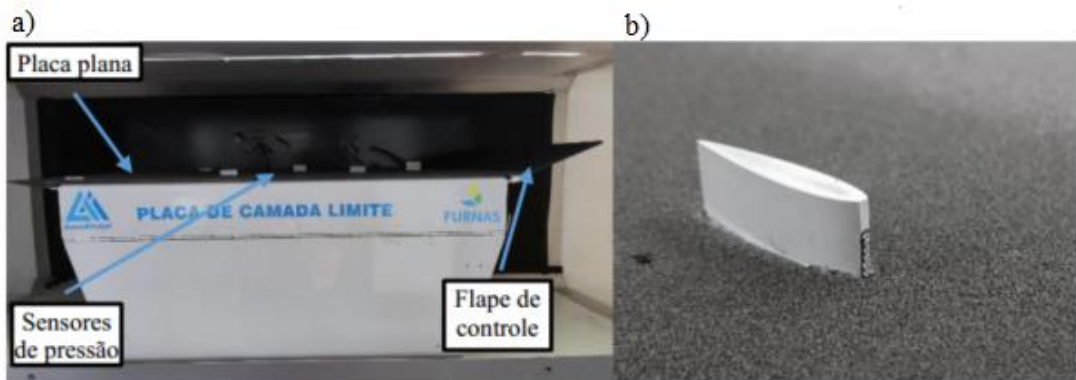
Fonte: CARDOSO (2020)

No caso dos túneis de vento, o VC é fixo, conforme apresentado na Figura 16 e possui fronteiras fixas e indeformáveis, no caso, o piso, o teto e as paredes laterais da seção de ensaios. Os planos  $yz$  na entrada e na saída da seção de ensaios permitem a entrada e a saída, respectivamente, do escoamento de ar e são chamados de superfícies de controle (SC).

### 3.1.2. Placa de Camada Limite

Na seção de testes foi inserido um aparato experimental denominado de placa plana de camada limite, como observa-se na Figura 17 (a). Esta placa tem sensores de medida de pressão total ( $P_{total}$ ) distribuídos ao longo do comprimento da placa e no bordo de fuga encontra-se um mecanismo do tipo flape - Figura 17 (b), o qual possibilita alterar o ângulo de ataque efetivo do escoamento sobre a placa.

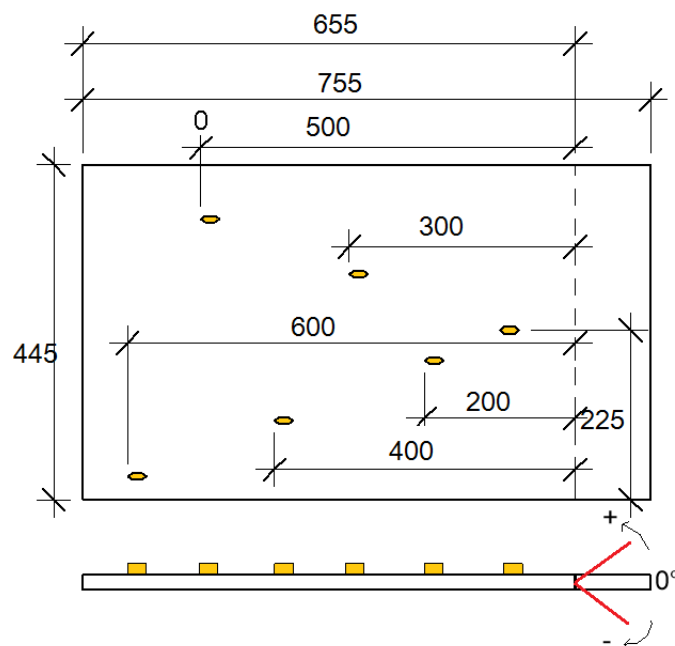
Figura 17. Placa plana para estudo de desenvolvimento de camada limite: posicionada no interior da seção de testes do túnel de vento (a), detalhe dos sensores de pressão (b).



Fonte: Próprio autor

O detalhamento dessa placa pode ser melhor observado na Figura 18:

Figura 18. Desenho esquemático da vista superior e lateral da placa plana de camada limite e seus sensores (medidas em milímetros)



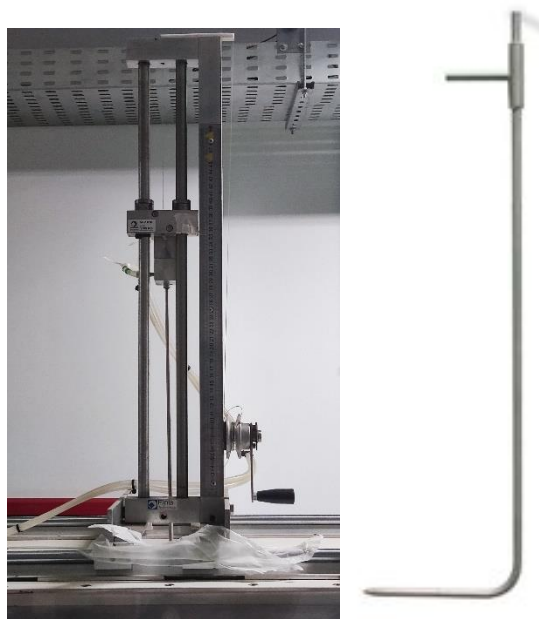
Fonte: Próprio autor

### 3.1.3. Tubo de Pitot, Módulo de Pressão, termohigrômetro e outros

No presente trabalho utiliza-se um tubo de Pitot fabricado por *AEROALCOOL Ensino e Pesquisa* (Figura 19), com a tomada de pressão total ( $P_{total}$ ) fechada e a tomada de pressão estática ( $P_e$ ) aberta, posicionado acima dos sensores de pressão. As duas saídas do tubo de Pitot são conectadas a um manômetro em "U", ou como é o caso do presente trabalho, diretamente a um módulo de pressão digital fabricado por *AEROALCOOL Ensino e Pesquisa* (Figura 20).

O tubo de Pitot estático utilizado no presente trabalho (Figura 19) possui comprimento de 660 mm e diâmetro externo da haste de 5,0 mm, diâmetro externo da ponta de 1,0 mm. Já o módulo de pressão citado acima (Figura 20) possui 32 canais e frequência máxima de aquisição de dados de 5,0 Hz (ou 200 ms).

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



Fonte: Próprio autor

Figura 20. Módulo de Pressão utilizado no experimento



Fonte: Próprio autor

Utilizando a equação de Bernoulli (Equação 3.1) sobre uma linha de corrente que atinge um furo do sensor da placa plana - Figura 17 (a).

$$\frac{P_{total}}{\rho g} = \frac{P_e}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \quad (3.1)$$

onde  $g$  é a gravidade, adotada como  $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ,  $\rho$  é a massa específica do ar, em  $\text{kg.m}^{-3}$ , obtida a partir da temperatura e umidade do ar providas de um termohigrômetro,  $V$  é a velocidade média do escoamento, em  $\text{m.s}^{-1}$ ,  $P_{total}$  é a pressão percebida pelo sensor de pressão da placa plana, em Pa e  $P_e$  é a pressão estática medida, em Pa, pelo tubo de Pitot posicionado diretamente sobre o sensor de pressão da placa plana. Para medição em uma tomada, de um dos 32 canais do módulo de pressão (Figura 20), é conectado o tubo de pressão total do sensor de pressão da placa plana e, no mesmo canal é conectada a tomada de pressão estática do tubo de Pitot. A tomada de pressão total do tubo de Pitot é fechada e não é conectada no módulo de pressão.

Organizando a Equação 3.1, obtém-se a velocidade do escoamento (Equação 3.2) provinda de um sensor da placa plana:

$$V = \sqrt{\frac{2(P_{total} - P_e)}{\rho}}, \quad (3.2)$$

sendo que a diferença ( $P_{total} - P_e$ ) é dada diretamente pelo canal do módulo de pressão.

Nos experimentos realizados foram feitas as medições de temperatura e umidade relativa do ar para cada leitura de pressão no túnel. Uma imagem do equipamento

utilizado é apresentada na Figura 21 e é conhecido comercialmente como termohigrômetro e anemômetro com cálculo de ponto de orvalho.

Figura 21. Leitor de Umidade Relativa e Temperatura



Fonte: Próprio autor

Essas medições são utilizadas para determinar a massa específica do ar em  $\text{kg.m}^{-3}$ . Esta por sua vez foi encontrada a partir do uso de um aplicativo que calcula as propriedades psicrométricas do ar, como pode ser observado na Figura 22. A altitude utilizada foi de 778 metros (altitude padrão de Goiânia – GO). O aplicativo está disponível no site ([www.agais.com/toolbox/psicrometria3.php](http://www.agais.com/toolbox/psicrometria3.php)).

Figura 22. Tela de entrada de dados do aplicativo utilizado para cálculo da massa específica do ar.

Principal | Armazenagem de Grãos | Café | Agroindústria | Modelagem & Simulação | Aplicativos

**CÁLCULO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS DO AR**

Este aplicativo "on line" calcula as propriedades psicrométricas do ar em função da Altitude, Temperatura do ar e uma das seguintes propriedades: Umidade relativa, Temperatura de bulbo úmido, Razão de mistura, Entalpia ou Volume específico.

**Restrições de uso:** A temperatura do ar deve menor que 100 °C.

O botão **Voltar Dados** tem efeito somente se você já acionou o botão **Calcular** pelo menos uma vez.

**ENTRADA DE DADOS**

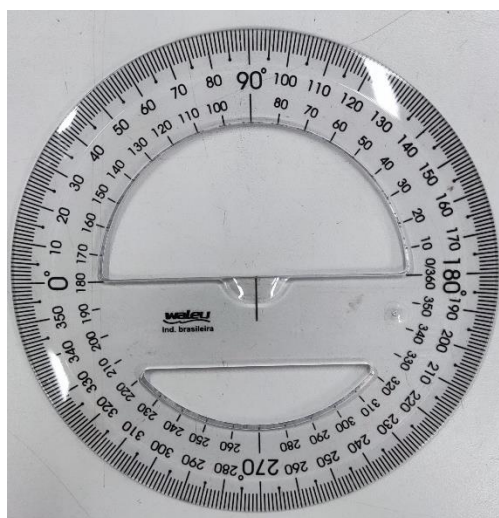
Altitude .....(m)=	0,00	
Temperatura do ar ..... (°C)=		
Umidade Relativa .....(%) =	▼	

Calcular | Limpar | Voltar Dados

Fonte: Próprio autor

Para a realização das medidas de ângulos na placa plana dentro da seção de testes do túnel de vento foi utilizado um transferidor como pode ser observado na Figura 23.

Figura 23. Transferidor utilizado no experimento.



Fonte: Próprio autor

## 3.2. Procedimento Experimental

### 3.2.1. Calibração do Túnel de Vento

Após a realização da limpeza do túnel de vento, foi realizado o procedimento, denominado calibração. Nesta etapa foi possível fazer a correlação da velocidade de rotação imposta no motor do ventilador e a velocidade obtida na seção de testes. Para tanto, foram ajustadas as rotações no inversor de frequência de forma manual (demonstrado no próximo tópico). Após acionado o túnel de vento nas respectivas velocidades de rotação, esperou-se, pelo menos 30 s para garantir que o escoamento se torne estatisticamente permanente, acionou-se o modo de aquisição de pressão, o qual tem taxa de aquisição de 3,0 Hz, por, pelo menos 120 s. Desligou-se o túnel de vento, ajustando uma nova rotação, realizando-se novamente o experimento. Para cada combinação foi feita a leitura de temperatura e umidade, obtendo-se assim a massa específica do ar através do aplicativo apresentado na Figura 22. Foram escolhidas 13 rotações diferentes a partir de 250 rpm até 1450 rpm, ou seja, a cada 100 rpm. Os experimentos foram realizados de forma aleatória. Na Tabela 3 são apresentadas a rotação imposta e a respectiva diferença de pressão obtida no convergente do túnel de vento. Com a diferença de pressão, utiliza-se a equação de Bernoulli aplicada em uma linha de

corrente entre a entrada e saída da seção convergente do túnel de vento, obtendo-se assim a velocidade na saída do convergente, que corresponde a entrada da seção de testes.

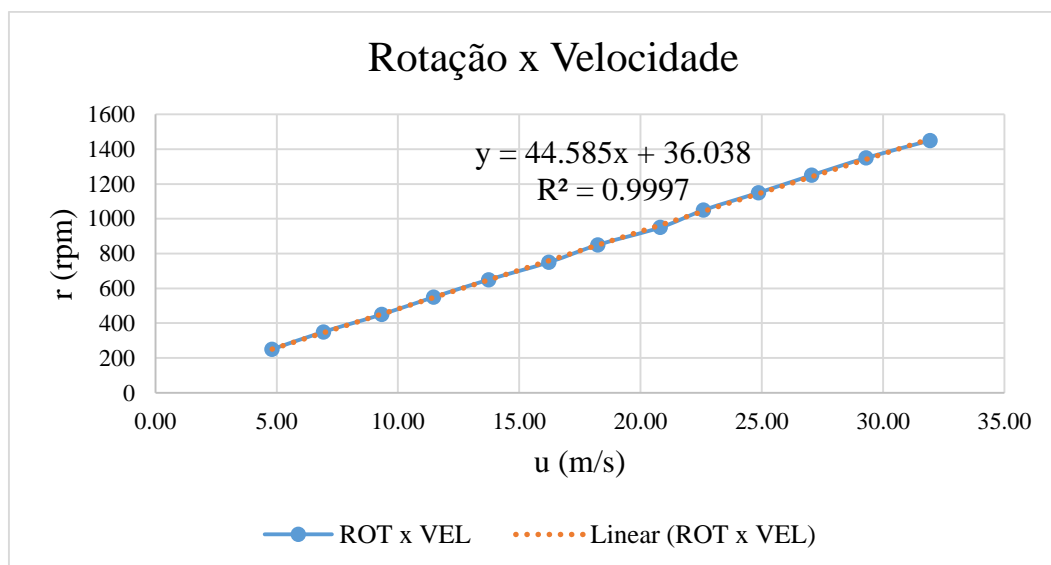
Tabela 3. Resultados da Calibração do Túnel de Vento.

<b>Rotação (rpm)</b>	<b>u (m/s)</b>	<b>ΔP (Pa)</b>
250	4,81	11,24
350	6,93	23,27
450	9,33	42,24
550	11,47	63,84
650	13,74	91,54
750	16,22	127,73
850	18,24	161,28
950	20,82	210,33
1050	22,60	247,75
1150	24,87	300,02
1250	27,05	355,24
1350	29,31	416,89
1450	31,94	494,74

Fonte: Próprio autor

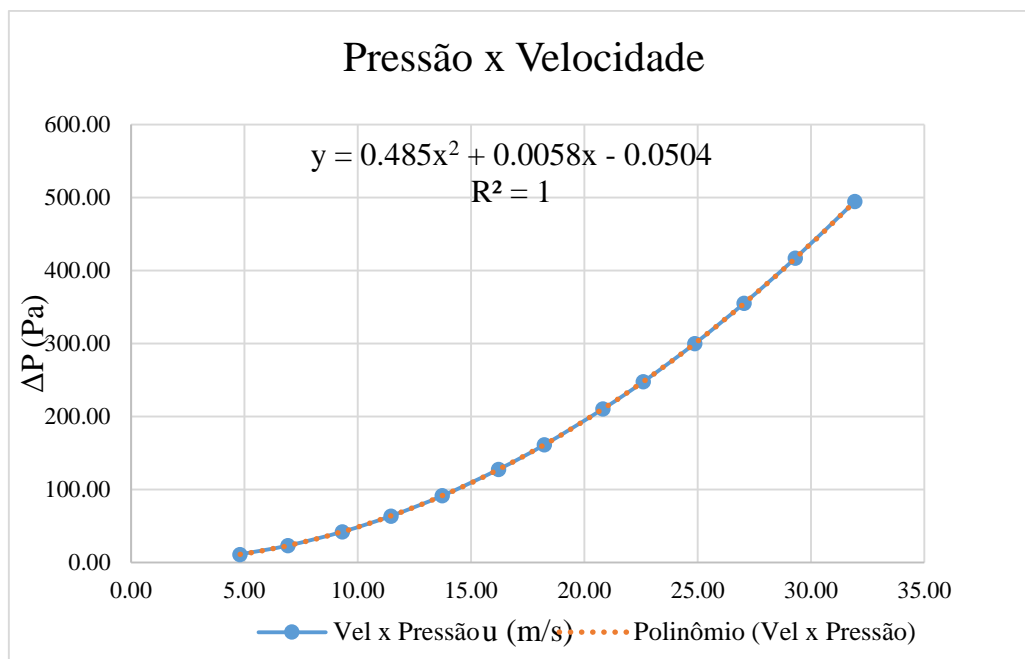
A partir das distribuições de variação de pressão ( $\Delta P$ ) e de velocidade ( $u$ ), geram-se os gráficos das Figuras 24 e 25, respectivamente. Como é previsto, a velocidade é uma função linear da rotação do ventilador (vide equação na Figura 24). Já a função da diferença da pressão pode ser observada na Figura 25, a qual tem um comportamento quadrático em relação a rotação.

Figura 24. Gráfico da Rotação *versus* Velocidade do experimento de calibração do TV



Fonte: Próprio autor

Figura 25. Gráfico da Pressão *versus* Velocidade do experimento de calibração do TV



Fonte: Próprio autor

### 3.2.2. Controle da camada limite utilizando a placa plana

O procedimento experimental consiste em obter a pressão total de cada sensor e a pressão estática provinda do tubo de Pitot, para diferentes velocidades de rotação (rpm) e diferentes ângulos de posicionamento do flape ( $^{\circ}$  - graus). Para tanto, foram ajustadas as rotações (relativas às respectivas velocidades) no inversor de frequência de forma manual (Figura 26).

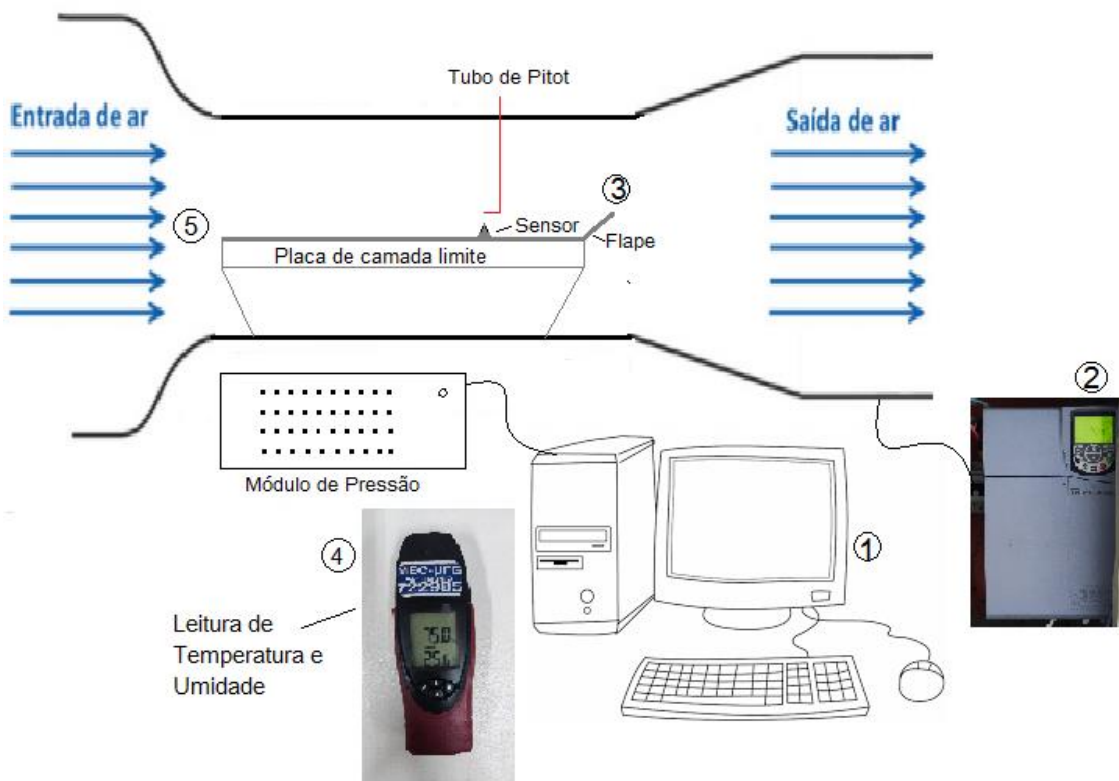
Figura 26. Inversor de Frequência no túnel de vento



Fonte: Próprio autor

O esquema de análise pode ser melhor observado na Figura 27. Primeiramente, posiciona-se o flape em um determinado ângulo de ataque, então liga-se o túnel de vento em uma determinada velocidade de rotação. Espera-se, pelo menos 30 segundos para garantir que o escoamento se torne estatisticamente permanente, aciona-se o modo de aquisição de pressão, com taxa de aquisição de 3,0 Hz, por, pelo menos, 60 segundos. Desliga-se o túnel de vento, ajusta-se um novo ângulo para o flape, uma nova velocidade de rotação e realiza-se novamente o experimento. As combinações foram definidas a partir dos dois fatores (ângulo e velocidade) para cinco níveis de observações. Para cada combinação foi feita a leitura de temperatura e umidade, sendo possível assim calcular a massa específica do ar.

Figura 27. Esquema de análise dos experimentos



Fonte: Próprio autor

As combinações de ângulos e velocidades de rotação estão descritas na Tabela 4. Desta forma, utilizando a metodologia de planejamento fatorial, foram realizadas 25 leituras durante o experimento.

Tabela 4. Ângulos do flape e velocidades escolhidas para realizar o planejamento fatorial.

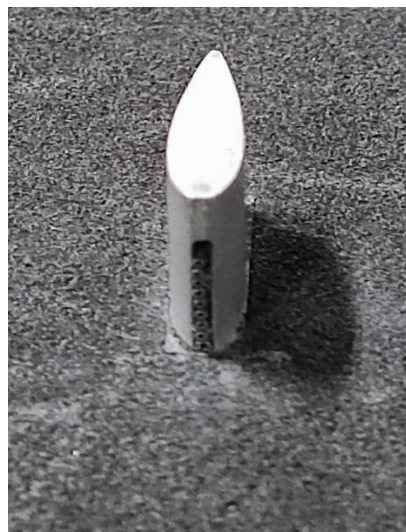
<b>ÂNGULO DO FLAPE (°)</b>	<b>VELOCIDADE DE ROTAÇÃO (rpm)</b>	<b>VELOCIDADES APROXIMADAS (m.s<sup>-1</sup>)</b>
20	299	6
10	601	13
0	900	20
-10	1200	26
-20	1499	33

Fonte: Próprio Autor

A ordem e o dia dos experimentos foram feitos de maneira aleatória, como é recomendado por Montgomery (2013), minimizando a presença de erros grosseiros e sistemáticos. Os experimentos foram realizados no mês de Julho de 2023 em quatro dias, sendo dois deles no período da manhã e os outros dois no período da tarde. Dessa forma foram obtidas quatro repetições.

Para cada experimento é obtida uma tabela com os dados de pressão total e estática obtidos ao longo dos 60 segundos de aquisição, ou seja, aproximadamente, 180 dados adquiridos pelos sensores de pressão. No presente trabalho, são apresentados os dados de 8 sensores alinhados verticalmente (Figura 28), posicionados próximo ao bordo de fuga da placa plana, como pode ser observado na placa de camada limite da Figura 29.

Figura 28. Detalhe do sensor de leitura da placa de camada limite



Fonte: Próprio Autor

Figura 29. Placa de Camada Limite destacando o conjunto de sensores escolhido



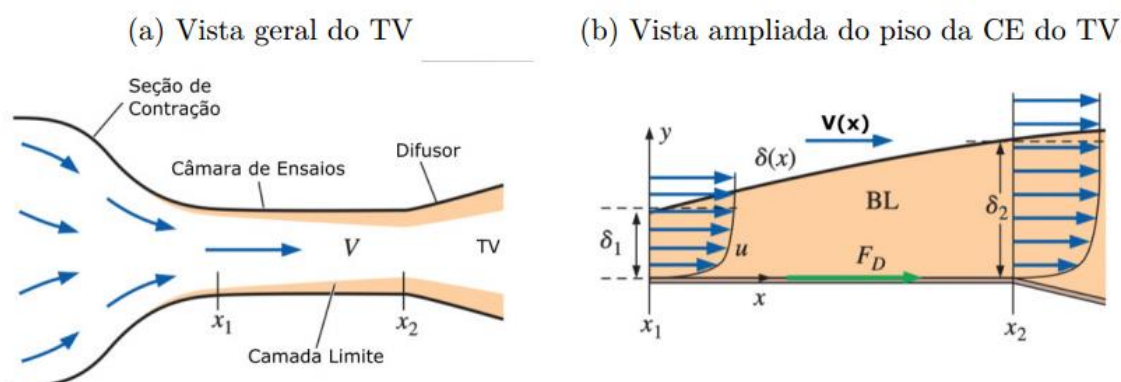
Fonte: Próprio Autor

### 3.2.3. Desenvolvimento e controle da camada limite

A partir da *teoria da camada limite* descrita por Prandtl (1904) apud White (2007), é possível solucionar regiões de escoamento externo, ou seja, regiões de altos números de Reynolds, de escoamento com viscosidade desprezível e vorticidade muito pequena e ajustar posteriormente uma fina camada limite em regiões nas quais a rotacionalidade e as forças viscosas não podem ser desprezadas.

O conhecimento do desenvolvimento da CL (Figura 30) dentro da seção de ensaios do túnel de vento é outra característica que determina a qualidade do escoamento e, conseqüentemente, permite a definição dos estudos a serem realizados. O escoamento da camada limite é inicialmente laminar. A transição para escoamento turbulento ocorre a alguma distância do bordo de ataque da placa plana, distância esta que depende das condições da corrente livre, da rugosidade da superfície e do gradiente de pressão (FOX et al., 2014). Essa caracterização é feita através da leitura das velocidades bem próximas às paredes da seção de ensaios. O escoamento na CL fica sujeito às condições de contorno de velocidade zero na superfície e a um escoamento conhecido, pré-determinado, invíscido e irrotacional a partir da borda externa da CL.

Figura 30. Desenvolvimento da CL ao longo das paredes de um TV



Fonte: Çengel e Cimbala (2011)

O número de Reynolds (Equação 3.3) é o parâmetro mais apropriado para caracterizar o escoamento sobre uma placa plana que combina as ordens relativas de magnitude de inércia e viscosidade de um escoamento.

$$Re = \frac{\rho V L_x}{\mu}, \quad (3.3)$$

onde  $L_x$ , no caso do estudo da CL, é o comprimento ao longo do eixo  $x$  da seção de testes do túnel de vento,  $V$  é a velocidade externa à CL,  $\mu$  é a viscosidade do fluido e  $\rho$  é massa específica do fluido.

Na resolução das equações de CL, considera-se um escoamento bidimensional, viscoso, incompressível e permanente, desprezando-se a gravidade.

A partir das Equações de Navier Stokes para um escoamento incompressível de um fluido newtoniano com propriedades constantes, considerando a direção  $x$  ao longo da placa plana e  $y$  a direção normal à placa, conforme apresentado na Figura 30 (b), as equações para este escoamento podem ser assim escritas:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.4)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.5)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3.6)$$

Prandtl (1904) apud White (2007) resolveu as equações com condições de contorno na entrada de velocidade  $V$ , uniforme e constante e condição de não

deslizamento na placa. Considerando que na camada sob cisalhamento, por ser muito fina, o número de Reynolds é considerado muito alto, valeu-se de algumas aproximações:

$$v \ll u \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \ll \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} \ll \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (3.9)$$

ou seja, a componente de 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 30 (b), também são muito maiores que as variações ao longo do eixo  $x$ , pois a camada limite é supostamente esbelta.

Substituindo as simplificações nas Equações 3.5 e 3.6, os termos das derivadas parciais em relação ao eixo  $x$  das componentes das velocidades  $u$  e  $v$  tornam muito pequenos, concluindo-se que:

$$\frac{\partial p}{\partial y} \approx 0 \text{ ou } p \approx p(x) \quad (3.10)$$

Prandtl (1904) apud White (2007), concluiu que a equação da quantidade de movimento na direção  $y$  - Figura 30 (b), pode ser desconsiderada inteiramente e a pressão varia apenas ao longo da camada limite e não através dela. O termo de gradiente de pressão da Equação 3.8 já é conhecido da Equação de Bernoulli aplicado a escoamento não viscoso externo e pode ser escrito conforme a Equação 3.11:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{dp}{dx} = -\rho V \frac{dV}{dx}. \quad (3.11)$$

A teoria da camada limite, então, simplifica as três equações completas do movimento para as duas Equações de Prandtl, no caso de escoamento incompressível, bidimensional e permanente:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (3.12)$$

e a equação da Quantidade de Movimento ao longo da parede:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \approx V \frac{dV}{dx} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (3.13)$$

onde  $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$ , para escoamentos laminares e  $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} - \overline{\rho \mu' v'}$ , para escoamentos turbulentos. Em escoamentos sobre uma placa plana não há gradiente de velocidade na região de escoamento não viscoso externo, então,  $\frac{dV}{dx} = 0$  e a Equação 3.13 se torna:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \approx \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (3.14)$$

Essas equações podem ser resolvidas para  $u(x, y)$  e  $v(x, y)$ , e as condições de contorno para  $u$  e  $v$  são:

- Condição de contorno de aderência na parede ( $y = 0$ ):

$$u = v = 0 \quad (3.15)$$

- Condição de contorno na borda superior da camada limite ( $y = \delta(x)$ ):

$$u = V(x). \quad (3.16)$$

### 3.3. Determinação do Potencial Eólico

A energia cinética associada ao vento é diretamente proporcional à massa do objeto e ao quadrado de sua velocidade (RAMASESHA, 2013). Wagner (2018) acrescenta que a quantidade dessa energia a ser captada depende de três fatores: densidade do ar, área de varredura do rotor e a velocidade do vento. O ar se move sob a forma de vento com uma certa velocidade e, portanto, possui energia cinética, podendo ser escrita conforme a Equação 3.17:

$$E = \frac{1}{2} m \bar{V}^2, \quad (3.17)$$

onde  $m$  é a massa de vento que se movimenta através de uma determinada área e  $\bar{V}$  é a velocidade média do vento, que passa pela mesma área. Para uma turbina eólica, considera-se um cilindro de ar de comprimento  $l$  e, o próprio diâmetro da turbina como a base do cilindro. Assim, a massa de ar que atinge a turbina eólica é:

$$m = \rho(\pi r^2 l), \quad (3.18)$$

onde  $r$  é o raio da turbina e  $\rho$  a massa específica do ar. O comprimento  $l$  pode ser escrito conforme a Equação 3.19:

$$l = \bar{V}\Delta t, \quad (3.19)$$

Fazendo a substituição do valor de  $l$  na Equação 3.18 e, posteriormente, na Equação 3.17, pode-se escrever a energia cinética:

$$E = \frac{1}{2} (\rho\pi r^2\Delta t\bar{V}^3), \quad (3.20)$$

onde  $E$  é a energia cinética disponível no vento, em  $[J]$ .

Por fim, divide-se a energia cinética pelo intervalo de tempo e obtém-se o potencial eólico:

$$P_{eol} = \frac{E}{\Delta t} = \frac{\pi}{2} \rho r^2 \bar{V}^3, \quad (3.21)$$

onde  $P_{eol}$  é o potencial eólico em  $[W]$ . O potencial eólico por área de turbina pode ser observado na Equação 3.21 e é dado em  $[W.m^{-2}]$ :

$$\frac{P_{eol}}{\pi r^2} = \frac{\rho}{2} \bar{V}^3. \quad (3.22)$$

Nem toda energia cinética do vento será convertida em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica (MORAN et al., 2013; INCROPERA et al., 2015). Isso porque o limite teórico chamado *Limite de Betz*, representa o máximo de energia eólica que pode ser retirada do vento por um aerogerador. Betz mostrou que nenhuma turbina eólica pode converter mais de 59% da energia cinética do vento em energia mecânica, girando um rotor ideal. Além disso, de acordo com Ramasesha (2013), quando se leva em consideração as ineficiências de conversão de energia do gerador e dos rolamentos, por exemplo, apenas 10% a 30% da energia do vento é realmente convertida em eletricidade utilizável.

### 3.3.1. Determinação da Velocidade Média do Vento - $\bar{V}$

Cardoso (2020) destaca a importância da determinação da velocidade média do vento na previsão do potencial eólico da região em estudo. Os dados coletados pelas plataformas de coleta de dados podem ser combinados com modelos reduzidos em túnel de vento. Os ensaios realizados podem fornecer uma estimativa do potencial eólico em

alturas diferentes das coletadas nas campanhas, ou até mesmo, em locais onde não existem campanhas de medição de vento.

Na Figura 31(a) é possível observar o desenvolvimento da camada limite, em que a velocidade média  $\bar{V}$  é suposta ser uma função exponencial ao longo da altura  $y$  da CL e pode ser escrita conforme Equação 3.23:

$$V(y) = ay^b, \quad (3.23)$$

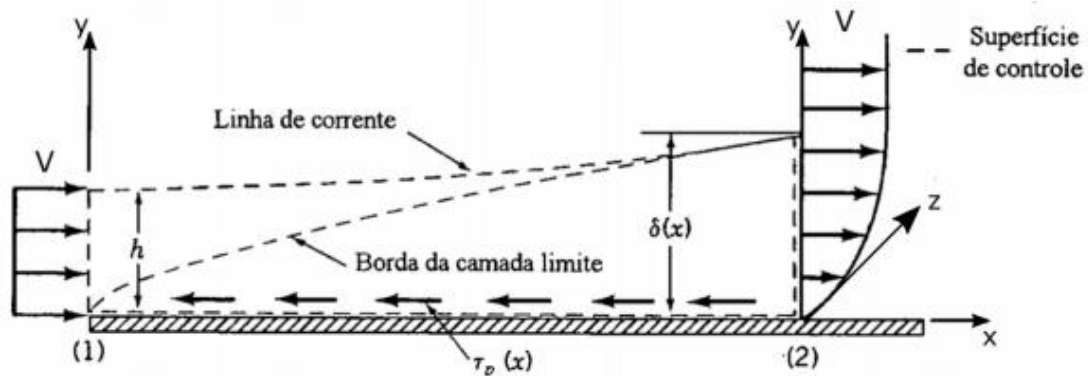
onde  $y$  é o eixo que corresponde à altura da seção de ensaios. Considerando  $L_z$  a largura da seção de ensaios na direção do eixo  $z$  da Figura 3.20 (b), a área infinitesimal pode ser escrita como:

$$dA = L_z dy. \quad (3.24)$$

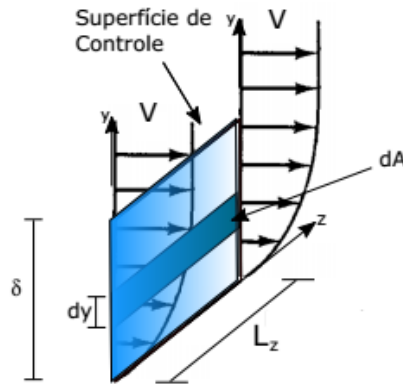
Deve ficar claro que a Equação 3.23 é uma proposta de solução particular para a componente  $u$  da Equação 3.14, a qual é usada principalmente por pesquisadores da área de energia eólica (FADIGAS, 2011). Na sequência, apresenta-se o processo de integração da Equação 3.23, para se obter o valor da velocidade média  $\bar{V}$ , a qual é usada no cálculo do potencial eólico dado pela Equação 3.22.

Figura 31. Desenvolvimento da CL dentro da seção de ensaios do TV.

a) Desenvolvimento da CL ao longo do TV



b) Detalhe do perfil de velocidade da CL na superfície de controle



Fonte: Cardoso (2020)

Considerando a área hachurada da Figura 31(b), a velocidade média  $\bar{V}$  pode ser escrita:

$$\bar{V} = \frac{1}{A} \int_A V(y) dA, \quad (3.25)$$

substituindo o valor de  $dA$  e o valor de  $A = \delta L_z$ :

$$\bar{V} = \frac{1}{\delta L_z} \int_0^\delta V(y) L_z dy, \quad (3.26)$$

simplificando  $L_z$  da equação:

$$\bar{V} = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta V(y) dy. \quad (3.27)$$

Por último, substituindo a velocidade  $V$  pela função da Equação 3.23, tem-se:

$$\bar{V} = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta a y^b dy. \quad (3.28)$$

Resolvendo a Equação 3.28, a velocidade média dentro da camada limite pode ser encontrada através da Equação 3.29, a partir dos parâmetros  $a$  e  $b$  da curva que mais se aproxima do perfil da camada limite.

$$\bar{V} = \frac{a \delta^b}{b+1}. \quad (3.29)$$

Esta última equação permite a previsão do potencial eólico disponível para o caso de um terreno plano, que deve ser comparado considerando os parâmetros de similitude à situação real. Destaca-se que os parâmetros  $a$  e  $b$  são obtidos do experimento em túnel de vento.

### 3.4. Procedimento Estatístico

Neste tópico serão apresentadas as técnicas de planejamento fatorial, obtenção da superfície resposta e análise de variância. Este tópico utilizou como base o trabalho de Cardoso (2020), além das literaturas dos autores Montgomery (2013), Box et al. (2005) e Barros Neto et al. (2001).

A abordagem estatística para o planejamento experimental é necessária caso se deseje obter conclusões significativas dos dados. Quando o problema envolve dados que são sujeitos a erros experimentais, os métodos estatísticos são a única abordagem objetiva para análise. Assim, há dois aspectos em qualquer problema experimental: o planejamento do experimento e a análise estatística dos dados (MONTGOMERY, 2013).

De acordo com Montgomery (2013), os três princípios básicos do planejamento experimental são randomização, replicação e bloqueio. A randomização é a pedra angular subjacente ao uso de métodos estatísticos no planejamento experimental. Por randomização entende-se que tanto a alocação do material experimental quanto a ordem na qual as execuções individuais do experimento devem ser realizadas são determinadas aleatoriamente. Os métodos estatísticos requerem que as observações (ou erros) sejam variáveis aleatórias distribuídas independentemente. A randomização geralmente torna essa suposição válida. Ao randomizar adequadamente o experimento, também favorece o “cálculo da média” dos efeitos de fatores estranhos que podem estar presentes.

A replicação ocorre quando a execução da repetição é independente de cada combinação de fator.

A blocagem é uma técnica de projeto usada para melhorar a precisão com que as comparações entre os fatores de interesse são feitas. Frequentemente, o bloqueio é usado para reduzir ou eliminar a variabilidade transmitida por fatores incômodos – isto é, fatores que podem influenciar a resposta experimental, mas que não se tem direto interesse. No presente trabalho foram utilizados esses três princípios.

Para usar a abordagem estatística no planejamento e análise de um experimento, é necessário que todos os envolvidos no experimento tenham uma ideia clara antecipadamente sobre o que deve ser estudado, como os dados devem ser coletados e, pelo menos, uma compreensão qualitativa de como esses dados serão analisados. O procedimento recomendado de acordo com Montgomery (2013) é:

- Reconhecimento e declaração do problema;

- Seleção da variável de resposta;
- Escolha dos fatores, níveis e intervalos;
- Escolha do desenho experimental;
- Realização do experimento;
- Análise estatística dos dados;
- Conclusões e recomendações.

Ao selecionar a variável resposta, o experimentador deve ter certeza de que essa variável realmente fornece informações úteis sobre o processo em estudo. Na maioria das vezes, a média ou desvio padrão (ou ambos) será a variável de resposta. No presente estudo, foi utilizada como resposta a altura da camada limite ( $\delta$ ), ou seja, a altura, a partir da superfície plana, onde a velocidade do escoamento torna-se 99%, em média, a velocidade do escoamento na entrada da seção de testes, para cada combinação obtida a partir da média dos dados coletados.

Análise de Variância (ANOVA) foi proposta por R.A. Fisher na década de 1920 e teve um impacto enorme na aplicação da Estatística em vários campos do conhecimento (BOX, et al., 2005). Ela decompõe os desvios das respostas observadas em relação à resposta média global, sendo decomposta em outras duas.

Os experimentos fatoriais são aqueles em que são estudados simultaneamente os efeitos de dois ou mais fatores, tendo como principal vantagem permitir chegar a conclusões mais abrangentes (LIMA, 2020). Um fator é uma variável independente cujos valores são controlados (definidos, escolhidos) pelo experimentador. Cada valor que o fator pode assumir é chamado de nível do fator. Para realizar um experimento fatorial, seleciona-se um número fixo de níveis de cada um dos fatores (variáveis explicativas ou tratamentos), e realizam-se os experimentos em todas as possíveis combinações.

No presente trabalho foi utilizada a ANOVA em que um primeiro conjunto de análises (5 observações) foi considerado o estudo de 2 fatores (ângulo e velocidade). Já para um segundo conjunto de análises, considerou-se o estudo de apenas 1 fator (ângulo). Esta etapa teve o objetivo de verificar se a variação do ângulo de flape da placa plana de camada limite influenciava na altura da camada limite seja combinada ou não com a velocidade em diferentes níveis.

De acordo com Montgomery (2013), a hipótese estatística é uma declaração sobre os parâmetros de uma distribuição de probabilidade ou os parâmetros de um modelo. A hipótese reflete alguma conjectura sobre a situação do problema. Para testar uma hipótese, elabora-se um procedimento para obter uma amostra aleatória, calculando um teste estatístico apropriado e, em seguida, rejeita-se ou aceita-se a hipótese ( $h_0$ ) a um determinado valor ou nível de significância (*valor-P*). Isso geralmente é chamado de teste de nível de significância fixo. O *valor-P* é a probabilidade de que a estatística de teste assuma um valor que seja pelo menos tão extremo como o valor observado da estatística quando a hipótese nula  $h_0$  é verdade. Portanto, o *valor-P* é o menor nível no qual os dados são significativos.

Para Barros Neto et al. (2001), o melhor modelo que representa o fenômeno é aquele que apresenta resíduos mínimos. As somas quadráticas em torno da média (Equação 3.30) e às devido a regressão (Equação 3.31) são calculadas na intenção de verificar a qualidade desse resíduo.

$$SQ_T = \sum (y_i - \bar{y})^2, \quad (3.30)$$

$$SQ_R = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2, \quad (3.31)$$

$$SQ_T = SQ_R + \text{soma residual}. \quad (3.32)$$

Por fim, pode-se calcular o resíduo das somas quadráticas, dado por

$$R^2 = \frac{SQ_R}{SQ_T}. \quad (3.33)$$

O valor de  $R^2$ , também chamado de coeficiente de determinação do modelo, será máximo quando igual a 1,0 e representa a porcentagem de variação do modelo explicada pela regressão (NETO et al., 2001). É importante que a variância dos erros seja constante dentro da faixa estudada, além dos erros seguirem uma distribuição normal, ou seja, média zero.

O último passo demonstra se a razão entre as médias quadráticas do modelo de regressão e do resíduo seguem uma *Distribuição F*. Sendo assim, calcula-se a razão entre as médias quadráticas e compara-se esse valor encontrado com o valor tabelado de  $f_{inv}$  da *Distribuição F* no nível de 95% de confiabilidade, onde  $f_{inv}$  representa o valor do inverso

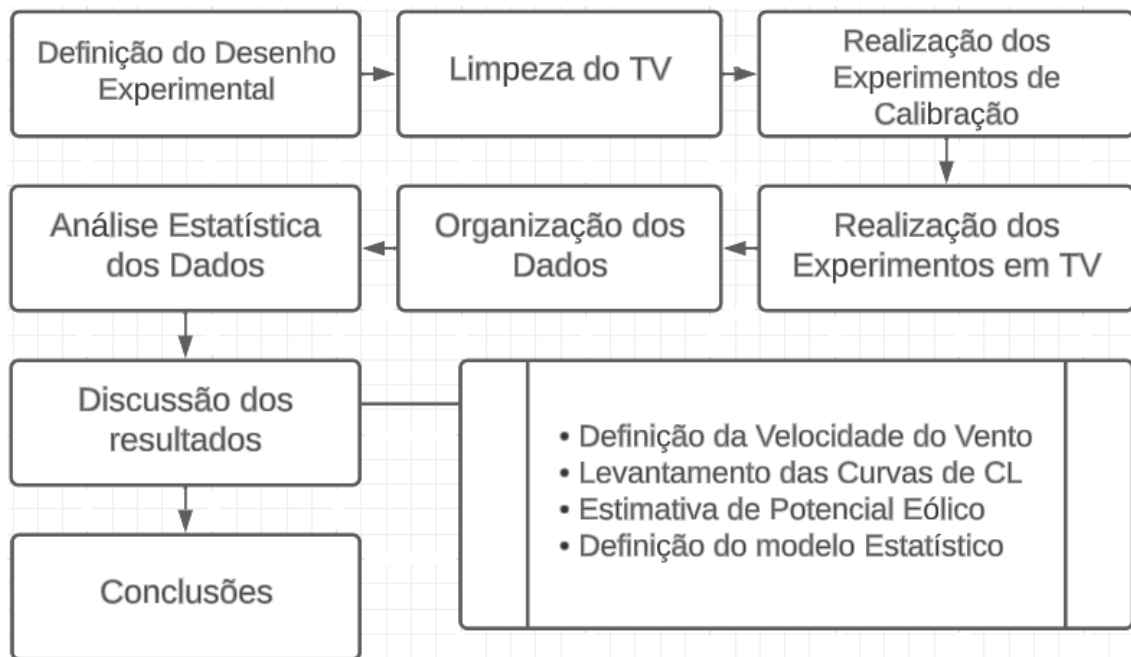
da função de *Distribuição F*, avaliada para os parâmetros e para os graus de liberdade do modelo:

$$F = \frac{MQ_R}{MQ_r} \quad (3.34)$$

Considerando como hipótese nula a independência entre a variável independente e a variável resposta, para que a hipótese nula seja rejeitada, o valor de  $F$  da Equação 3.34 deve ser maior que o valor tabelado  $f_{inv}$  da *Distribuição F*. Busca-se, então, valores de  $F \gg f_{inv}$  para comprovar a dependência entre as variáveis e rejeitar a hipótese nula.

Após toda a descrição da metodologia, na Figura 32 está descrito resumidamente as etapas do atual capítulo, visando um melhor entendimento e visualização:

Figura 32. Fluxograma resumido da metodologia de estudo



Fonte: Próprio Autor

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Análise da Altura da Camada Limite para os Diferentes Ângulos de Flape

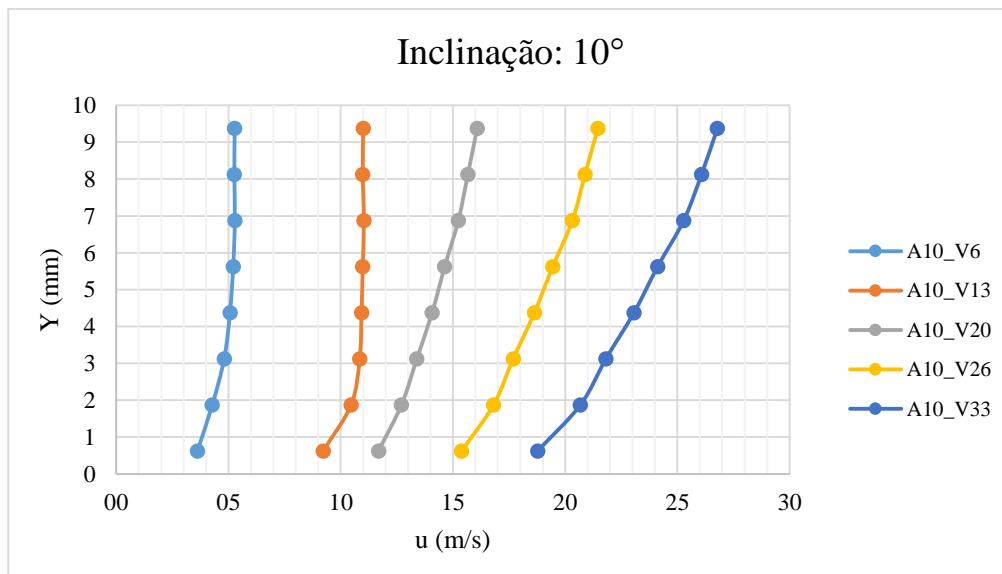
Como resultados, calcula-se a média das 180 medições de pressões total e estática obtidas ao longo do tempo de aquisição. Utiliza-se, então, os resultados médios de pressões na Equação 3.2, convertendo-os em velocidade média (no tempo) em um determinado ponto do escoamento sobre a placa plana. Essa conta é feita para as 25 medições (combinação de 5 ângulos e 5 velocidades) nas diferentes 8 posições ao longo da vertical.

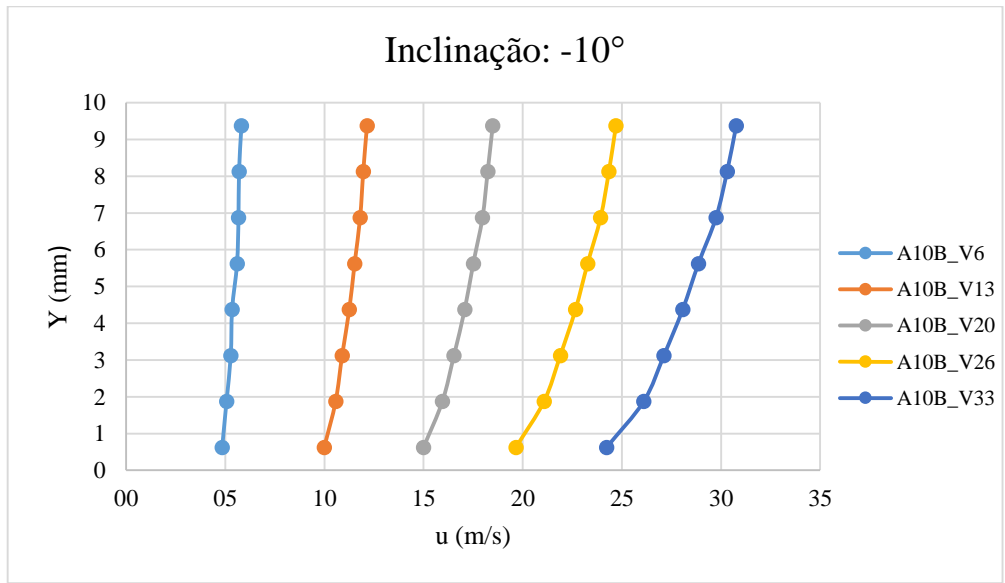
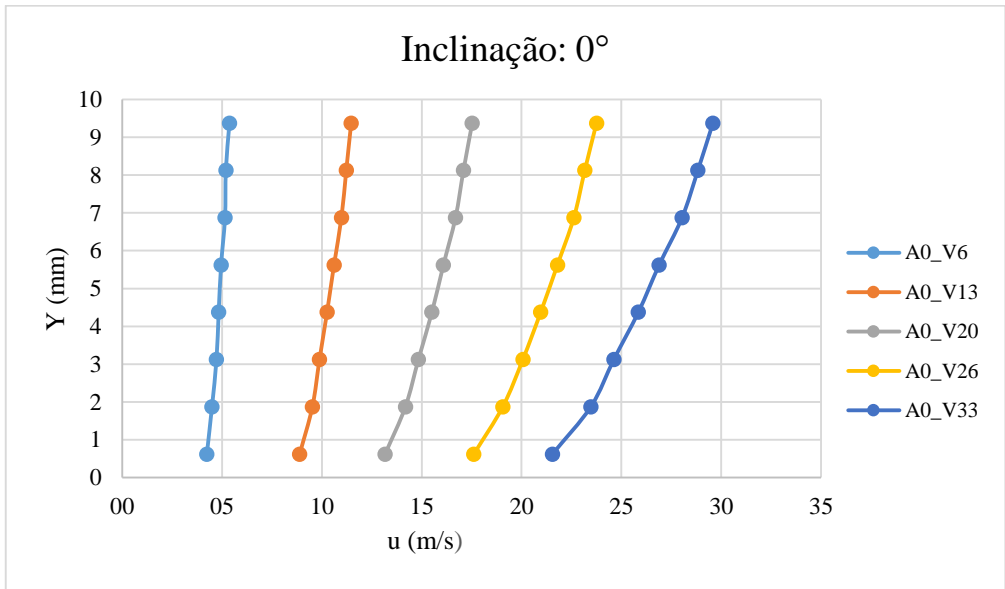
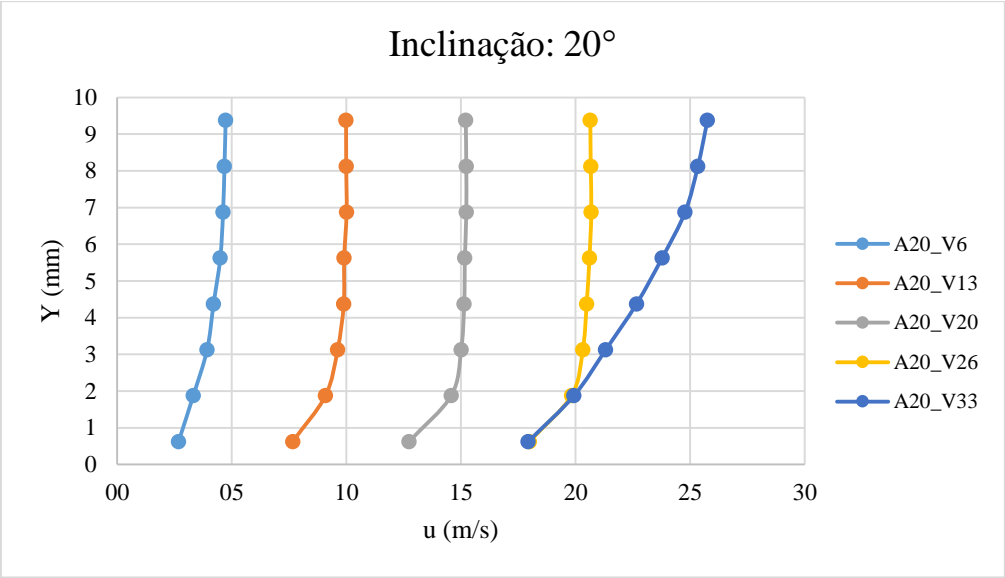
Os valores correspondentes às alturas dos pontos de leitura dos sensores a partir do piso da placa plana podem ser observadas abaixo:

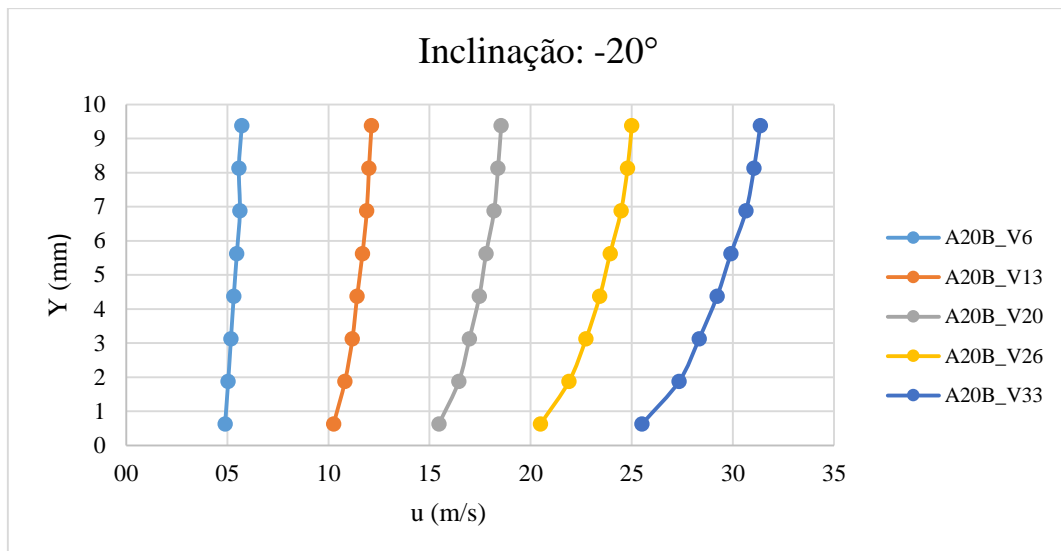
1 – 0,625 mm	5 – 5,625 mm
2 – 1,875 mm	6 – 6,875 mm
3 – 3,125 mm	7 – 8,125 mm
4 – 4,375 mm	8 – 9,375 mm

Dessa forma, consegue-se agrupar os resultados nos gráficos da Figura 33, onde são apresentadas as curvas de velocidade média (no tempo) ao longo das diferentes posições verticais (y) dos sensores. Para descrever e diferenciar as curvas dos gráficos, foi utilizado a letra “A” e “V” para representar o ângulo e a velocidade respectivamente.

Figura 33. Distribuições de velocidade média ao longo dos sensores de aquisição de pressão, para diferentes ângulos de posicionamento do flape da placa plana.







Fonte: Próprio Autor

É possível observar que, para ângulo de flape positivos (+10° e +20°), a altura da camada limite fica definida para velocidades menores, podendo-se estimar diretamente a altura da mesma. Entretanto, para ângulos de flape negativos (-20° e -10°) e para o ângulo zero (0,0°) a camada limite ainda está em desenvolvimento, uma vez que o perfil de velocidade média ainda não se estabilizou em uma determinada velocidade.

Outro resultado importante é a variação da velocidade, quanto mais baixa a velocidade, melhor é definida a camada limite. Para velocidades mais altas, mesmo com ângulo de flape positivo mais alto (+20°) a altura da camada limite não pode ser determinada, com os sensores disponíveis, para a velocidade média de 33 m/s.

O comportamento diferente das curvas de velocidade nos ângulos negativos e positivos corresponde ao que é esperado em placas planas com ângulos de ataque. De acordo com Anderson Jr. (2015), a velocidade do escoamento nas proximidades do bordo de ataque é mais alta com o flape negativo, e à medida que o tubo de corrente flui na direção descendente sobre a superfície superior da placa, sua área transversal aumenta gradualmente, diminuindo a velocidade do escoamento, ou seja, próximo à entrada da placa plana a velocidade aumenta rapidamente, demorando para alcançar a estabilização. Já com o flape positivo, a velocidade diminui próximo ao flape, justificando assim a definição mais rápida da camada limite.

## 4.2. Demonstração Estatística dos Resultados

As análises estatísticas foram feitas com o auxílio do programa estatístico Minitab19 em sua versão DEMO (gratuita por 30 dias). Como descrito anteriormente, a resposta utilizada para os cálculos foi a altura do ponto do sensor correspondente à estabilização da velocidade média nas curvas de distribuição de velocidades geradas. Nas curvas em que a camada limite ainda estava em desenvolvimento, considerou-se a altura maior que 10 mm.

Dessa forma, obteve-se a ANOVA – Análise de Variância da velocidade imposta, verificando assim se a combinação de ângulo e velocidade influenciavam significativamente na formação da camada limite. Em seguida, esse mesmo procedimento foi realizado de forma separada para cada velocidade, ou seja, ANOVA de um fator (variação do ângulo de flape).

### 4.2.1. ANOVA com 2 Fatores: Ângulo e Velocidade

Observa-se pela análise de variância (Tabela 5) que a contribuição da variação do ângulo do flape é de 15,50% e da velocidade é de 44,53%. Para a interação de ambos a contribuição é de 32,52%. Por estes resultados, é possível rejeitar a hipótese nula (*valor-P* é menor que o nível de significância de 0,05), concluindo que a camada limite sofre variação significativa ao variar o ângulo de flape e velocidade dentro do túnel de vento. Complementando a análise, quando observado o *valor-P* para a variável “Blocos”, que está associado aos dias em que se realizaram-se as réplicas, verifica-se que este apresentou um valor de 0,945. Dessa forma, é possível afirmar que as quatro réplicas feitas dias distintos, independentemente do experimento ser feito no período da manhã ou no período da tarde, não influenciaram nos resultados da análise.

Pela Tabela 6, que mostra os valores do sumário do modelo, verifica-se que o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) possui 92,59%, confirmando o ajuste do modelo. Ao analisar a Figura 34, que apresenta os gráficos de resíduos e ajuste, observa-se que os resíduos seguem uma distribuição normal com média nula, o que favorece a análise dos dados pela ANOVA. No gráfico de resíduos *versus* ordem tem-se o pressuposto de que os resíduos não apresentam tendências nem padrões quando exibidos em ordem temporal. Por fim, o modelo contendo os fatores principais e a interação entre eles é adequado e satisfaz aos pressupostos da análise.

Tabela 5. Análise de Variância para o estudo da combinação dos fatores velocidade e ângulo.

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	27	713.672	92.59%	713.672	26.4343	33.32	0.000
Blocos	3	0.297	0.04%	0.297	0.0990	0.12	0.945
Linear	8	462.688	60.03%	462.688	57.8359	72.90	0.000
Ângulo	4	119.469	15.50%	119.469	29.8672	37.64	0.000
Velocidade	4	343.219	44.53%	343.219	85.8047	108.15	0.000
Angulo*Velocidade	16	250.688	32.52%	250.688	15.6680	19.75	0.000
Erro	72	57.125	7.41%	57.125	0.7934		
Total	99	770.797	100.00%				

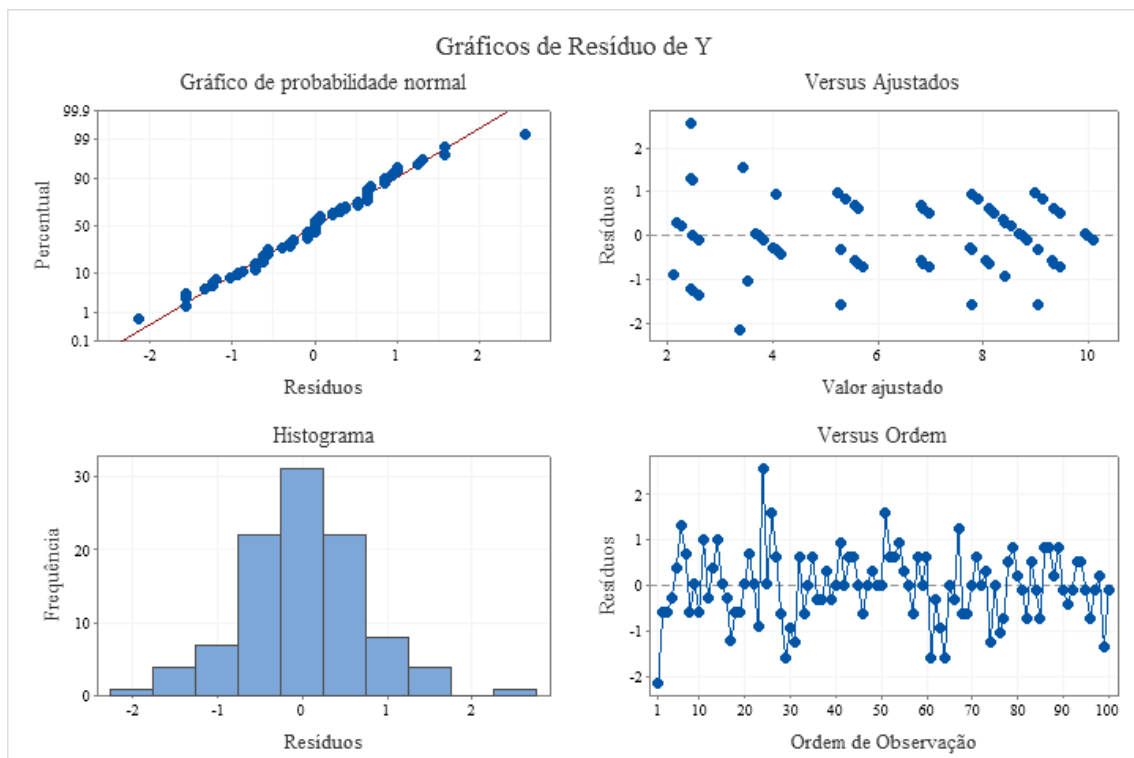
Fonte: Próprio autor

Tabela 6. Sumário do Modelo para o estudo da combinação dos fatores velocidade e ângulo

S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (aj)	PRESQ	R2 (pred)
0.890732	92.59%	89.81%	110.195	85,70%

Fonte: Próprio Autor

Figura 34. Resultados apresentados em gráficos de Resíduo da resposta para o estudo da combinação dos fatores velocidade e ângulo



Fonte: Próprio autor

#### 4.2.2. ANOVA com 1 Fator: Ângulo

Os resultados detalhados encontrados para as velocidades estudadas estão apresentados no Apêndice 2 em tabelas e gráficos em ordem crescente (de 6 m.s<sup>-1</sup> a 33 m.s<sup>-1</sup>). A Tabela 7 apresenta os principais valores para todas as velocidades.

Tabela 7. Principais valores as velocidades estudadas

Velocidade (m.s <sup>-1</sup> )	6	13	20	26	33
Valor P	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Contribuição Ângulo	56,63%	91,16%	94,82%	86,61%	73,28%
R <sup>2</sup> ajustado	45,06%	88,81%	93,43%	83,04%	66,16%

Fonte: Próprio autor

Observando a Tabela 7, é possível rejeitar a hipótese nula (*valor-P* é menor que o nível de significância de 0,05) para todas as velocidades estudadas. Assim, conclui-se que a camada limite sofre variação significativa ao variar o ângulo de flape nas velocidades 6 m.s<sup>-1</sup> a 33 m.s<sup>-1</sup> estudadas no túnel de vento.

Pelos gráficos de resíduos e ajuste (APÊNDICE 2 - Figuras 38 - 42), observa-se que os resíduos seguem distribuição normal com a média nula para as velocidades de 6, 13 e 26 m.s<sup>-1</sup>. Para as outras duas velocidades (20 e 33 m.s<sup>-1</sup>), observou-se que os pontos não parecem estar aleatoriamente distribuídos sobre o zero. Já no gráfico de resíduos *versus* ordem (APÊNDICE 2 –Figuras 38 - 42) tem-se o pressuposto de que os resíduos não apresentam tendências nem padrões quando exibidos em ordem temporal.

#### 4.3. Determinação do Metamodelo

A determinação do melhor modelo foi feita a partir de diversas combinações de variáveis combinadas ou não no programa Minitab19, buscando uma equação de regressão que possua um *R<sup>2</sup> ajustado* adequado quando avaliado juntamente com outras variáveis estatísticas.

Para melhor entendimento, os principais resultados dos metamodelos estão demonstrados na Tabela 8 e nas Figuras 35 e 36 (gráficos de contorno e de resíduos), em que:

A – Ângulo

V – Velocidade

**Equação para o modelo (1):**  $\delta = 15,63 + 2,621 V - 0,243 A - 0,0717 AA$

**Equação para o modelo (2):**  $\delta = - 22,4 + 6,99 V + 2,051 A - 0.1003 VV + 0.1618 AA - 0.3160 VA + 0.00823 VVA - 0.02763 VAA + 0.000650 VVAA$

Tabela 8. Principais valores estatísticos dos metamodelos (1) e (2).

<b>Modelo</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> (aj)</b>	<b>VIF</b>
<b>1</b>	66,41%	65,36%	1
<b>2</b>	80,98%	79,31%	19,32 a 160,51

Fonte: Próprio Autor

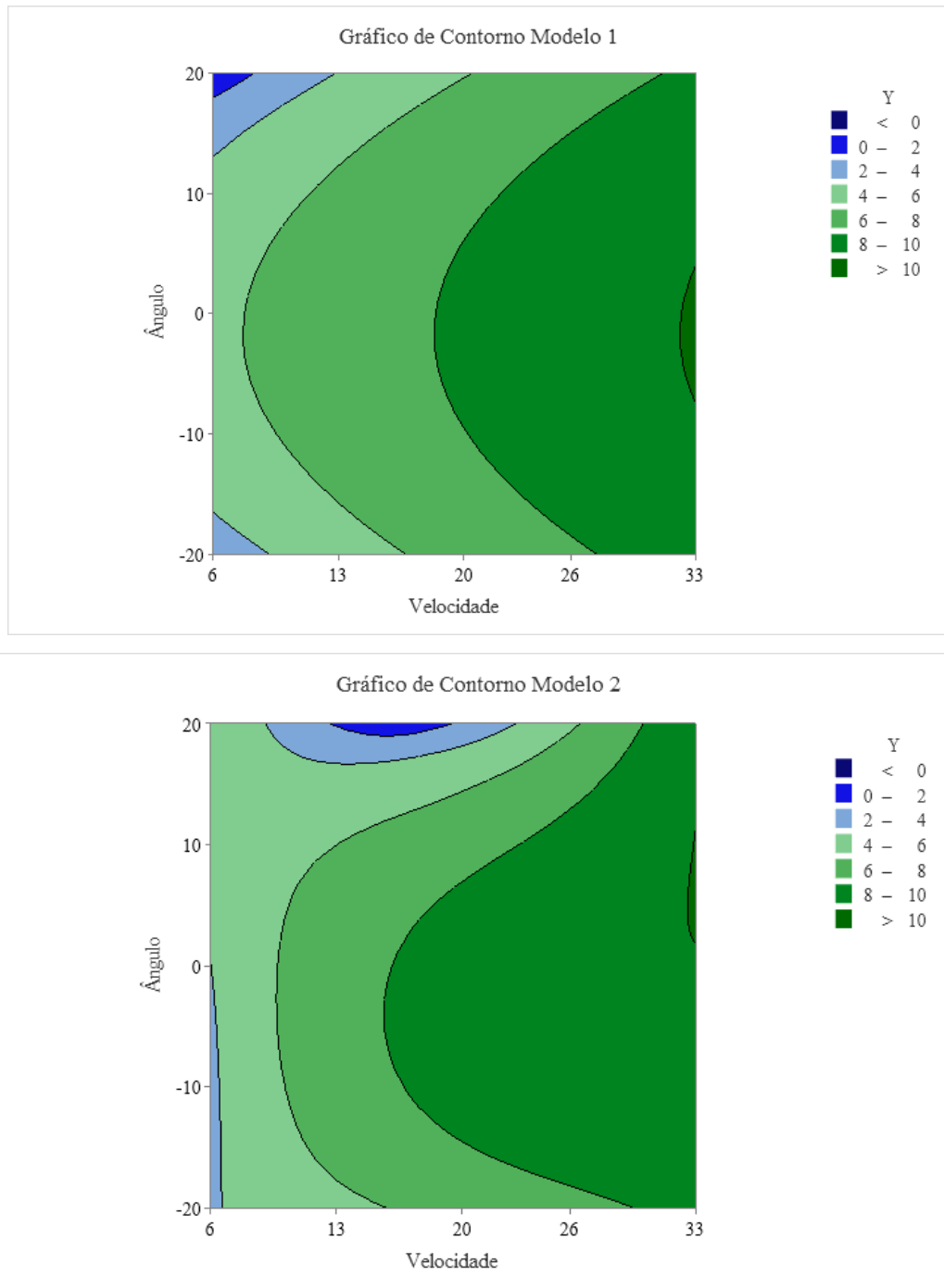
Como observado acima, foram escolhidas uma equação de regressão com mais variáveis (Modelo 2) e outra mais simples (Modelo 1). Os resultados detalhados dos dois modelos escolhidos podem ser observados no Apêndice 3.

Verifica-se que o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) do modelo 2 é mais satisfatório, confirmando o ajuste do modelo. Entretanto, outras variáveis devem ser analisadas, como a VIF – Fator de inflação da Variância. O ideal é que este seja igual a 1, trazendo mais estabilidade e significância estatística para o experimento, mostrando que os preditores não possuem correlação entre si.

Analisando os gráficos de resíduos e ajuste dos dois modelos, observa-se que os resíduos seguem distribuição normal com a média nula. Já nos gráficos de resíduos *versus* ordem tem-se o pressuposto de que os resíduos não apresentam tendências nem padrões quando exibidos em ordem temporal. Contudo, quando observam-se os histogramas de resíduos, tem-se uma melhor distribuição dos dados para o modelo 1.

Nos dois modelos, observou-se que a velocidade possui uma contribuição de 53,03% contra 1,01% do ângulo. Quando combinados os fatores ângulo-ângulo, tem-se 12,37% de contribuição. E por fim, quando combinam-se velocidade-velocidade-ângulo tem-se 6,89% de contribuição, e para velocidade-velocidade-ângulo-ângulo, tem-se 6,02%. As outras combinações não alcançaram valores significativos.

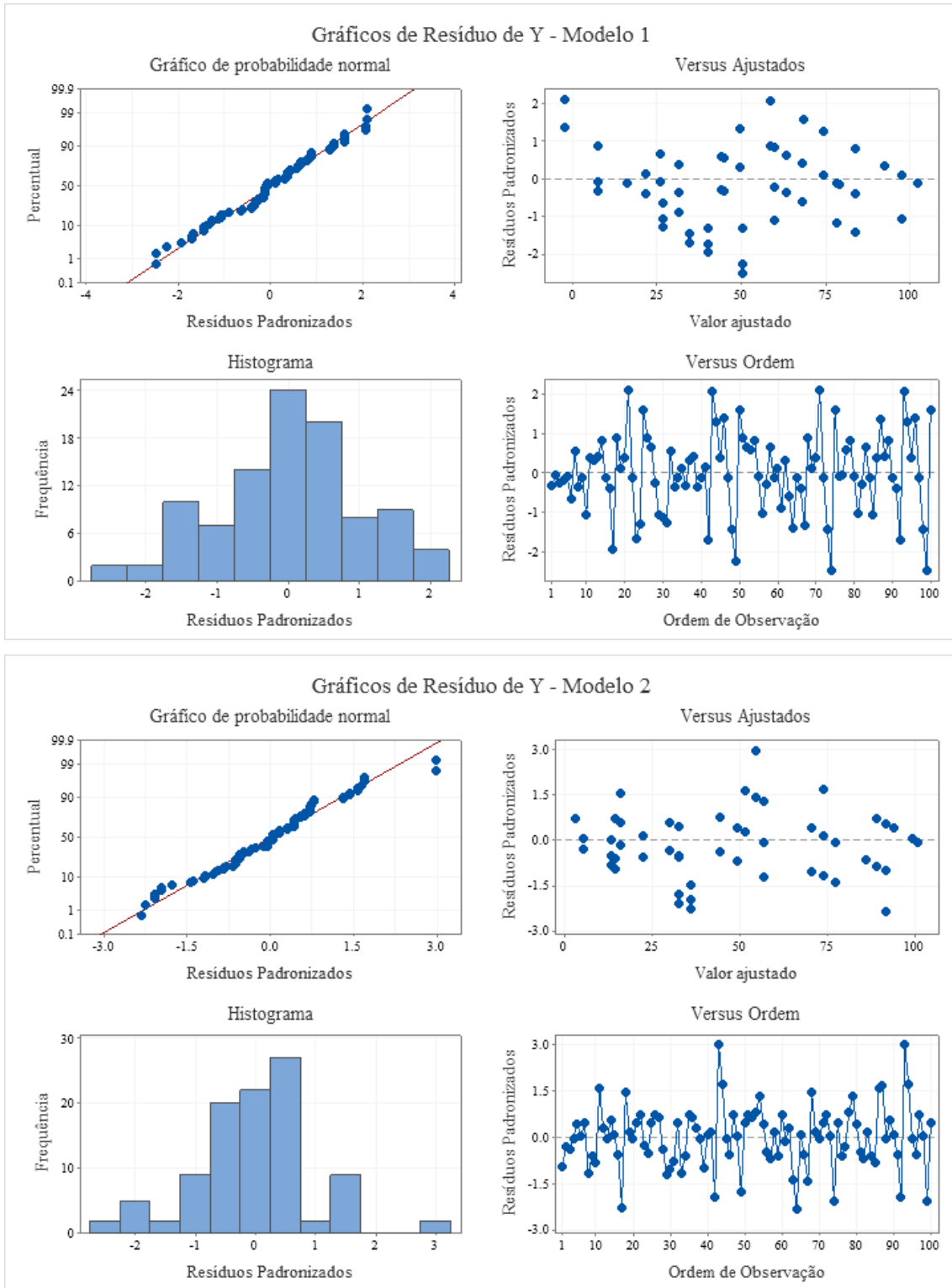
Figura 35. Gráficos de Contorno do metamodelo (1) e (2) respectivamente.



Fonte: Próprio Autor

Em termos físicos, observando o primeiro gráfico da Figura 35, entende-se que, se há necessidade de simular uma camada limite com altura  $\delta \approx 7,0 \text{ mm}$ , deve-se ajustar a velocidade do túnel de vento entre  $13 \text{ m/s} < V < 20 \text{ m/s}$  e o ângulo do flape da placa plana deve ficar em torno de  $A=0^\circ$ . Para esse mesmo  $\delta$  é possível aumentar a velocidade para  $26 \text{ m/s}$  ajustando o ângulo do flape para  $15^\circ$ , ou seja, definem-se os limites de altura de camada limite e velocidades que o túnel de vento disponível consegue simular.

Figura 36. Gráficos de Resíduos do metamodelo (1) e (2) respectivamente.



Fonte: Próprio Autor

#### 4.4. Estimativa do Potencial Eólico

Para cada curva de velocidade por ângulo de flape obtida, nos experimentos da Figura 33, geram-se os respectivos ajustes, como apresentado na Equação 3.23, obtendo os valores das constantes “a” e “b” para cada curva. Na sequência, utilizando a Equação 3.29 determinam-se as velocidades médias ( $\bar{V}$ ) de cada camada limite obtidas, apresentada na terceira coluna da Tabela 9. Por fim, determina-se o potencial eólico por área de turbina a partir da Equação 3.22, também apresentado na Tabela 9.

Tabela 9. Resultados do cálculo do Potencial Eólico.

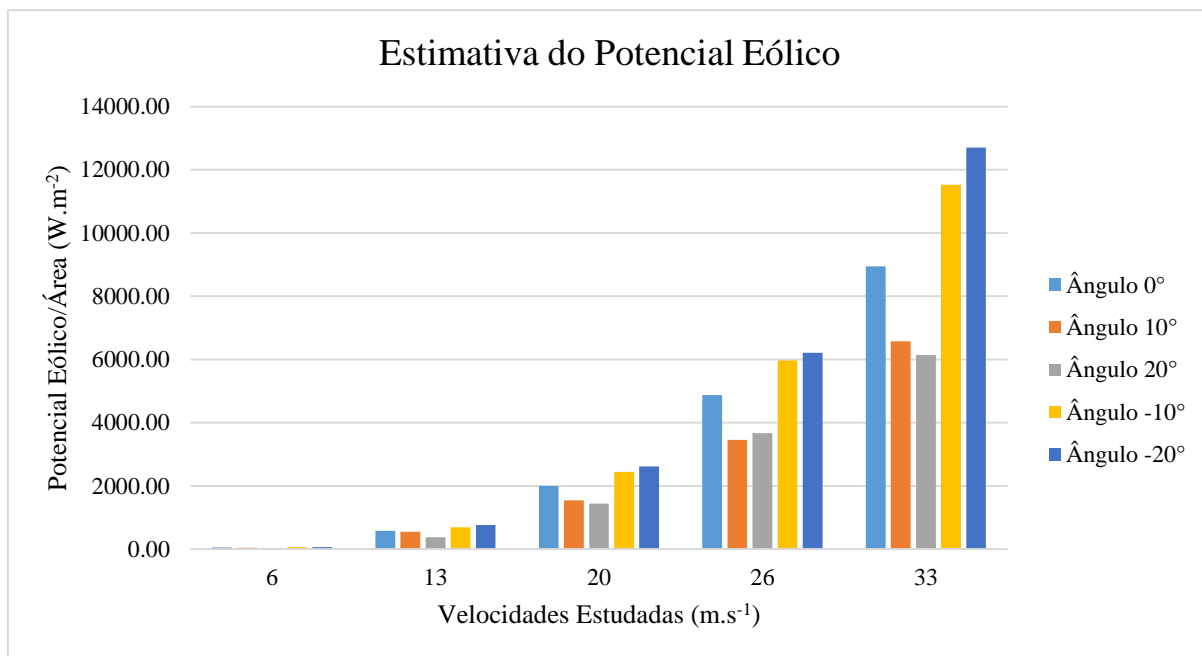
Ângulo	Velocidade de Entrada no TV (m.s <sup>-1</sup> )	Velocidade Média (m.s <sup>-1</sup> )	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	Potencial Eólico/Área (W.m <sup>-2</sup> )
0°	6	4,7175	1,043	54,75
	13	10,3425	1,046	578,60
	20	15,6325	1,046	1997,96
	26	21,0475	1,046	4876,44
	33	25,7700	1,045	8941,89
10°	6	4,4563	1,046	46,28
	13	10,1608	1,046	548,63
	20	14,3293	1,047	1540,24
	26	18,7650	1,046	3455,78
	33	23,2644	1,045	6579,05
20°	6	3,7870	1,045	28,38
	13	8,9434	1,047	374,47
	20	13,9969	1,049	1438,28
	26	19,1274	1,048	3666,89
	33	22,7386	1,045	6143,00
-10°	6	5,0417	1,046	67,02
	13	11,0032	1,045	696,06
	20	16,7119	1,048	2445,73
	26	22,5166	1,045	5964,82
	33	28,0174	1,048	11524,26
-20°	6	5,0687	1,046	68,11
	13	11,3123	1,05	759,99
	20	17,0990	1,046	2614,64
	26	22,8089	1,047	6212,01
	33	28,9543	1,046	12695,29

Fonte: Próprio Autor

Os resultados mostram uma sensibilidade do potencial eólico principalmente em relação à velocidade do vento. Já em relação à variação de ângulo, houve discreto aumento nos ângulos negativos. De forma geral, quanto mais alta a camada limite e

quanto maior a velocidade do escoamento, maior o potencial eólico de uma determinada região. Os resultados podem ser melhor visualizados na Figura 37.

Figura 37. Gráfico da Estimativa do Potencial Eólico para os diferentes ângulos e velocidades estudados.



Fonte: Próprio Autor

Conhecer o potencial eólico de uma região é fator determinante para instalar e dimensionar adequadamente turbinas eólicas. Além disso, sabendo a eficiência das turbinas que serão instaladas, consegue-se ainda prever a geração de energia elétrica provinda de uma determinada região.

## 5. CONCLUSÃO

De forma geral, foi possível utilizando o tubo de Pitot e o módulo de pressão, simular o desenvolvimento de camada limite utilizando o túnel de vento disponível para os estudos do presente trabalho.

No mapeamento da camada limite utilizando placa plana, observou-se que no final da seção de ensaios, foi possível estimar algumas alturas da CL, sendo necessário a utilização de outro instrumento de medição, já que a camada limite ainda estava em desenvolvimento, como por exemplo, na velocidade de 33 m.s<sup>-1</sup> em todos os ângulos estudados. Isso foi observado também para os ângulos de flape negativos nas velocidades mais altas.

Ao analisar a influência das diferentes combinações de velocidades e ângulos de flape na altura da camada limite, verificou-se pela análise de variância que a contribuição da variação do ângulo do flape é menor que a da velocidade. Já para a interação de ambos a contribuição é de 32,52%. Por estes resultados, é possível dizer que a camada limite sofre variação significativa ao variar o ângulo de flape e velocidade dentro do túnel de vento. Dessa forma, após analisar as outras variáveis estatísticas, concluiu-se que o modelo contendo os fatores principais e a interação entre eles é adequado e satisfaz aos pressupostos da análise.

Na busca de utilizar esse estudo na prática, foi proposto um ajuste do atual modelo encontrado. Assim, o estudo disponibilizou um metamodelo mais simples e um mais completo. Ambos os metamodelos demonstrados satisfazem o estudo podendo ser utilizados para determinar a altura da camada limite em outras combinações diferentes das estudadas neste trabalho. De forma que é possível, usando o aparato experimental “placa plana com flape”, simular camadas limites de diferentes alturas, em diferentes faixas de velocidade, o que é fundamental para o estudo de potencial eólico.

Por fim, de maneira geral, a intenção deste estudo foi determinar o perfil de velocidade dentro da camada limite, a fim de estimar o potencial eólico, a partir das velocidades médias encontradas. As combinações de ângulos e velocidades utilizando placa plana mostraram que as alturas das CLs cresceram linearmente nas velocidades mais altas, observando-se uma sensibilidade do potencial eólico para os ângulos negativos.

Portanto, para se ensaiar um escoamento sobre um terreno ou mesmo sobre uma torre eólica em modelo reduzido, é possível prever qual combinação de ângulo e velocidade deverá ser imposta na seção de ensaios para que se tenha uma CL com altura suficiente para cobrir o modelo ensaiado e, assim, ser possível simular uma situação mais próxima da real de um escoamento sobre torre eólica no campo ou de estimar o potencial eólico de um terreno.

### **5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros**

- Repetição do experimento utilizando instrumentos de medição mais precisos como anemômetro de fio quente, levando-se em consideração os resultados das velocidades mais altas;

- Utilização de obstáculos, telas, dentre outros, na entrada da seção de testes, a fim de controlar a intensidade turbulenta na seção de ensaios, buscando uma melhoria nos resultados;
- Ensaios de modelos de terrenos (em tamanho reduzido) sobre a placa plana com flape;
- Melhora no ajuste do modelo sugerido.

## REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). (2021). **Matriz Elétrica Brasileira**. <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9>>. Acesso em 19/07/2021.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). (2008). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª ed. 236 p., Brasília, 2008.
- ANDERSON, J. D. **Fundamentals of aerodynamics**. 3. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2001.
- ANDERSON JR., JONH D. **Fundamentos de engenharia aeronáutica: introdução ao voo**; tradução: Francisco Araújo da Costa; revisão técnica: Carlos Fernando Rondina Mateus. – 7. ed. – Porto Alegre: AMGH, 923 p., 2015.
- Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA). (2021). **Boletim anual de geração eólica 2021**. <<http://abeeolica.org.br/dados-abeeolica/>>. Acesso em 12/04/2023.
- Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA). (2023). **Boletim anual de geração eólica 2022**. <<http://abeeolica.org.br/dados-abeeolica/>>. Acesso em 16/12/2023.
- Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA). (2022). **Energia Eólica: Os bons ventos do Brasil**. INFOVENTO – 25. 18/03/2022. <[http://abeeolica.org.br/formato\\_docs/infovento](http://abeeolica.org.br/formato_docs/infovento)>. Acesso em 12/04/2023.
- BARBOSA, P.H.A. et al. **Wind Tunnel Simulation of Atmospheric Boundary Layer Flows**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol. 24, No. 3, p. 177-185, 2002.
- BARBOSA, T. P. **Túnel de Vento para Ensaio de Componentes**. Tese de Mestrado (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP). Bosch Termotecnologia, S.A. Julho, 2008.
- BARLOW, J. B.; RAE, W. H., POPE, A. **Low-speed Wind Tunnel Testing**. 3. ed. United State of America: John Wiley & Sons, Inc., 1984.
- BARLOW, J. B.; JUNIOR, W. H. R.; POPE, A. **Low-speed Wind Tunnel Testing**. 3. ed. United State of America: John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- BARROS NETO, B. de; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos, Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2. ed. Campinas - Brasil: Editora da Unicamp, 2001.
- BENEDICT, Robert P. **Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements**. 3. ed. New York: Wiley Interscience, 1984.
- BLESSMANN, J., 1982, **The Boundary Layer TV-2 Wind Tunnel of the UFRGS**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 10. p. 231-248.

BOX, G.E.P., HUNTER, J.S., HUNTER, W.G.H. (2005). **Statistics for Experimenters: Design, Innovation and Discovery**. Second edition. Wiley. 655 p., 2005.

BREITENBACH, G. **Análise do Potencial Eólico para a Geração de Energia Elétrica em São Francisco de Paula, RS, Utilizando Método Computacional WASP**. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Universitário Univates, Lajeado, Novembro de 2016.

CARDOSO, F. R. M. **Caracterização experimental de túneis de vento para a análise de potencial eólico**. Dissertação de Mestrado (UFG), Goiânia, 2020.

CASTRO, R. M. G. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada - Introdução à Energia Eólica**. Universidade Técnica de Lisboa / Instituto Superior Técnico - Deec / Área Científica De Energia. 4ª Ed, 2009.

ÇENGEL, Y. A. **Mecânica dos fluidos**. 5. ed. Carolina do Norte: Amgh, 2007.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos**. 6 ed. São Paulo, Brasil: The McGraw-Hill Companies, Inc and ARTMED Editora S.A., 2011.

COIMBRA, P.; TIBÚRCIO, J. **Geografia: uma Análise do Espaço Geográfico**. 3 ed. Harbra. São Paulo. 2006.

CONAN, B., CHAUDHARI, A., AUBRUN, S., VAN BEECK, J., HÄMÄLÄINEN, J., HELLSTEN, A. **Experimental and Numerical Modelling of Flow over Complex Terrain: The Bolund Hill**. *Boundary-Layer Meteorol* 158:183 – 208. 2016.

COSTA, L. T., RIBEIRO, M. C. C. **Propriedades dinâmicas de fluidos por simulação computacional: métodos híbridos atomístico-contínuo**. *Química Nova*, v. 33, nº 4, p. 938-944, 2010.

DELMÉE, G. J. **Manual de Medição de Vazão**. São Paulo, Brazil: Edgard Blücher Ltda 3rd ed., 2003.

DESMOND, C. J., SIMON J. WATSON, S. J., HANCOCK, P. E. **Modelling the wind energy resource in complex terrain and atmospheres. Numerical simulation and wind tunnel investigation of non-neutral forest canopy flow**. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 166, 48 – 60. 2017.

EFTHIMIOU, G. C., KUMAR P., GIANNISSI, S. G., FEIZ, A. A., ANDRONOPOULOS, S. **Prediction of the wind speed probabilities in the atmospheric surface layer**. *Renewable Energy* 132, 921 a 930. 2019.

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Eólica**. Ed. Manole, Barueri: 2011. ISBN: 978-85-204-3004-0.

FILHO, J.; SILVA, R. A. **Anemometria a Fio Quente: Princípios de Funcionamento, Montagem e Calibração**. *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão*, v. 12, n. 1, 20 nov. 2020.

FONTELLA, C. R. F. **Análise Numérica do Escoamento Turbulento em Área Urbana Empregando Simulação de Grandes Escalas**. Tese de Mestrado (UFRS). Porto Alegre, 2014.

FOX, R. W., MCDONALD, A. T., PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. GEN – Grupo Editorial Nacional, 8ª Ed. 2014.

FREDERIKSEN, C. **A Lista de Instalações de Teste de Túnel de Vento**. Janeiro de 2022. Disponível em <<https://dewesoft.com/pt/blog/lista-de-instalacoes-de-teste-de-tunel-de-vento>>. Acesso em 04/06/2023.

GANDOLFI, V. T. **Guia Básico de Instrumentos Meteorológicos**. Trabalho de Graduação Individual II (Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas – Departamento de Geografia). USP – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2020.

Global Wind Energy Council (GWEC). **Global Wind Report**, Março de 2021.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., citado na página 42, 2015.

JORGENSEN, F. E. **How to measure turbulence with hot-wire anemometers - a practical guide**. Dantec Dynamics A/S. 2005.

KAMADA, Y., QING'AN LI, MAEDA, T., YAMADA, K. **Wind tunnel experimental investigation off flow field around two-dimensional single hill models**. Renewable Energy 136, 1107 – 1118. 2019.

LIMA, C. G. **Estatística Experimental**. Aula 13: Experimentos Fatoriais. Faculdade de Zootecnia e Engenharia de São Paulo – USP, São Paulo, 2020.

LOUREIRO, J. B. R., FREIRE, A. P. S. **Experimental investigation of turbulent boundary layers over steep two dimensional elevations**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. October 2005 Vol. XXVII, Nº 4, October – December, 2005.

MANOUKIAN, A. M., DE PAULA, R. P., ANGELO, E. **Estudo Numérico-Computacional da Aerodinâmica de um tubo de Pitot**. Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 168-191, 2021.

MARQUES, M. T. A. **Obtenção da Altura da Camada Limite Planetária Através da Análise Espectral do Campo de Vento do Lidar Doppler**. Tese de Mestrado (IPEN – Autarquia Associada à Universidade de São Paulo), São Paulo, 2017.

MATTUELLA, J. M. L. **Avaliação em Túnel de Vento do Comportamento da Camada Limite Atmosférica em Terrenos Complexos**. Tese de Doutorado (UFRS). Porto Alegre, 2012.

MATTUELLA, J. M. L., LOREDO-SOUZA, A. M., OLIVEIRA, M. G. K., PETRY, A. P. **Wind tunnel experimental analysis of a complex terrain micrositng**. Renewable and Sustainable Energy Review 54, 110–119, 2016.

MORAN, M. J. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., citado na página 42, 2013.

MOREIRA, G. A. A. **Modelagem numérica da camada limite atmosférica com validação experimental**. Dissertação de Mestrado (UFMG), Belo Horizonte, 2007.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. John Wiley & Sons, Inc. 8ª Ed, Arizona State University, 2013.

NÚÑEZ, G. J. Z. **Construção e Calibração do Túnel de Vento do Laboratório de Estudos Aerodinâmicos – LEA**. Revista Design & Tecnologia. Vol. 11, Nº 22. 2021.

NÚÑEZ, G. J. Z., LOREDO-SOUZA A. M., ROCHA M. M. **Uso do Túnel de Vento como Ferramenta de Projeto no Design Aerodinâmico**. Revista Design & Tecnologia. Vol. 2, p. 10. 2012.

PFISTER, C. **History of Climate, International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences**. Suíça, 2ª Ed. p. 865-872, 2015.

PIRES, L. B. M., BRAGA de PAULA, I., FISCH, G., GIELOW, R., GIRARDI, R. M. **Simulations of the Atmospheric Boundary Layer in a Wind Tunnel with Short Test Section**. J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos, Vol. 5, Nº 3, pp. 305 - 314, Jul. - Sep., 2013.

PRANDTL, L. **Applications of modern hydrodynamics to aeronautics**. 1904.

QUEIROGA, A. L. **Projeto de Túnel de Vento**. Tese de Final de Curso em Engenharia Aeroespacial. Faculdade UNB (Universidade de Brasília) Gama, Brasília - DF. 2022.

RAMASESHA, S. **Challenges in the quest for clean energies**. Resonance, v. 18, n. 8, p. 756 – 770, citado 2 vezes nas páginas 41 e 43, 2013.

RIBEIRO, G. L. **Parques Eólicos: impactos socioambientais provocados na região da praia do Cumbe, no município de Aracati Ceará**. Tese de Doutorado (Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho). Rio Claro- SP, 2013.

ROBALLO, S. T., FISCH, G., GIRARDI, R. M. **Escoamento Atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA): Parte II – Ensaio no Túnel de Vento**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.24, n.1, 87-99, 2009.

RODRÍGUEZ, P. M., RODRÍGUEZ, E. M., LOREDO-SOUZA, A. M., SCHETTINI, E. B. C. **Utilización de anemómetro de hilo caliente a temperatura constante para mediciones de velocidad de aire en túnel de viento**. RIELAC – Revista de Ingeniería Electrónica Automática y Comunicaciones. Vol. XXXV 1/2014 p.78-92, Enero – Abril, 2014.

SCOTTON, J. A. **Determinação Experimental em Túnel de Vento das Velocidades Incrementais sobre Morros e Taludes**. Tese de Doutorado (UFRS). Porto Alegre, 2020.

- SILVEIRA, K. M., POSSAMAI, T. S.. **Análise experimental da medição de velocidade com um tubo de Pitot em escoamento interno.** 2001.
- STULL, R. B. An introduction to boundary layer meteorology. Springer Science & Business Media, 1988. ISBN 9027727686.
- VAICBERG, H., VALIATT, G. L. C., QUEIROZ, M. F. **Energia Eólica Offshore: Um overview do cenário global e o contexto brasileiro.** Revista de Direito e Negócios Internacionais da Maritime Law Academy – MLAW. International Law and Business Review. Vol. 1, nº 1, Janeiro a Junho - 2021.
- VIOLA, M.R.; de MELLO, C.R.; CHOU, S.C.; YNAGI, S.N.; GOMES, J.L. **Assessing climate change impacts on upper Grande river basin hydrology, Southeast Brazil.** Internacional Journal of Climatology, Brasil, v.35, n. 6, p.1054-1068, 2015.
- WAGNER, J. H. **Introduction to Wind Energy Systems.** In: EPJ Web of Conferences. EDP Sciences, p.5, 2018.
- WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos.** 6. ed. São Paulo, Brasil: The McGraw-Hill Companies, Inc and ARTMED Editora S.A., 2007.
- ZHENG, K., TIAN, W., QIN, J., HUI HU. **An experimental study on the turbulent flow over two-dimensional plateaus.** Wind Energy Symposium. 8 – 12 January, Kissimmee, Florida. 2018.

## APÊNDICES

### APÊNDICE 1 – Resumo dos Artigos Apresentados no Tópico 2.3 (Camada Limite - Análise Experimental em Túnel de Vento)

Efthimiou et al. (2019) propuseram um estudo que aborda o uso de um modelo de previsão de probabilidades de velocidades do vento na camada limite atmosférica, sendo este validado por experimento em túnel de vento de camada atmosférica. Os autores enfatizam que a previsão precisa das probabilidades de velocidade do vento na camada de superfície atmosférica é muito importante para estudos de avaliação de energia eólica e muitas outras aplicações práticas, como projeto e operação de turbinas eólicas e exposição humana aos extremos do vento. Na primeira parte do estudo, a distribuição beta é validada posteriormente com o banco de dados de velocidade do vento do “FUSION Field Trial 2007” (FFT-07), experimento de campo que traça várias condições de estabilidade atmosférica. O modelo é aplicado sem qualquer alteração em suas constantes e um alto grau de concordância com o experimento de campo é alcançado. A segunda parte do artigo inclui a incorporação da distribuição beta na metodologia que utiliza as equações de Navier-Stokes médias de Reynolds (do inglês “Reynolds Averaged Navier Stokes” - RANS). Inicialmente, o modelo “RANS-beta” é validado comparando com medições de velocidade do vento realizadas em um túnel de vento sobre um terreno acidentado. Os experimentos foram realizados pelo Laboratório de Túnel de Vento Ambiental - (EWTL) da Universidade de Hamburgo. Neste estudo, o caso do escoamento da camada limite sobre uma superfície muito rugosa foi escolhido para a validação. O escoamento foi modelado fisicamente em uma escala geométrica de 1:225 e medições de velocidade pontuais foram realizadas por meio de Anemometria Laser Doppler (LDA). Os dados de velocidade são dimensionados para uma altura de referência em escala real de  $z_{ref} = 100$  m, com velocidades de vento de referência  $U_{ref}$  variando entre 4,75 e 6,00  $m.s^{-1}$ . O comprimento de rugosidade experimental no terreno foi estimado igual a  $z_o = 1,53$  m. Os percentis experimentais de velocidade foram 25%, 50% e 75%, todos altamente dependente da altura. Os perfis dos percentis seguiram a lei da potência tanto no experimento quanto no modelo. Os resultados RANS-beta comparados com as medições experimentais obtiveram uma boa concordância geral. No entanto, no caso do túnel de vento, o modelo tende a superestimar a velocidade máxima do vento.

Kamada et al. (2019) apresentaram em seu estudo a estrutura turbulenta do escoamento em torno de um modelo de colina bidimensional colocado em um escoamento de camada limite com experimento em túnel de vento. Para avaliar o efeito natural do vento no modelo proposto por meio de experimentos em túnel de vento, uma grade de turbulência ativa e um quadro de geração de camada limite reproduzindo a distribuição vertical da camada limite atmosférica foram instaladas na saída do túnel (diâmetros das hastes metálicas iguais a 1,5 mm, 2,0 mm e 2,5 mm). Os experimentos foram realizados em túnel de vento considerado pequeno, de comprimento 5,1 m (0,60 m x 0,60 m) com velocidade máxima de  $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Neste experimento, o escoamento foi controlado em um estado neutro sem gradiente de temperatura. As investigações de campo de velocidade do escoamento foram realizadas usando um PIV (Velocimetria por Imagem de Partículas), sistema capaz de realizar uma medição simultânea, não intrusiva e multiporta. Já o campo de velocidade do escoamento turbulento gerado pelas grades de turbulência ativa foi medido com um sistema de anemômetro de fio quente do tipo temperatura constante MiniCTA (fabricado pela DANTEC), e a sonda foi uma sonda de fio quente do tipo X (fio de tungstênio banhado à platina). O modelo de colina foi feito de duralumínio, era uma forma de colina bidimensional com altura de 200 m modelada na escala 1:4000. Portanto, a altura é de  $H/450$  mm e os comprimentos horizontais foram projetados com dois tipos de gradientes  $L \frac{1}{4} 2H$  (modelo 1H) e  $4H$  (modelo 2H). Como resultado, verificou-se que a velocidade do vento foi aumentada ao longo da encosta a montante da colina e o escoamento foi separado no topo da colina. Além disso, a zona de recirculação do modelo de colina 1H era maior do que a do modelo de colina 2H. A intensidade da turbulência no topo da colina foi maior do que no modelo 1H. Enquanto isso, a intensidade da turbulência atrás da colina tornou-se pequena. Esta análise experimental foi estabelecida como uma importante ferramenta de projeto, validando os parâmetros do vento, de forma a tornar a geração de energia mais precisa e confiável em terrenos complexos.

Zheng et al. (2018) estudaram as características de escoamento em planaltos bidimensionais utilizando experimentos em túnel de vento de camada limite atmosférica por meio de medições PIV. Os experimentos foram realizados em túnel de vento localizado em Shanghai JianTong University. Este túnel possui circuito fechado com 8,0 m de comprimento e seção de testes de 1,2 m x 0,90 m. Torres triangulares foram colocadas no início da seção de teste e os blocos de madeira foram cobertos no piso do

túnel de vento para simular a camada limite atmosférica neutra. Os efeitos das encostas a barlavento e sotavento nas características do escoamento turbulento foram estudados. Os resultados indicaram que a velocidade do escoamento diminui a montante do lado de barlavento em comparação com o fluxo não perturbado, como efeito de bloqueio de platô. Os efeitos dos declives e degraus não são evidentes, com a principal diferença ocorrendo perto do solo.

No artigo escrito por Desmond et al. (2017), uma série de experimentos foi conduzida em um túnel de vento de Camada Limite Atmosférica estratificável, usando condições neutras e estáveis, em que a cobertura da floresta foi representada pelo uso de um modelo arquitetônico de árvores. Esses experimentos foram replicados em simulações numéricas por meio da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) usando uma metodologia previamente validada. O túnel da camada limite atmosférica utilizado foi do tipo EnFlo localizado na Universidade de Surrey no Reino Unido. Este possui exaustor duplo com uma seção operacional de 1,5 m de altura  $\times$  3,5 m de largura  $\times$  20 m de comprimento e uma faixa operacional de 0,30 – 4,5 m.s<sup>-1</sup>. A estratificação foi obtida por meio de elementos de aquecimento totalmente ajustáveis (405 kW) na entrada junto com aquecimento (5,0 kW.m<sup>-2</sup>) e resfriamento (1,0 kW.m<sup>-2</sup>). A camada limite atmosférica foi simulada no túnel por meio de uma tela de alisamento em colmeia, espirais Irwin e uma série de ângulos metálicos dispostos no piso inferior do túnel. As medições de velocidades foram feitas por Anemometria Laser Doppler (LDA) de dois componentes Dantec Fibre-Flow. A escala utilizada foi de 1:300. Tanto as simulações numéricas quanto os dados experimentais mostram que a estabilidade atmosférica tem um significativo efeito sobre o desenvolvimento e extensão da esteira gerada pela floresta e sobre a prevalência das características de escoamento da cobertura. A análise mostra que as estratificações estáveis têm um impacto significativo sobre a característica dos escoamentos, sendo possível incluir efeitos florestais e de flutuabilidade em simulações numéricas usando dois conjuntos de termos de origem e destino e alcançam uma convergência satisfatória. No entanto, é mostrado que as simulações numéricas superestimam os efeitos da estratificação térmica ao usar a configuração padrão.

Conan et al. (2016) propuseram um estudo conjunto do estado da arte sobre duas abordagens para modelar o escoamento atmosférico sobre a colina Bolund: um teste de túnel de vento e uma Simulação de Grande Escalas (do inglês, “Large Edge Simulation” - LES). A abordagem tem a particularidade de descrever os dois métodos em paralelo,

afim de destacar suas semelhanças e diferenças. O trabalho fornece uma primeira comparação detalhada entre medições de campo, experimentos em túnel de vento e simulações numéricas. A abordagem sistemática e quantitativa utilizada para a comparação contribui para uma melhor compreensão dos pontos fortes e fracos de cada modelo. O túnel de vento usado foi o modelo VKI-L2 localizado em “von Karman Institute” na Bélgica. Esta instalação do tipo Eiffel está equipada com  $0,35\text{ m} \times 0,35\text{ m} \times 2,0\text{ m}$  de seção de teste possuindo velocidade máxima de  $35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  usando um motor de 4,4 kW. O piso da seção de teste foi adaptado para simular o escoamento atmosférico. A técnica de velocimetria (PIV) foi usada ao longo do plano vertical central da seção de teste. Já a anemometria de fio quente foi usada para caracterizar a velocidade de entrada, perfis de turbulência e espectros turbulentos, e a incerteza associada é inferior a 1,0% para a velocidade média e menos de 2,5% para os termos de momentos de segunda ordem. A geração da camada limite semelhante à atmosfera foi realizada usando um conjunto de geradores de turbulência, colocado adequadamente no piso da seção de teste a montante da área de trabalho e na entrada da seção de teste para reproduzir a velocidade e perfis de turbulência correspondentes à rugosidade do terreno. Na entrada da seção de teste, uma cerca baixa fornece uma perturbação inicial à camada limite e aumenta o nível de turbulência. Então o piso é coberto com placas e blocos de lego. O tamanho e a densidade dos geradores de camada limite são adaptados para se ajustar o mais próximo possível ao perfil real do vento medido. Apesar das diferenças fundamentais de modelagem, ambas as técnicas resultam em apenas 5% de diferença na velocidade média do vento e 15% na energia cinética turbulenta (TKE). A comparação conjunta torna possível identificar as características mais difíceis de modelar: o escoamento próximo ao solo e a forma da colina. Quando comparados aos dados de campo, ambos os modelos alcançam 11% de erro para a velocidade média do vento, que está perto do melhor desempenho relatado na literatura. Para o TKE, uma grande melhoria é encontrada usando o modelo LES em comparação com vários estudos (erro de 20%). Os resultados do túnel de vento estão na faixa baixa de erro quando comparado a outros estudos (erro de 40%). Esta comparação destaca o potencial de tais abordagens e fornece orientações para a melhoria da modelagem de escoamento complexa.

Mattuella et al. (2016) investigaram a intensidade de turbulência média na camada limite atmosférica com um sistema de anemometria de fio quente. O artigo apresentou também uma revisão da contribuição que os túneis de vento têm feito recentemente para

a modelagem física de ambos o campo de velocidade e a intensidade de turbulência como metodologia para o estudo da camada limite atmosférica em um terreno complexo, descrevendo uma simulação experimental da camada limite atmosférica em um túnel de vento sobre uma área complexa para caracterizar o escoamento médio (descolamento e recolocamento) e a intensidade da turbulência com ênfase na produção de energia eólica. Os experimentos foram conduzidos em túnel de vento de camada limite atmosférica de Joaquim Blessmann localizado no Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O túnel é de baixa velocidade e retorno fechado. Tem uma relação comprimento/altura na seção de teste principal maior que 10 e dimensões de 1,30 m x 0,90 m x 9,32 m (largura/altura/comprimento). A velocidade máxima do vento nesta câmara, com escoamento suave e uniforme é de 42 m.s<sup>-1</sup>. A aquisição dos dados foi realizada usando um anemômetro Dantec Dynamics, Sistema 90 Streamline NS com frequência de 2,0 kHz. O terreno complexo citado está localizado no estado do Espírito Santo – Brasil, compreendendo um morro principal com declive de 34°, circundado por vários outros mais baixos. O modelo foi construído em uma escala de 1:1000. A camada limite atmosférica foi simulada com a utilização de dois tipos de métodos: rugosidade e barreira. O primeiro empregava blocos de madeira que cobriam o piso do túnel e o segundo empregou placas triangulares perfuradas na entrada da câmara de teste. O experimento empregou duas categorias de terrenos: o plano e o moderadamente áspero, correspondendo, respectivamente, ao expoente da lei de potência  $p = 0,11$  e  $p = 0,23$ . Os perfis de vento do terreno complexo foram correlacionados com os do terreno plano para mostrar as mudanças da velocidade e mostram a extensão da esteira de turbulência causada pela topografia variável da área. Com base nos resultados experimentais, eles sugeriram que o coeficiente de potência da turbina eólica localizada na descida era maior do que o do terreno plano. No entanto, as cargas de fadiga atuantes nas turbinas eólicas também foram aumentadas. Os resultados demonstraram que o perfil de velocidade e o perfil de intensidade de turbulência variam significativamente ao longo da área complexa, que torna necessária uma avaliação experimental precisa para certificar o leiaute de microrregiões. As perdas de energia devido aos efeitos de esteira podem facilmente atingir 20% da energia total, o que pode tornar uma planta inviável.

Pires et al. (2013) apresentaram um estudo de três diferentes dispositivos passivos (torres, telas e um tapete) separadamente e em várias combinações, para simular a camada limite atmosférica em um túnel de vento com uma câmara de teste curta (465 mm x 465

mm x 1200 mm). A influência das distâncias entre esses dispositivos na formação da CLA é estabelecida, e a otimização da variação de espessuras das telas (fina, média e grossa) na perda de pressão é explorada. Este trabalho foi realizado no túnel de vento subsônico aberto comercialmente disponível “Plinth & Partners LDD Wokingham Berkshire England” (Nº de série 44/5065 TE) no Laboratório “Kwein Lien Feng” do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)/DCTA, São José dos Campos, SP, Brasil. A câmara de teste do túnel utilizada tem uma altura de 460 mm e a redução de escala em relação ao tamanho real foi de 1:1000. As medições de anemometria de fio quente foram realizadas com uma sonda BL de fio único (“Dantec 55P15”) do anemômetro de fio quente de temperatura constante (“DANTEC Streamline bridge”). Para este estudo, foi utilizado um aparato de canal com largura de 410 mm, usado para estender a seção de teste para a formação do CLA. A velocidade máxima do vento foi de  $33 \text{ m.s}^{-1}$ . Inicialmente, os espirais e telas grossas, médias e finas foram testados separadamente. Posteriormente, foram testadas combinações desses dispositivos. Em seguida, uma otimização das posições das torres e telas foi feita com distâncias de 150 e 300 mm da tela. Por fim, o tapete foi inserido para realizar o ajuste fino da rugosidade desejada. A métrica utilizada para otimizar a simulação do terreno rural foi pelo coeficiente  $\alpha$  da lei da potência, que foi assumido igual a 0,15. A CLA foi totalmente desenvolvida em  $x=1120 \text{ mm}$ , apresentando diferenças não significativas com a combinação de espirais e tela fina, devido aos diferentes espaços entre as espirais e a tela (150 mm ou 300 mm). A combinação dos pináculos com a tela média moveu a CLA para a posição  $x = 1420 \text{ mm}$ , com o maior desvio quadrado médio para os pináculos distantes 300 mm da tela atingindo  $3,0 \text{ m.s}^{-1}$  próximo à superfície e  $0,5 \text{ m.s}^{-1}$  na altura de 260 mm. Para a combinação das torres com tela grossa, a CLA não foi desenvolvida dentro da seção da câmara de teste, apresentando um perfil de velocidade do vento irregular, necessitando de uma seção de teste mais longa.

Loureiro et al. (2005) apresentaram um estudo de laboratório do comportamento de camadas limite turbulentas sobre elevações topográficas íngremes. Dois tópicos principais de interesse foram tratados: (i) investigar e caracterizar a região de escoamento separada que é formada no lado esquerdo da elevação, e (ii) avaliar os efeitos das condições de estabilidade de escoamento nas propriedades de camadas limite sujeitas à elevação da superfície. Para realizar esta tarefa, investigações em canal de água e túnel de vento foram conduzidas. Para o primeiro caso, uma estratificação neutra da camada

limite foi simulada no canal de água do Laboratório de Hidráulica (FEUP). As velocidades média e turbulenta foram medidas por meio da anemometria laser-Doppler. Já para o segundo caso, a investigação experimental foi realizada em túnel de vento de alta turbulência, baixa velocidade e circuito aberto localizado no Laboratório de Mecânica da Turbulência do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PEM/COPPE/UFRJ). A seção de teste tem um comprimento total de 10 m e uma área de seção transversal de 0,67 x 0,67 m. A velocidade de escoamento potencial pode variar de zero a 3,5 m.s<sup>-1</sup> com níveis de intensidade de turbulência de escoamento livre de cerca de 2,0%. A medição simultânea dos campos de velocidade e temperatura foram realizadas com auxílio de anemometria térmica. Os resultados forneceram uma descrição completa das camadas internas ao longo da colina e dentro da região de recirculação. Os dados refinados da parede próxima contribuíram para o cálculo da velocidade de fricção ao longo da colina por diferentes métodos. Esses resultados permitiram a caracterização dos efeitos da estratificação sobre o fator de aceleração, ou seja, a máxima aceleração do fluxo no topo da colina. O artigo introduziu originalmente o conceito do fator de aquecimento/desaceleração, a fim de estudar o comportamento do campo de temperatura na crista da elevação da camada limite.

APÊNDICE 2 – Tabelas e figuras que representam os resultados de cada velocidade em ordem crescente (6 m.s<sup>-1</sup> a 33 m.s<sup>-1</sup>).

- VELOCIDADE 6 m.s<sup>-1</sup>

Tabela 10. ANOVA Fator Ângulo - V = 6 m.s<sup>-1</sup>.

a) Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ângulo	4	27,03	56,63%	27,03	6,87	6,758	0.010
Erro	15	20,70	43,37%	20,70	1,380		
Total	19	47,73	100.00%				

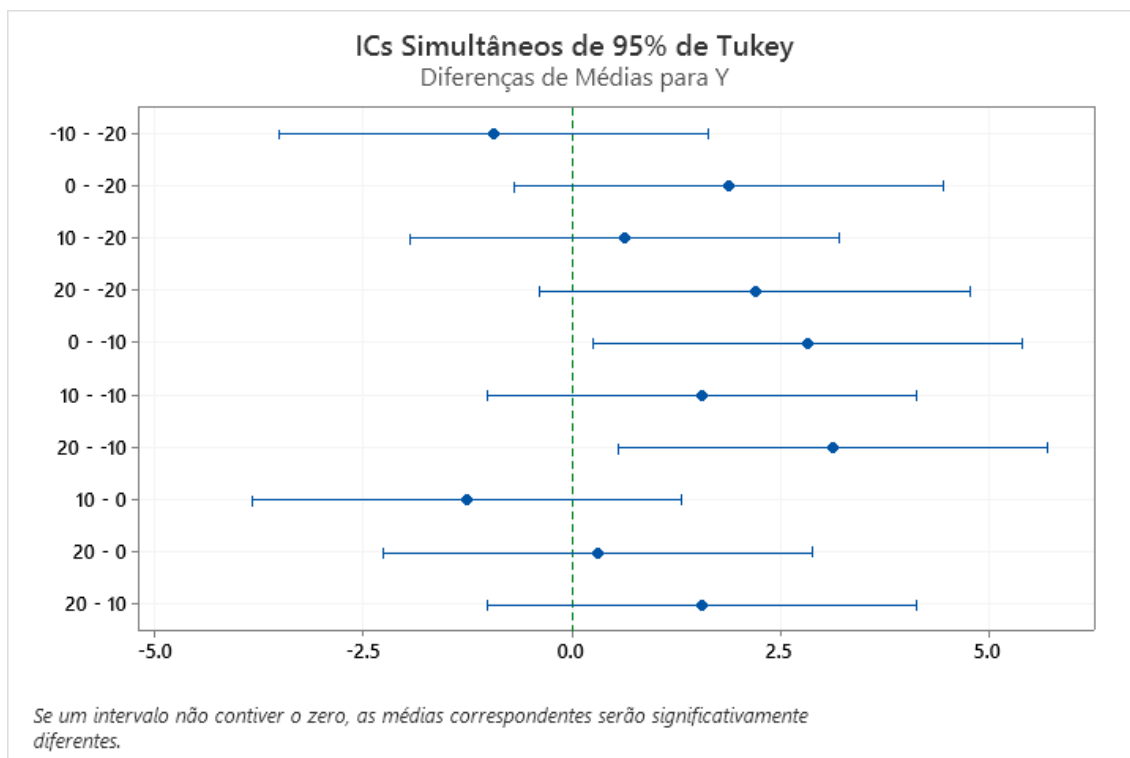
b) Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	PRESQ	R2 (pred)
1,17482	56,63%	45,06%	36,8056	22,90%

Fonte: Próprio Autor

Figura 38. Gráficos resultados ANOVA para velocidade imposta de 6 m.s<sup>-1</sup>.

a) Teste de Tukey



Fonte: Próprio Autor

b) Gráficos de Resíduos de Y



Fonte: Próprio autor

- VELOCIDADE 13 m.s<sup>-1</sup>.

Tabela 11. ANOVA Fator Ângulo - V = 13 m.s<sup>-1</sup>.

a) Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ângulo	4	76,563	91,16%	76,563	19,141	38,68	0,000
Erro	15	7,422	8,84%	7,422	0,4948		
Total	19	83,984	100,00%				

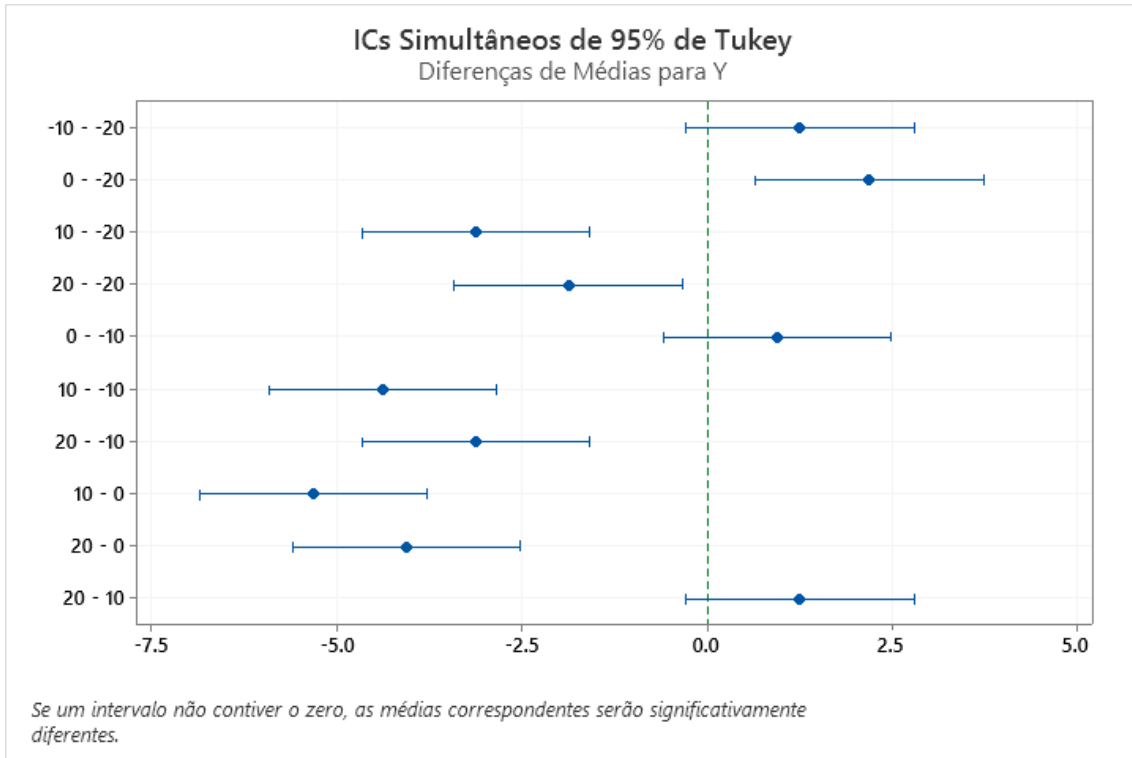
b) Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	PRESQ	R2 (pred)
0,703414	91,16%	88,81%	13,1944	84,29%

Fonte: Próprio autor

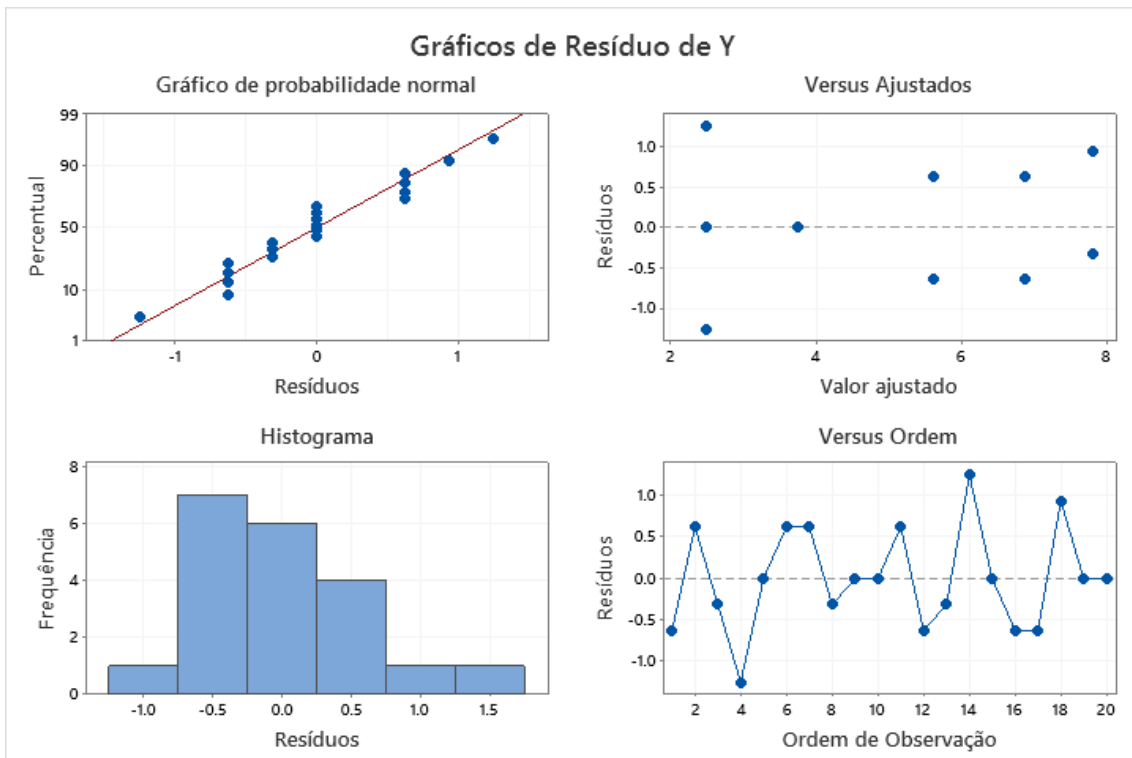
Figura 39. Gráficos resultados ANOVA para velocidade imposta de 13 m.s<sup>-1</sup>.

a) Teste de Tukey



Fonte: Próprio autor

b) Gráficos de Resíduos de Y



Fonte: Próprio autor

- VELOCIDADE 20 m.s<sup>-1</sup>.

Tabela 12. ANOVA Fator Ângulo - V = 20 m.s<sup>-1</sup>.

a) Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ângulo	4	128,594	94,82%	128,594	32,1484	68,58	0,000
Erro	15	7,031	5,18%	7,031	0,4687		
Total	19	135,625	100.00%				

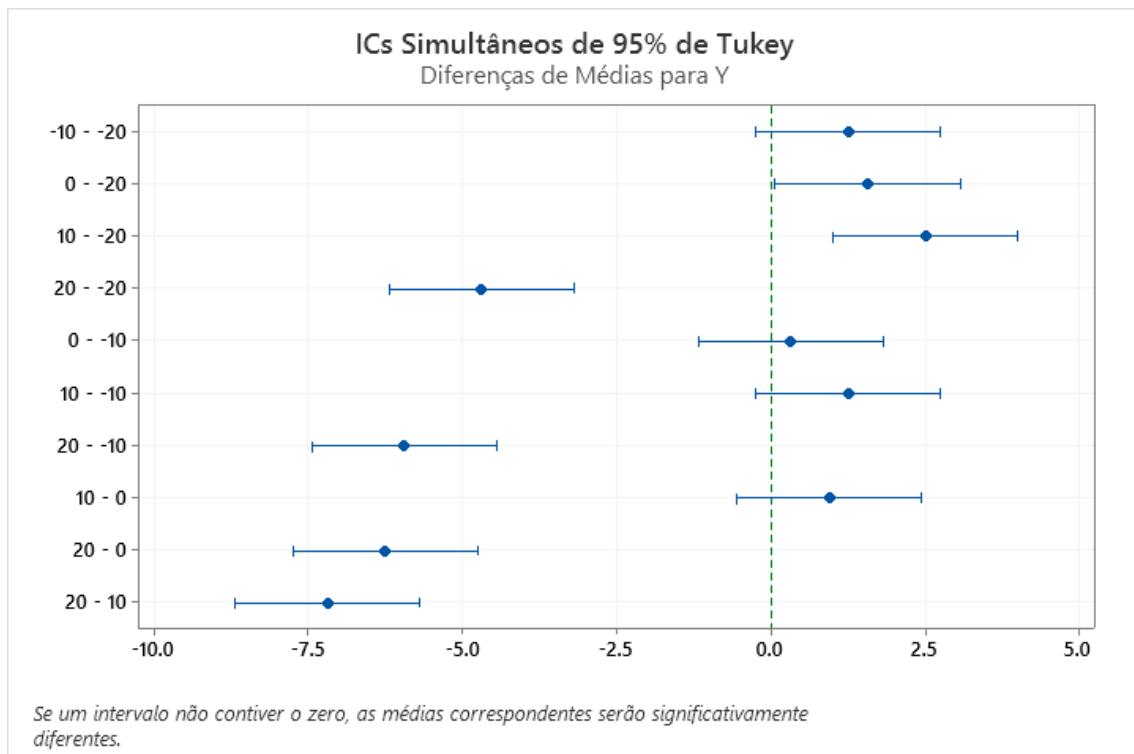
b) Sumário do modelo

S	R2	R2 (aj)	PRESQ	R2 (pred)
0,684653	94,82%	93,43%	12,5	90,78%

Fonte: Próprio autor

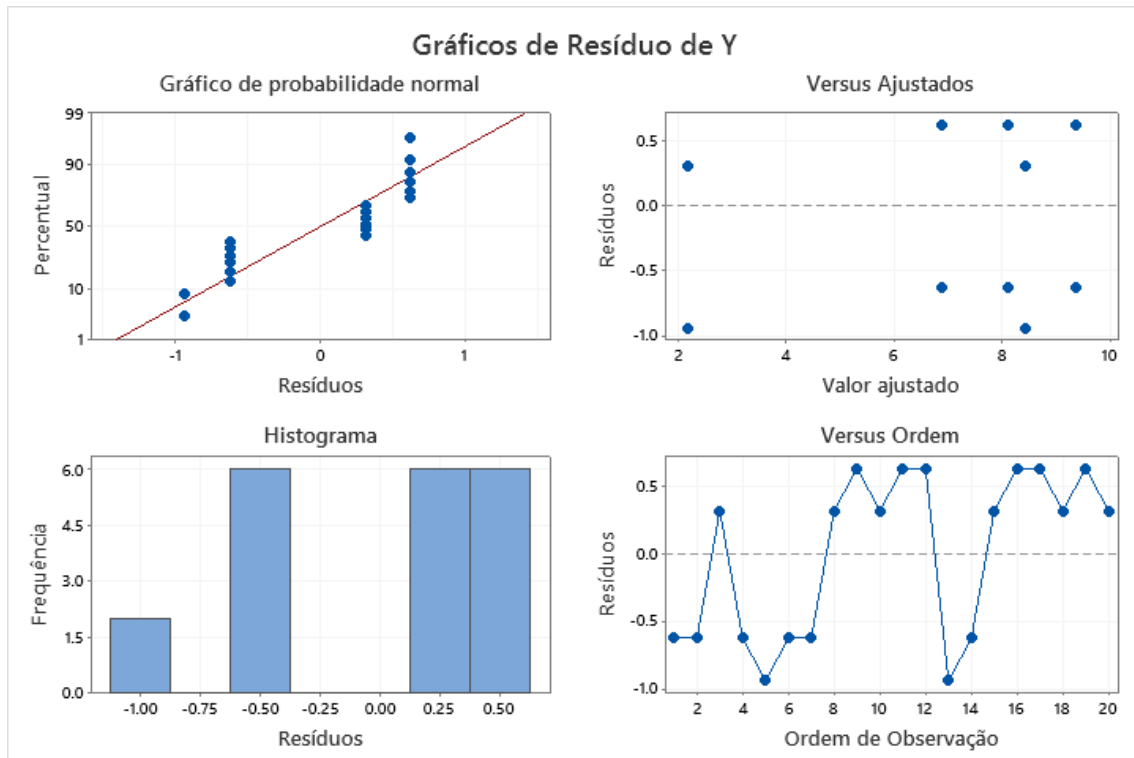
Figura 40. Gráficos resultados ANOVA para velocidade imposta de 20 m.s<sup>-1</sup>.

a) Teste de Tukey



Fonte: Próprio autor

b) Gráficos de Resíduo de Y



Fonte: Próprio autor

- VELOCIDADE 26 m.s<sup>-1</sup>.

Tabela 13. ANOVA Fator Ângulo - V = 26 m.s<sup>-1</sup>.

a) Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ângulo	4	133,91	86,61%	133,91	33,477	24,25	0,00
Erro	15	20,70	13,39%	20,70	1,380		
Total	19	154,61	100,00%				

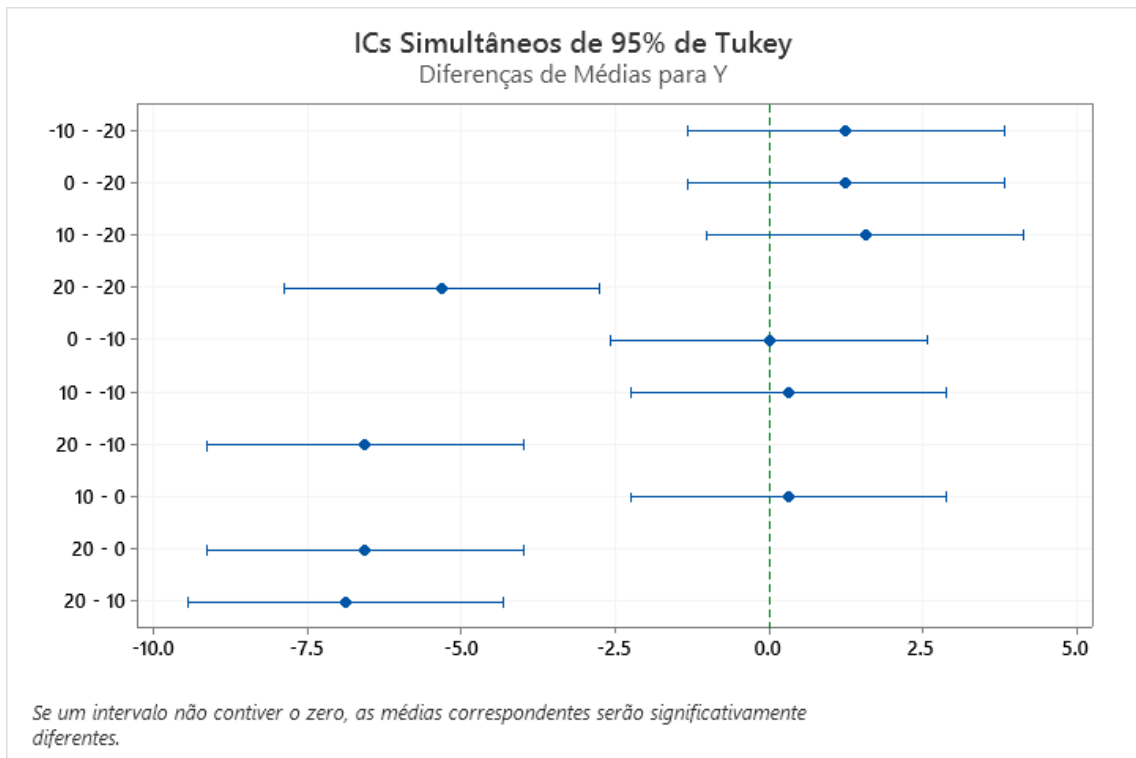
a) Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	PRESQ	R2 (pred)
1,17482	86,61%	83,04%	36,8056	76,19%

Fonte: Próprio autor

Figura 41. Gráficos resultados ANOVA para velocidade imposta de 26 m.s<sup>-1</sup>.

a) Teste de Tukey



Fonte: Próprio autor

b) Gráficos de Resíduo de Y



Fonte: Próprio autor

- VELOCIDADE – 33 m.s<sup>-1</sup>.

Tabela 14. ANOVA Fator Ângulo - V = 33 m.s<sup>-1</sup>.

a) Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ângulo	4	7,5	73,28%	7,5	1,875	10,29	0,00
Erro	15	2,73	26,72%	2,734	0,1823		
Total	19	10,234	100.00%				

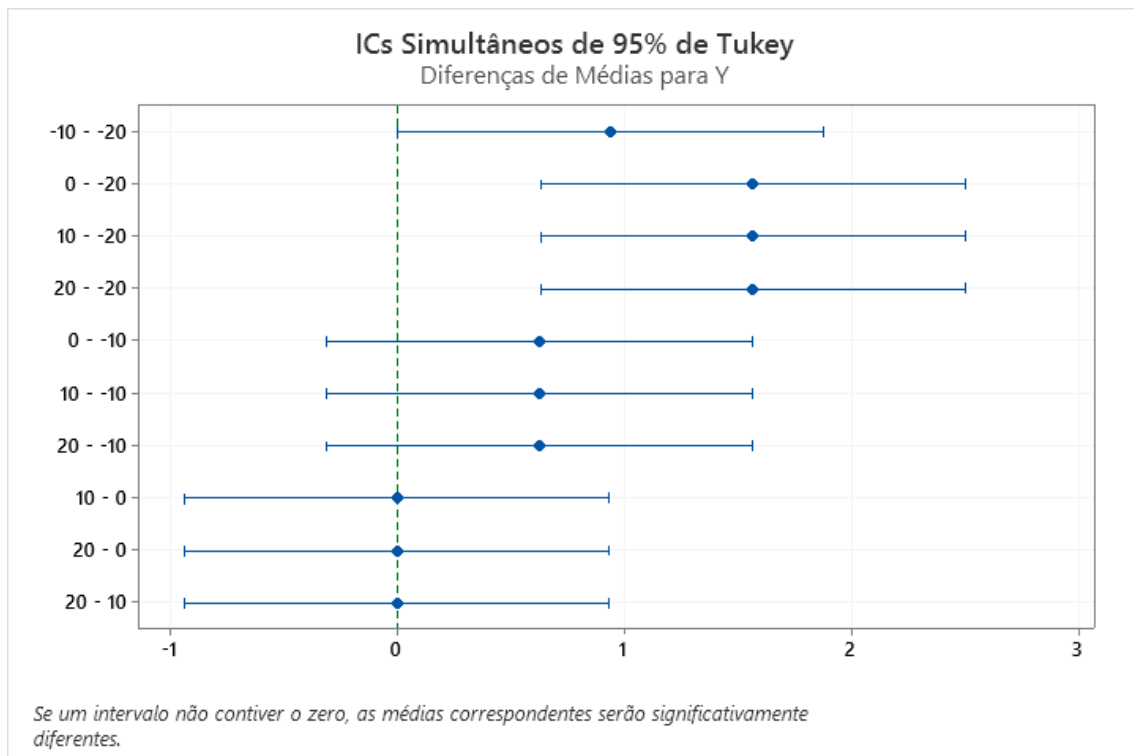
b) Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	PRESQ	R2 (pred)
0,426956	73,28%	66,16%	4,8611	52,50%

Fonte: Próprio autor

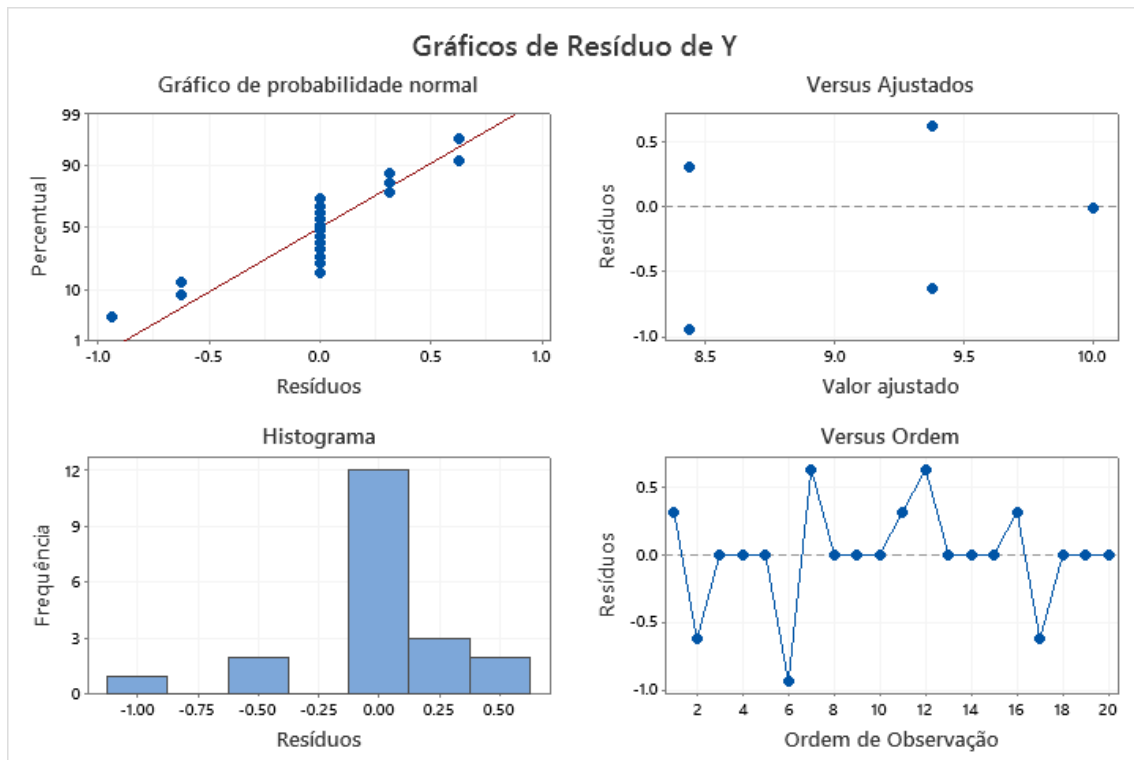
Figura 42. Gráficos resultados ANOVA para velocidade imposta de 33 m.s<sup>-1</sup>.

a) Análise de Variância



Fonte: Próprio autor

b) Gráficos de Resíduo de Y



Fonte: Próprio autor

APÊNDICE 3 – Tabelas que representam os resultados dos metamodelos escolhidos.

**Equação de Regressão – Modelo (1)**

$$\delta = 15.73 + 2.621 \text{ Velocidade} \\ - 0.243 \hat{\text{Ângulo}} \\ - 0.0717 \hat{\text{Ângulo}} * \hat{\text{Ângulo}}$$

Tabela 15. Coeficientes para Resposta Transformada – Modelo (1)

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	-15.73	5.23	(5.35; 26.10)	3.01	0.003	
Velocidade	2.621	0.213	(2.199; 3.044)	12.31	0.000	1.00
Ângulo	-0.243	0.143	(-0.526; 0.040)	-1.70	0.092	1.00
Ângulo*Ângulo	-0.0717	0.0121	(-0.0957; -0.0478)	-5.94	0.000	1.00

Fonte: Próprio Autor

Tabela 16. Sumário Modelo para Resposta Transformada – Modelo (1)

S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (aj)	R <sup>2</sup> (pred)
20.1835	66.41%	65.36%	63.31%

Fonte: Próprio Autor

**Equação de Regressão – Modelo (2)**

$$\delta = -22.4 + 6.99 \text{ Velocidade} + 2.051 \hat{\text{Ângulo}} \\ - 0.1003 \text{ Velocidade} * \text{Velocidade} \\ + 0.1618 \hat{\text{Ângulo}} * \hat{\text{Ângulo}} - 0.3160 \text{ Velocidade} * \hat{\text{Ângulo}} \\ + 0.00823 \text{ Velocidade} * \text{Velocidade} * \hat{\text{Ângulo}} \\ - 0.02763 \text{ Velocidade} * \hat{\text{Ângulo}} * \hat{\text{Ângulo}} \\ + 0.000650 \text{ Velocidade} * \text{Velocidade} * \hat{\text{Ângulo}} * \hat{\text{Ângulo}}$$

Tabela 17. Coeficientes para Resposta Transformada – Modelo (2)

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%	Valor-T
Constante	-22.4	10.7	(-43.6; -1.2)	-2.10
Velocidade	6.99	1.25	(4.5; 9.49)	5.57
Ângulo	2.051	0.485	(1.088; 3.014)	4.23
Velocidade*Velocidade	-0.1003	0.0316	(-0.1630; -0.0375)	-3.18
Ângulo*Ângulo	0.1618	0.0410	(0,0804; -0,2432)	3.95
Velocidade*Ângulo	-0.3160	0.0569	(-0,4291; -0,2029)	-5.55
Velocidade*Velocidade*Ângulo	0.00823	0.00143	(0.00538; 0.01107)	5.74
Velocidade*Ângulo*Ângulo	-0.02763	0.00481	(-0.03718; -0.01807)	-5.74
Velocidade*Velocidade*Ângulo*Ângulo	0.00065	0.000121	(0.000409; 0.000890)	5.37

<b>Termo</b>	<b>Valor-P</b>	<b>VIF</b>
Constante	0.039	
Velocidade	0.000	58.14
Ângulo	0.000	19.32
Velocidade*Velocidade	0.002	58.14
Ângulo*Ângulo	0.000	19.32
Velocidade*Ângulo	0.000	126.31
Velocidade*Velocidade*Ângulo	0.000	61.85
Velocidade*Ângulo*Ângulo	0.000	160.51
Velocidade*Velocidade*Ângulo*Ângulo	0.000	96.05

Fonte: Próprio Autor

Tabela 18. Sumário Modelo para Resposta Transformada – Modelo (2)

<b>S</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup>(aj)</b>	<b>R<sup>2</sup>(pred)</b>
15.5984	80.98%	79.31%	78.20%

Fonte: Próprio Autor

Tabela 19. Análise de Variância para a Resposta Transformada – Modelo (2).

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ Seq</b>	<b>Contribuição SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor -P</b>
Regressão	8	94284	80.98%	94284	11785.5	48.44 0.000
Velocidade	1	61739	53.03%	61739	7556.0	31.06 0.000
Ângulo	1	1181	1.01%	1181	4355.4	17.90 0.000
Velocidade*Velocidade	1	521	0.45%	521	2453.4	10.08 0.002
Ângulo*Ângulo	1	14398	12.37%	14398	3796.2	15.60 0.000
Velocidade*Ângulo	1	29	0.02%	29	7492.4	30.79 0.000
Velocidade*Velocidade*Ângulo	1	8019	6.89%	8019	8019.0	32.96 0.000
Velocidade*Ângulo*Ângulo	1	1394	1.20%	1394	8019.3	32.96 0.000
Velocidade*Velocidade*Ângulo*Ângulo	1	7003	6.02%	7003	7003.4	28.78 0.000
Erro	91	22141	19.02%	22141	243.3	
Falta de ajuste	16	14310	12.29%	14310	894.4	8.57 0.000
Erro puro	75	7831	6.73%	7831	104.4	* *
Total	99	116425	100.00%			

Fonte: Próprio Autor