



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**FRANCISCO DIEGO VIDAL BEZERRA**

**OTIMIZAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO**

**FORTALEZA**

**2017**

**FRANCISCO DIEGO VIDAL BEZERRA**

**OTIMIZAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO**

Monografia submetida à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carla Freitas de Andrade.

**FORTALEZA  
2017**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

B469o

Bezerra, Francisco Diego Vidal.

Otimização e Instrumentação de um Túnel de Vento / Francisco Diego Vidal Bezerra. – 2017.  
63 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2017.

Orientação: Profa. Dra. Carla Freitas de Andrade.

1. Túnel de Vento. 2. Instrumentação. 3. Simulação Computacional. I. Título.

CDD 620.1

---

**FRANCISCO DIEGO VIDAL BEZERRA**

**OTIMIZAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO**

Monografia submetida à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Carla Freitas de Andrade.

Aprovado em 17 de julho de 2017

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Carla Freitas de Andrade (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Prof. Dr. Claus Franz Wehmann  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire  
Universidade Estadual do Ceará (UFC)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a toda minha a família pelo apoio incondicional e suporte financeiro.

À minha mãe Lúcia por seu amor incondicional e ao meu pai Bezerra por aplicar sua apurada intuição técnica e sugestões de grande qualidade ao curso de todo este trabalho.

À minha namorada Jessica Bezerra por me ajudar na digitação e correção do trabalho.

À Jefter Araripe por suas valiosas contribuições em programação computacional.

Aos meus colegas Gabriel Fabián e Davi Lins pelas reflexões, críticas e apoio durante todo o desenvolvimento deste projeto.

Aos integrantes do laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos (LAERO) por propiciarem um bom ambiente de estudo e pesquisa.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carla Freitas de Andrade pela atenção e apoio incondicional durante todos meus projetos em que desenvolvi.

## RESUMO

Estudos da aerodinâmica e mecânica dos fluidos usam de túneis de vento como uma ferramenta em ambiente controlado para desenvolver conceitos e testes para diversas finalidades. Seja para o objetivo didático ou mercadológico, os túneis de vento podem cumprir a função da calibragem de instrumentos, realização de experimentos para desenvolvimento científico-tecnológico, aperfeiçoamento de parâmetros aerodinâmicos etc. Através de um exaustor ou ventilador se dá uma variação de pressão, que gera movimento no fluido e este, ao influenciar o objeto em questão, é estudado em virtude da busca do conhecimento de suas variáveis (principalmente velocidade, temperatura e pressão). Diante disso, este trabalho propõe projetar, construir, testar, instrumentar e comparar os resultados obtidos das leituras de sensores em um túnel de vento já existente para diversos parâmetros variáveis de sua geometria para otimizá-la. Foi projetado e desenvolvido um bocal, tela, colmeia, revestimento interno, suportes e programados e calibrados sensores de pressão e velocidade para que se criasse um ambiente de estudos de qualidade em torno de um túnel de vento. A partir da engenharia assistida por computador (CAE), foi possível projetar, comparar e desenvolver as geometrias necessárias para otimizar o túnel de vento. Um bocal foi construído em estrutura de madeira, alumínio e revestido com PVC semirrígido com o intuito de estudar sua influência no aumento de velocidade na seção de testes. Uma câmara de estabilização foi construída em formato hexagonal com o uso de uma tela plástica, papelão e madeira com o a finalidade de estabilizar e reduzir a intensidade de turbulência no interior do túnel de vento. Ainda foi necessário desenvolver um sistema de instrumentação que foi viável e responsável por mensurar os parâmetros de projeto desejados. Esta instrumentação foi integrada a uma plataforma virtual para monitoração e controle remoto de variáveis. Os testes foram realizados no Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos da Universidade Federal do Ceará, de onde foram coletados dados de velocidade, pressão e temperatura a partir da variação da rotação de um exaustor acoplado ao difusor do túnel de vento. Foi possível observar um pequeno acréscimo de velocidade na seção de testes após a inserção do bocal corrigido e uma diminuição brusca na intensidade de turbulência. Ainda na seção de testes notou-se uma aproximação entre os dados medidos em laboratório e os da simulação computacional.

**Palavras-chave:** Túnel de Vento. Instrumentação. Simulação Computacional.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenvolvimento da camada limite.....	18
Figura 2 - Desenvolvimento da camada limite em diferentes partes de um túnel de vento .....	18
Figura 3 - Flutuação de velocidade.....	19
Figura 4 - O processo de sensoriamento.....	21
Figura 5 - (a) efeito piezoelétrico. (b) efeito piezoelétrico reverso .....	22
Figura 6 - Geometria de uma tela .....	24
Figura 7 - Diferentes geometrias de colmeias .....	25
Figura 8 - Equação polinomial de quinto grau do bocal.....	26
Figura 9 - Domínio de discretização.....	28
Figura 10 - Tipos de malhas: Estruturada (1); Não estruturada (2); Não estruturada (3); Híbrida (4) .....	28
Figura 11 - Bocal em construção .....	31
Figura 12 - Progresso de revestimento interno do Túnel de vento: antes e depois .....	32
Figura 13 - Colmeia construída .....	32
Figura 14 - Tela usada na colmeia.....	33
Figura 15 - Sensor barométrico BMP 180.....	34
Figura 16 - Multiplexador Cd74hc4067 .....	35
Figura 17 - Esquema de ligação de múltiplos sensores ao arduino por intermédio de um multiplexador.....	35
Figura 18 - Sensor Mpxv7002dp com tubo de pitot.....	36
Figura 19 - Monitor serial do Arduino .....	38
Figura 20 - Programação em código G na plataforma LabVIEW .....	40
Figura 21 - Painel de monitoramento virtual do Túnel de Vento .....	41
Figura 22 - Malha discretizada do Túnel de Vento .....	42
Figura 23 - Influência da ferramenta <i>inflation</i> nas proximidades das paredes do Túnel de Vento .....	43
Figura 24 - Característica do <i>inflation</i> utilizado.....	43
Figura 25 - Suporte de fixação dos sensores .....	45

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Função de transferência .....	37
Gráfico 2 - Função Altitude[m] X Pressão[hPa] .....	39
Gráfico 3 - Perfil de velocidade a 500 rpm .....	47
Gráfico 4 - Perfil de velocidade a 800 rpm .....	48
Gráfico 5 - Perfil de velocidade sem bocal a 500 rpm (medido x software).....	50
Gráfico 6 - Perfil de velocidade com bocal a 500 rpm (medido x software) .....	50
Gráfico 7 - Análise de turbulência a 300 rpm .....	51
Gráfico 8 - Análise de turbulência a 500 rpm .....	52
Gráfico 9 - Análise de turbulência a 800 rpm .....	53



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estímulos e sinais dos sensores .....	20
Tabela 2 - Coeficientes de perdas de carga em colmeias .....	25
Tabela 3 - Dados técnicos do exaustor .....	30
Tabela 4 - Lista de materiais e suas rugosidades .....	31
Tabela 5 - Dimensões da colmeia.....	33
Tabela 6 - Dados de condições de contorno sem bocal .....	44
Tabela 7 - Dados de condições de contorno com bocal .....	44
Tabela 8 - Dados referentes à espessura da camada limite a 500 rpm .....	47
Tabela 9 - Dados referentes à espessura da camada limite a 800 rpm .....	48
Tabela 10 - Dimensionamento do <i>inflation</i> sem bocal .....	49
Tabela 11 - Dimensionamento do <i>inflation</i> com bocal .....	49
Tabela 12 - Espessuras de camada limite medidas pelo software e em laboratório .....	51
Tabela 13 - Intensidade de turbulência a 300 rpm.....	52
Tabela 14 - Intensidade de turbulência a 500 rpm.....	53
Tabela 15 - Intensidade de turbulência a 800 rpm.....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
LAERO	Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos
UFC	Universidade Federal do Ceará

## LISTA DE SÍMBOLOS

$p_{est}$	Pressão estática
$p_{tot}$	Pressão total
$p_{din}$	Pressão dinâmica
$Q$	Vazão
$V$	Volume
$A$	Área
$\dot{m}$	Vazão mássica
$v$	Velocidade
$\gamma$	Peso específico
$g$	Gravidade
$Re$	Número de Reynolds
$\mu$	Viscosidade
$u$	Velocidade instantânea
$u'$	Velocidade turbulenta
$\bar{u}$	Velocidade média
$t$	Tempo
$d$	Constante de carga
$k$	Coefficiente de acoplamento
$TC$	Temperatura Curie
$c$	Velocidade do som
$\beta_s$	Porosidade
$d_w$	Diâmetro do arame
$W_m$	Largura da célula
$e$	Espessura da célula
$Kt$	Coefficiente de perda de carga
$H_i$	Altura de contração na entrada
$H_e$	Altura de contração na saída
$L$	Comprimento total
$V_{out}$	Tensão de saída
$V_{FSS}$	Escala de tensão
$P_{OFF}$	Pressão de referência

$P_{real}$	Pressão calibrada
$P_o$	Pressão ao nível do mar
$R_{esp}$	Constante específica
$T$	Temperatura
$D_h$	Diâmetro hidráulico
$v_{livre}$	Velocidade livre
$v_{medida}$	Velocidade medida

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1 Objetivo geral .....	15
2.2 Objetivos específicos .....	15
<b>3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>16</b>
3.1 Fundamentos físicos.....	16
3.1.1 Pressão.....	16
3.1.2 Conservação da massa .....	16
3.1.3 Equação de Bernoulli .....	17
3.1.4 Camada Limite de separação .....	17
3.1.5 Número de Reynolds .....	18
3.1.6 Intensidade de Turbulência.....	19
3.2 Sensores e transdutores .....	20
3.2.1 Sensores piezelétricos .....	21
3.3 Túnel de vento .....	23
3.3.1 Classificação.....	23
3.3.2 Componentes de um túnel de vento aberto.....	24
3.3.2.1 Telas .....	24
3.3.2.2 Colmeias .....	25
3.3.2.3 Bocal.....	26
3.3.2.1 Seção de testes .....	26
3.3.2.2 Difusor .....	26
3.4 Dinâmica dos fluidos computacional.....	27
3.4.1 Equações Governantes.....	27
3.4.2 Malha.....	28
3.4.3 Condições de Contorno .....	29
3.4.4 Modelo de Solução.....	29
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
4.1 Túnel de vento .....	30
4.2 Revitalização do túnel de vento .....	30
4.2.1 Construção do bocal.....	30
4.2.2 Revestimento interno .....	31
4.2.3 Construção da colmeia.....	32

4.2.4 Escolha da tela .....	33
4.3 Instrumentação .....	34
4.3.1 Componentes e Sensores de Pressão e Velocidade .....	34
4.3.2 Calibração .....	36
4.3.3 Programação na plataforma Arduino .....	38
4.3.4 Plataforma Labview .....	39
4.4 Modelagem computacional .....	41
4.4.1 Malha.....	41
4.4.2 Condições de Contorno.....	44
4.4.3 O Modelo de Turbulência.....	44
4.5 Testes.....	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	46
5.1 Sensores: Análise das leituras .....	46
5.2 Análise do perfil de velocidade .....	46
5.3 Turbulência: análise de turbulência de cada geometria em diversas velocidades..	51
6 CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS .....	56
APÊNDICE .....	58

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização da instrumentação e o uso da simulação computacional são ferramentas de grande importância por facilitar a solução e investigação de problemas na área de engenharia. O estudo dos parâmetros e suas determinações para a otimização de sistemas são fundamentais para a boa qualidade de um projeto.

A praticidade e velocidade de resposta para problemas de engenharia com o adequado uso destas duas ferramentas apresentam grande viabilidade para serem usados em ambientes de estudos acadêmicos, por serem didáticos e apresentarem uma grande gama de possibilidades por promover o conhecimento de fenômenos físicos e químicos com qualidade e fácil manipulação de dados.

A mecânica dos fluidos necessita constantemente de soluções através da determinação de parâmetros muitas vezes com uso de equações complexas. A análise de modelos de turbulências e características inerentes ao escoamento de um fluido se tornam mais didáticos e compreensíveis com o advento da engenharia assistida por computador (EAC), que engloba a análise de elementos finitos (FEA), dinâmica computacional de fluidos (CFD), dinâmica de multicorpos (MDB) e otimização.

A instrumentação tem como objetivo a monitoração de processos através da medição por instrumentos, que é um dispositivo utilizado para medir, indicar, transmitir ou controlar grandezas características de sistemas físicos ou químicos.

Um instrumento pode ser visto simplesmente como um aparelho que ao receber um estímulo de entrada, é excitado ou modificado, produzindo um outro de saída. Isto se trata do mecanismo de transmissão e recepção de um sinal.

A porção transmissora de um instrumento converte uma variável física (pressão, temperatura etc.) em outra de mais fácil mensuração (por exemplo um pulso elétrico). Este é responsável em encaminhar o sinal de saída do elemento de medição (entende-se como o valor medido da variável), até a porção receptora, que irá decodificar o sinal recebido e quantificá-lo para uma unidade requerida, deixando-o disponível para leitura do operador.

Com o uso integrado da instrumentação e da engenharia assistida por computador (CAE), um estudo real é relacionado a um outro virtual, utilizando assim duas ferramentas de grande importância na caracterização de problemas, sua compreensão e desenvolvimento de soluções.

Com isso, este trabalho visa a revitalização e instrumentação de uma importante ferramenta para o estudo de Mecânica dos Fluidos – Túnel de Vento, que se localiza no

Laboratório de Aerodinâmicas e Mecânica dos Fluidos (LAERO), no campus Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC), além de sua instrumentação e comparação de parâmetros adquiridos de simulação computacional.

As melhorias realizadas no túnel de vento, através da variação de sua geometria instrumentação e comparação com um sistema virtual de simulação deixa um legado importante como ferramenta didática para a futura criação de práticas laboratoriais para alunos da disciplina de Mecânica dos Fluidos através de medições diversas de pressão, temperatura e velocidade em pontos variados, oferecendo praticidade e melhores condições na realização de pesquisas que auxiliarão no desenvolvimento de projetos de pesquisa relacionados à aerodinâmica

O laboratório em que se realizou este trabalho se localiza no estado do Ceará, um estado que descobriu desde o final da década de 1990 um grande potencial para a geração de energia eólica, sendo atualmente a segunda principal fonte energética do estado e tendo um potencial de eficiência do vento para geração de energia de 43,4%, uma média maior que a média nacional e mundial.

O estudo da aerodinâmica da geração de energia eólica então possui uma forte motivação para existir e ser desenvolvido. Desde o início do desenvolvimento do projeto eólico, é de extrema importância a alteração de parâmetros como formato das pás eólicas, assim como de suas estruturas de suporte que, além de variar a potência aerodinâmica, tem influência em muitos outros aspectos. Assim sendo, é importante, logo no início do desenvolvimento de uma pá eólica, trabalhar as propriedades aerodinâmicas fazendo uso da experiência, de ferramentas computacionais e experimentais.

O desenvolvimento aerodinâmico, predominantemente experimental, comumente foi realizado em fases, mas auxiliados por estudos numéricos. Na primeira fase, criou-se o modelo a ser estudado em escala. A maior parte dos estudos produzidos na primeira fase foram realizados em túneis de vento. Problemas específicos como: potência aerodinâmica, intensidade de turbulência, influência do fluxo pós-pá, são situações comumente estudadas com auxílio de modelos em túneis de vento. Em fases seguintes, já com parâmetros determinados, se produz a pá e se realiza seus estudos em campo, se possível em tamanho já real. As fases iniciais, portanto, demonstraram a importância do uso indispensável de um túnel de vento no desenvolvimento de um estudo de pás eólicas através da aquisição de dados suficientes.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral desse trabalho é a instrumentação e a avaliação da otimização de parâmetros geométricos de um túnel de vento do laboratório de aerodinâmica e mecânica dos fluidos (LAERO) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

### **2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos desse trabalho foram:

- Otimização de parâmetros geométricos do túnel de vento (bocal, revestimento interno, colmeia e tela);
- Programação e calibração de sensores usados na instrumentação;
- Integração da leitura dos sensores com a plataforma LabView;
- Simulação computacional do escoamento no túnel de vento;
- Validação das medições, comparando os dados de simulação CFD com os valores medidos;

### 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Aqui, apresenta-se os fundamentos e conceitos básicos para o desenvolvimento do trabalho, apresentando os fundamentos físicos da mecânica dos fluidos, conceitos de instrumentação, funcionamento de túneis de vento e dinâmica dos fluidos computacional.

#### 3.1 Fundamentos físicos

##### 3.1.1 Pressão

Tudo que está na atmosfera terrestre experimenta o efeito da pressão. A pressão total ( $p_{tot}$ ) é constituída da soma de duas componentes: a pressão estática ( $p_{est}$ ) e pressão dinâmica ( $p_{din}$ ). A pressão estática é uma medida da energia potencial e a pressão dinâmica uma medida da energia cinética.

$$p_{tot} = p_{est} + p_{din} \quad (1)$$

##### 3.1.2 Conservação da massa

A vazão volumétrica ( $Q$ ) é o valor da multiplicação da velocidade ( $v$ ) de um determinado fluido que passa por uma área de seção ( $A$ ) de um conduto em determinado espaço de tempo:

$$Q = vA \quad (2)$$

Já a vazão mássica ( $\dot{m}$ ) é dada pela multiplicação da vazão volumétrica pela densidade do fluido ( $\rho$ ):

$$\dot{m} = vA\rho \quad ((3))$$

Pela lei de conservação de massa, um fluido com velocidade ( $v$ ), pode-se dizer que a vazão é constante e tem-se:

$$v_{ent}A_{ent} = v_{sai}A_{sai} \quad ((4))$$

Observa-se então que reduzindo a seção de saída obtêm-se um aumento de velocidade de saída e o contrário também é verdadeiro.

### 3.1.3 Equação de Bernoulli

Esta é uma equação que deve ser aplicada para um escoamento permanente, incompressível e que não possua atrito ao longo de uma linha de corrente. Esta equação é conhecida como Equação de Bernoulli e assume que a pressão total seja constante:

$$\frac{p_{est}}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z = constante \quad (5)$$

Esta equação, já que não deve ser aplicada em uma região onde tenha atrito, ela se aplica em uma porção em que esteja fora da camada limite, já que nesta região há atrito do fluido com as paredes. Para um mesmo nível  $z=0$ , podemos reescrever:

$$\frac{p_{est}}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = constante \quad (6)$$

Sendo a pressão dinâmica dada por:

$$p_{din} = \frac{\gamma v^2}{2g} \quad (7)$$

Então,

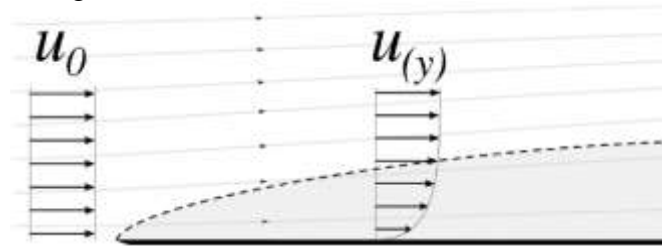
$$p_{est} + p_{din} = constante \quad (8)$$

Assim sendo, a equação de Bernoulli, através do conhecimento das pressões estáticas e total, pode ser uma ferramenta para obter a velocidade. Este é a maneira utilizada por um tubo de pitot para medição de velocidade.

### 3.1.4 Camada Limite de separação

Quando um fluido escoar sobre uma superfície sólida, o fluido imediatamente em contato com a parede adere à mesma. Observa-se também, que se a viscosidade for pequena, o aumento da velocidade, de zero para o valor do escoamento externo, ocorrerá numa região estreita. É nesta camada estreita que as forças de atrito se fazem importantes, retardando o fluido de sua velocidade externa para um completo repouso na parede. Esta região estreita é chamada de camada limite e seu desenvolvimento é demonstrado nas Figuras 1 e 2.

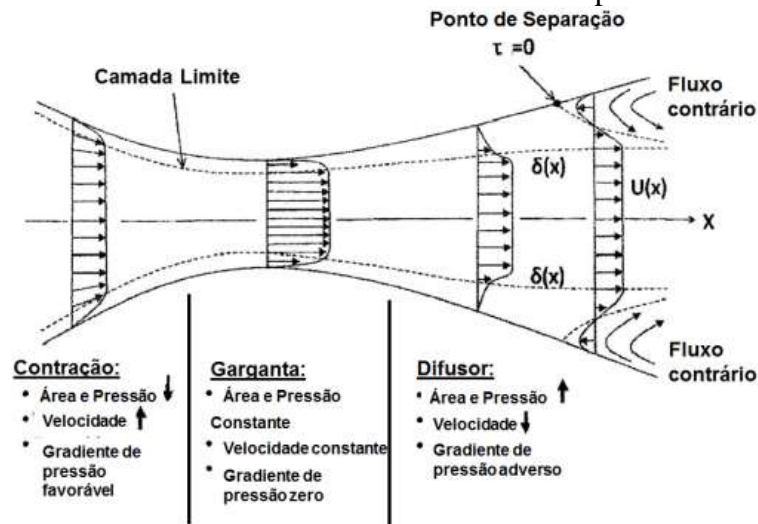
Figura 1 - Desenvolvimento da camada limite



Fonte: Flanker. (2008).

A espessura da camada limite é usualmente definida como a distância da superfície ao ponto em que a velocidade é 99% da velocidade corrente livre (Fox *et al.* 1998).

Figura 2 - Desenvolvimento da camada limite em diferentes partes de um túnel de vento



Fonte: Murat Ockay, Bilgehan Uygur Oztekin. (2009).

### 3.1.5 Número de Reynolds

Um fluido escoando em um tubo de corrente pode transitar de um regime laminar para um regime turbulento, caso as características de sua velocidade forem modificadas. A passagem de um regime de escoamento laminar para um regime de escoamento turbulento, além de depender da velocidade do fluido, também depende das suas propriedades viscosas e do diâmetro hidráulico de onde o fluido escoa.

Uma grandeza adimensional denominada Número de Reynolds ( $Re$ ), que depende da velocidade, do coeficiente de viscosidade, da densidade do fluido e também da dimensão linear do sólido que contém o fluido ou que nele está inserido (diâmetro hidráulico), é capaz de indicar se o fluido está em um regime turbulento, laminar ou ainda em um regime instável ou ainda na transição entre os dois regimes. O Número de Reynolds é definido como:

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (9)$$

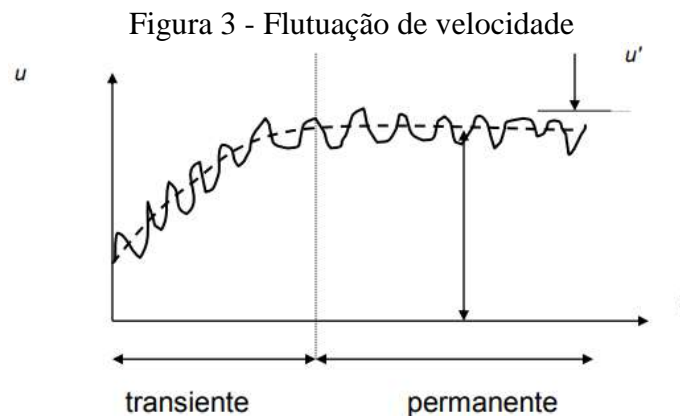
Onde na maioria das situações de engenharia se toma  $R_e \cong 2300$  como uma referência para uma transição para a turbulência (Fox et al. 1998).

### 3.1.6 Intensidade de Turbulência

A velocidade é a variável comumente trabalhada no estudo das propriedades da turbulência. Sua determinação vetorial (magnitude, direção e sentido) em vários pontos permite uma boa descrição do movimento do fluido.

O conceito de velocidade turbulenta é a flutuação da velocidade em torno do seu valor médio. O valor médio da velocidade turbulenta é obtido de:

$$u' = u - \bar{u} \quad (10)$$



Fonte: Angela O. Nieckele. (2015).

Onde  $u'$  é a velocidade turbulenta,  $u$  é a velocidade instantânea, e  $\bar{u}$  é a velocidade média.

Por ser um movimento caótico, a turbulência não deve ser estudada em sua forma instantânea, porém, requer um tratamento estatístico a partir de valores médios de suas variáveis de estudo. DRYDEN & KUETHE (1930) *apud* HINZE (1959) introduziram para a média das flutuações instantâneas um conceito que desde então se tornou convenção. A velocidade turbulenta média passou a ser obtida a partir da raiz quadrada da média quadrática das flutuações, ou seja:

$$u = \sqrt{u'^2} \quad (11)$$

### 3.2 Sensores e transdutores

Um sensor é um dispositivo que faz a detecção e responde com eficiência a algumas entradas (excitações) provenientes de um ambiente físico. Uma luz, o calor, um movimento, umidade, pressão ou qualquer variável detectável em um ambiente são exemplos de entradas. Assim, quando um sensor recebe uma entrada específica proveniente do ambiente, ele emite uma saída, que geralmente é um sinal capaz de ser convertido e interpretado por outros dispositivos. Tipos de estímulos e sinais dos sensores são exemplificados na Tabela 1.

Tabela 1 - Estímulos e sinais dos sensores

Estímulo	Sinal
Acústico	Onda (Amplitude, fase, polarização), espectro, velocidade de onda.
Elétrico	Carregamento, corrente, tensão, permissividade e condutividade.
Magnético	Campo magnético, fluxo magnético e permeabilidade.
Óptico	Onda (Amplitude, fase, polarização), velocidade de onda, índice de refração, emissividade, absorção, refletividade.
Térmico	Temperatura, fluxo, calor específico, condutividade térmica
Mecânico	Posição (linear, angular), aceleração, força, massa, densidade, momento, torque, orientação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O transdutor é um dispositivo que transforma um tipo de energia em outro. Ele pode converter, por exemplo, uma magnitude física, como posição, velocidade, temperatura, luz, entre outras, em um sinal elétrico normalizado.

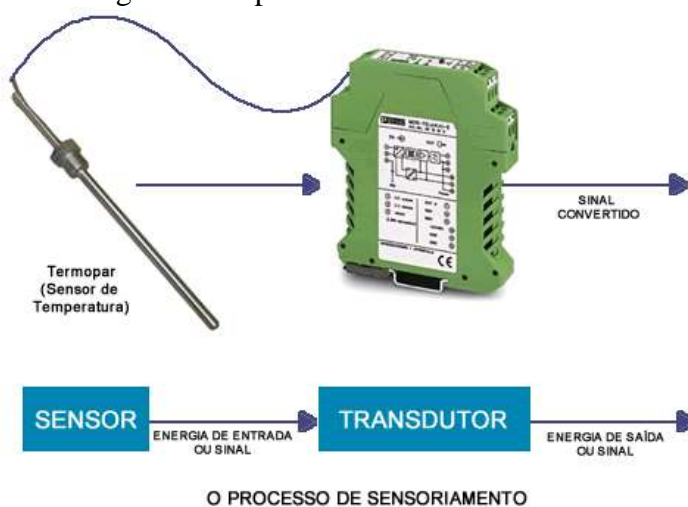
O sensor detecta uma variável física, que pode ser a pressão, a temperatura ou a intensidade de uma força, e o transdutor transforma essa medida em uma grandeza fácil de ser medida.

Os transdutores podem ser classificados como:

- **Ativos:** geram um sinal elétrico em resposta a um estímulo e não precisam receber energia externa para produzir um sinal de saída;
- **Passivos:** precisam ser excitados por uma fonte externa de energia para produzir um sinal de saída;

- **Simples:** Quando a transdução é feita em apenas um estágio, como é o caso de um sensor de posição que produz uma variação de tensão elétrica na presença de um material magnético;
- **Compostos:** quando a transdução é feita em vários estágios entre o sinal de entrada e o de saída da magnitude física, que, por sua vez, é transformada em grandezas intermediárias durante o processo, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 - O processo de sensoriamento



Fonte: Citisystems. (2012).

### 3.2.1 Sensores piezelétricos

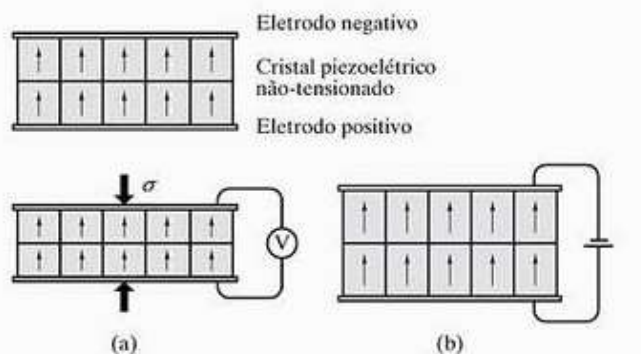
A piezoeletricidade é a capacidade que alguns materiais possuem de gerar tensão elétrica por resposta a uma pressão mecânica. O termo “piezo” é derivado da palavra grega que significa pressão. Assim como a geração de uma tensão por uma deformação mecânica é possível, o efeito reverso também pode acontecer, com a ocorrência de uma deformação mecânica em função da aplicação de tensão elétrica.

As aplicações dos materiais com propriedades piezoeletricas são variadas, indo desde sensores para estacionamento, passando por telas *touch screen* de dispositivos móveis, até transdutores ultrassônicos empregados em sistemas de radar e sonar, além de novas aplicações que vem sendo desenvolvidas com a utilização de nanotecnologia e a busca por formas sustentáveis de se aproveitar e maximizar a energia que pode ser gerada pelos piezoeletricos.

A Figura 05 (a) ilustra o comportamento piezoeletrico, onde a aplicação de uma tensão produz uma diferença de potencial elétrico mensurável através do material piezoeletrico.

Já a Figura 05 (b), ilustra o efeito piezoeétrico reverso, no qual uma diferença de potencial elétrico muda a magnitude da polarização no material piezoeétrico e, conseqüentemente, sua espessura.

Figura 5 - (a) efeito piezoeétrico. (b) efeito piezoeétrico reverso



Fonte: Shackelford, James F. (2004).

Para selecionar um material piezoeétrico para aplicações tecnológicas procura-se, em geral, conhecer algumas de suas propriedades, pode-se destacar:

a) Constante de carga piezoeétrica  $d$  (m / V ou C / N): Informa qual é a proporção entre a variação dimensional ( $\Delta l$ ) do material piezoeétrico (em metros) e a diferença de potencial aplicada (em Volts), e entre a geração de cargas elétricas (em Coulomb) e a força aplicada no material (em Newton).

b) Constante de tensão piezoeétrica  $g$  (V.m / N): Informa qual é a proporção entre a diferença de potencial gerada (em Volts) e a força aplicada (em Newton) para o comprimento de 1 metro.

c) Coeficiente de acoplamento  $k$  (Adimensional): Eficiência do material na transdução / conversão de energia elétrica em mecânica e vice-versa. Essa informação é indispensável no controle de qualidade das cerâmicas piezoeétricas e no projeto de dispositivos em que não se deseja a conversão cruzada de energia, ou seja, que uma vibração ou deformação em um eixo não gere cargas elétricas ou diferença de potencial em outro eixo. Neste caso, quanto menor o respectivo fator de acoplamento melhor.

d) Fator de qualidade mecânico  $Q$  (Adimensional): É uma medida das perdas mecânicas (amortecimento) do material. Usado no projeto de dispositivos dinâmicos de alta potência.

e) Temperatura de Curie  $T_C$  ( $^{\circ}\text{C}$ ): É a temperatura na qual a estrutura cristalina do material sofre uma transição de fase e o mesmo deixa de apresentar propriedades piezoeétricas.



Depois de ultrapassada esta temperatura, o material perde a polarização remanescente induzida tornando-se inútil para a utilização como elemento transdutor de energia elétrica em mecânica. Essa informação é indispensável no projeto de dispositivos que deverão operar em altas temperaturas e de alta potência.

### 3.3 Túnel de vento

Os túneis de vento são fundamentais para projetos aeroespaciais e pesquisas aerodinâmicas. Além disso, os ensaios neles realizados constituem-se atividades multidisciplinares e de alto grau de complexidade científico-tecnológica. São estruturas que propiciam a simulação do comportamento do ar em relação a diversos tipos de objetos, como aviões, carros e construção civil. A instalação permite observar o movimento do ar ao redor dos modelos a serem estudados. O desempenho aerodinâmico e a determinação dos efeitos da carga de vento sobre estruturas são apenas alguns dos parâmetros avaliados em um túnel de vento.

#### 3.3.1 Classificação

Em relação ao formato, um túnel de vento pode ser dividido em três categorias:

- Circuito Aberto: geralmente possui um ventilador em uma extremidade e é aberto na outra.
- Circuito Fechado: onde se circula o ar dentro dele sem contato com a atmosfera. Por ser fechado necessita de menos energia para movimentar o fluido
- Túnel Semifechado: é uma mistura dos dois anteriores. Esse tipo de túnel necessita de menos força do motor que o modelo aberto e é menos complexo de construir do que o modelo fechado.

Os túneis de vento também são categorizados com relação a velocidade do ar na seção de testes. Túneis subsônicos são túneis com a velocidade do fluxo de ar bem abaixo da velocidade do som  $c=340\text{ m/s a }1\text{ atm}$ . Túneis de vento transônicos são capazes de chegar a velocidade bastante próximas da velocidade do som. Túneis supersônicos, operam em velocidades acima da velocidade do som. Existem ainda túneis classificados como hipersônicos cuja velocidade nominal de funcionamento é de até 15 vezes a velocidade do som.

### 3.3.2 Componentes de um túnel de vento aberto

Um túnel de vento possui vários elementos que possuem funções específicas no escoamento e que devem ser analisados separadamente segundo Wattendorf (1938), calculando-se as geometrias e perdas de pressão de cada componente.

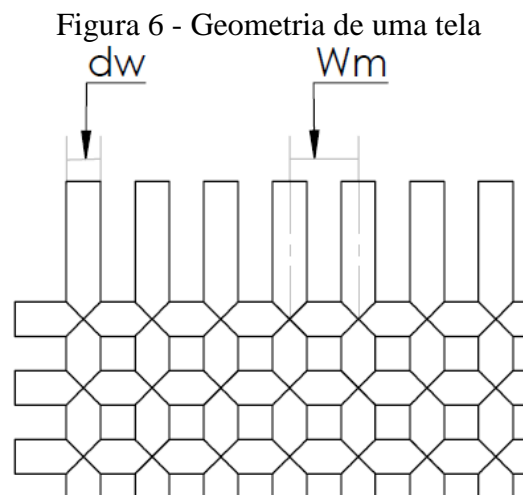
#### 3.3.2.1 Telas

Possuem a função de proteção do exaustor e de diminuir as oscilações de velocidade na seção de testes, através do controle da turbulência e assim podendo aumentar a qualidade do escoamento.

Segundo Barlow *et al.* (1999), um parâmetro importante de caracterização de uma tela é a porosidade  $\beta_s$ , sendo dada por:

$$\beta_s = \left(1 - \frac{dw}{Wm}\right)^2 \quad (12)$$

Onde  $dw$  é o diâmetro do arame utilizado na trama da tela e  $Wm$  é a largura da célula quadrada, conforme ilustra a Figura 6.



Fonte: Elaborada pelo autor.

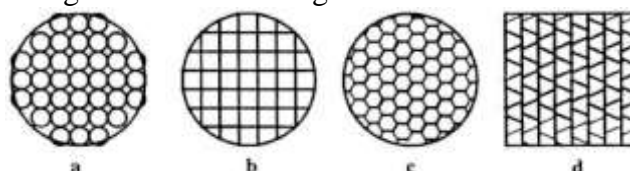
Valores típicos para porosidade de telas estão na faixa de 0,5 – 0,80, sendo altamente indicado que este valor seja superior a 0,57. Barlow *et al.* (1999) recomendam que o espaçamento entre telas seja de 30 vezes o comprimento da malha ou de 500 vezes o diâmetro do arame na tela. Mehta (1985) realizou uma pesquisa onde concluiu que, da comparação entre telas de metal e de plástico, o aumento da velocidade média do fluido é maior para telas de

plástico. Ainda no mesmo estudo foi descoberto que numa região alheia à camada limite, as não uniformidades produzidas pelas telas de metal no escoamento eram maiores, devido à rugosidade superfície do material.

### 3.3.2.2 Colmeias

De acordo com Prandtl *apud* Barlow et al. (1999) “uma colmeia é um dispositivo guia pelo qual os filamentos individuais de ar se tornam paralelos”. Segundo um estudo feito por Scheiman et al. (1981), os diferentes tipos de geometrias para as colmeias mais normalmente utilizadas, assim como os coeficientes de perdas de carga para cada modelo, estão exemplificados na Figura 7 e Tabela 2:

Figura 7 - Diferentes geometrias de colmeias



Fonte: Fonte: Barlow, Jewel B. *et al.* (1999).

Tabela 2 - Coeficientes de perdas de carga em colmeias

Tipo de colmeia	Coeficiente de perda de carga ( $K_i$ )
a	0,30
b	0,22
c	0,2

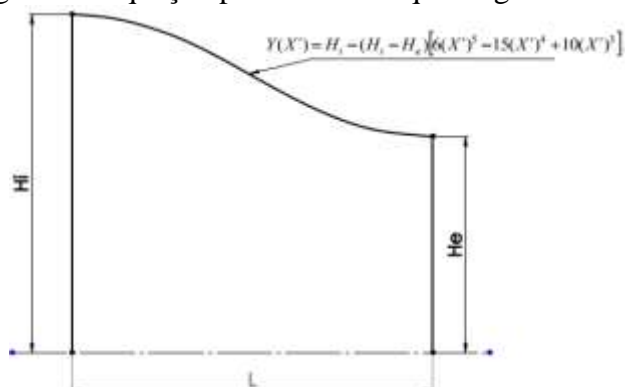
Fonte: Barlow, Jewel B. *et al.* (1999).

Numa colmeia, os parâmetros a serem definidos são o comprimento das células  $H_L$  e seu diâmetro hidráulico  $H_D$  e  $\beta s$ . A razão de  $H_L/H_D$  comumente utilizada está na faixa entre 6 – 8. É indicada a utilização de 150 células por diâmetro hidráulico da câmara de estabilização ou um total de 25000 células. A geometria mais eficiente por ter um menor coeficiente de perda de carga é a de geometria hexagonal.

### 3.3.2.3 Bocal

Bell *et* Mehta. (1988) realizaram um trabalho analisando diferentes contrações projetadas utilizando polinômios de terceiro, quinto, e sétimo grau. Destes polinômios, o de quinto grau foi o que se mostrou mais viável de ser utilizado, como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 - Equação polinomial de quinto grau do bocal



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por base neste estudo, sendo  $H_i$  e  $H_e$  as alturas da contração na entrada e na saída, respectivamente, medindo-se até o plano de simetria da contração, conforme Figura 8. Sendo  $X'$  a distância no eixo  $X$  partindo da entrada da contração até sua saída e  $Y(X')$  a coordenada no eixo  $Y$  em função de  $X'$ . Uma regra de projeto aconselhada é a de usar uma razão entre áreas de 6 a 10 e para o comprimento total deve utilizar uma razão de  $L/H_i$  com cerca de 0,89.

### 3.3.2.1 Seção de testes

É uma região onde os modelos devem ser testados e devidamente posicionados para se obter os dados necessários ao projeto. É nesta parte do túnel onde a visualização do escoamento também é importante, portanto deve conter, normalmente, paredes transparentes. Nesta seção, a perturbação do fluxo deve ser mínima para uma maior precisão do estudo a ser realizado.

### 3.3.2.2 Difusor

Tendo uma função oposta à de um bocal, um difusor deve reduzir a velocidade com menores perdas possíveis. Este é um componente do túnel que deve ser bem projetado devido a sua alta sensibilidade a erros de projetos, pois pequenas variações em sua geometria

influenciam fortemente o escoamento do fluido através de suas dependências, podendo causar oscilações da velocidade na seção de testes e aumento das perdas de pressão consideráveis.

### 3.4 Dinâmica dos fluidos computacional

A Fluidodinâmica Computacional ou CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*), é a área do conhecimento que trata da simulação numérica de escoamentos de fluidos, transferência de calor e fenômenos relacionados, como reações químicas, combustão, aeroacústica etc. O CFD teve origem a partir da combinação de duas disciplinas: mecânica dos fluidos e cálculo numérico. As equações que regem o escoamento de fluidos têm origem na mecânica dos fluidos e podem ser resolvidas por meio de diferentes métodos numéricos.

Os modelos podem ser testados em túneis de vento e a modelagem computacional através do CFD é responsável pelos cálculos, sendo uma ferramenta para as equações de escoamento, muitas vezes complexas, por intermédio de ferramenta computacional.

#### 3.4.1 Equações Governantes

As equações resolvidas por intermédio do CFD possuem uma forma geral, que se torna uma equação de transporte da variável de interesse, representada pelo símbolo  $\Phi$ .

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi V \cdot dA = \oint_A \rho \phi V \cdot dA \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV \quad (13)$$

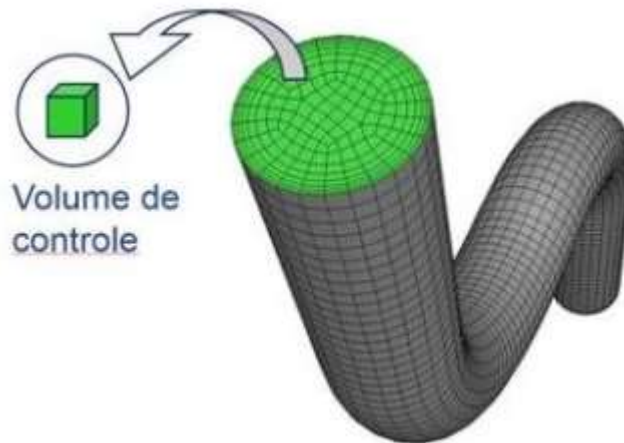
Nesta equação, a primeira parte é referente ao termo tempo, a segunda ao advectivo, a terceira ao difusivo e a quarta à fonte. Para representar diferentes equações de conservação alteram-se apenas três componentes da equação: a variável  $\Phi$ , o coeficiente de difusão  $\Gamma$ , e a fonte  $S$ . Apesar da fórmula ser amplamente utilizada para aplicações em Fluidodinâmica Computacional, pode-se afirmar que até o momento não existe solução analítica para a equação de transporte. Dessa forma, é necessário reescrevê-la em forma algébrica e resolvê-la por meio de algum método de discretização computacional.

Existem naturalmente 3 importantes equações que regem os estudos computacionais sobre escoamento de fluidos, que são a de continuidade, momento e energia. As duas primeiras tratam do movimento e a terceira da transferência de calor. No estudo deste trabalho, só serão usadas as equações de continuidade e de momento.

### 3.4.2 Malha

Os métodos de discretização mais difundidos são o método das diferenças finitas, o método dos elementos finitos e o método dos volumes finitos, sendo este último o mais utilizado em CFD. Com esses métodos, troca-se o domínio contínuo por um domínio discreto, onde um conjunto de volumes de controle é utilizado para representar o domínio original, como pode ser observado na Figura 9.

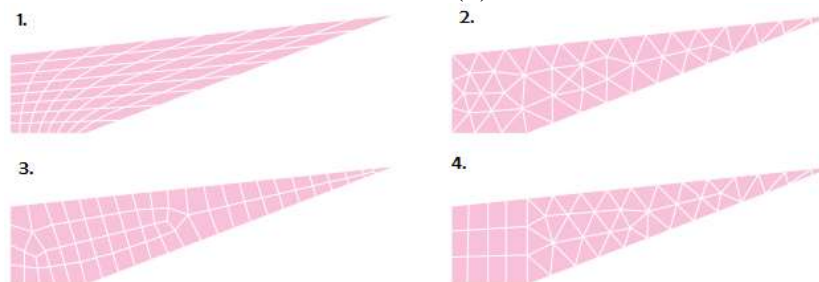
Figura 9 - Domínio de discretização



Fonte: ESSS. ( 2016).

A malha engloba um conjunto de pequenos volumes de controle onde se aplicam equações matemáticas. A modelagem de uma malha diz muito sobre a qualidade dos resultados de um estudo. Softwares realizam a criação destas malhas através de técnicas com parâmetros específicos para que haja uma adequação a cada modelo estudado. Em regiões críticas do estudo a discretização é maior, para que se leve em conta fenômenos em estudo com maior precisão. Estas malhas, exemplificadas na Figura 10, se classificam em tipos que devem ser aplicadas a estudos com especificidade.

Figura 10 - Tipos de malhas: Estruturada (1); Não estruturada (2); Não estruturada (3); Híbrida (4)



Fonte: Çengel, Yunus A and Cimbala, John. (2005).

### 3.4.3 Condições de Contorno

As condições de contorno são os parâmetros de partida de qualquer estudo, onde são inseridos alguns poucos conhecimentos que se tem de um modelo a ser estudado. A classificação de cada contorno também é muito importante, pois suas características predeterminadas e corretas escolhas irão reger o grau de qualidade da simulação. Alguns dos principais tipos de condições de controle são:

- a) *Inlet* e *Outlet*: são regiões onde são inseridos valores na entrada e saída, respectivamente, de um domínio computacional.
- b) *Wall*: esta região é definida como um anteparo, ou fronteira física de um domínio computacional. Em estudos em escoamento de fluidos, é nesta região em que o fluido será delimitado.

### 3.4.4 Modelo de Solução

Em uma simulação computacional, muitas vezes se exige bastante do processamento de dados. A modelagem de um estudo deve ser específica, seguindo uma abordagem de estudo (estrutural, térmico, fluidos, vibracional), agilizando a obtenção e maior precisão dos resultados em seus processamentos. Em estudos de escoamentos de fluidos, por exemplo, existem análises laminares e turbulentas.

A análise turbulenta leva em conta a ação de vórtices sobre a difusão e mistura em um escoamento. Para Wilcox (1974), uma correta escolha de um modelo de turbulência seria o terceiro principal fator para se obter sucesso em uma simulação CFD.

Kolmogorov (1942) propôs o primeiro modelo de turbulência de duas equações e fez a escolha da energia cinética da turbulência ( $k$ ) como um dos parâmetros a ser avaliado e Prandtl (1945) modelou a equação diferencial que governa seu comportamento. O segundo parâmetro estudado neste modelo é a dissipação da energia cinética turbulenta por unidade ( $\omega$ ), sendo este o modelo  $k$ - $\omega$ .

Apesar deste modelo, Chou (1945) propôs, através da obra de Launder *et* Sharma (1974), o modelo mais famoso, onde se leva em consideração a equação da energia cinética turbulenta ( $k$ ) e da dissipação dada por ( $\epsilon$ ), assim ficando conhecido como modelo  $k$ - $\epsilon$ .

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Túnel de vento

O túnel de vento utilizado no trabalho está instalado no laboratório LAERO (Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos), possui um comprimento total de 6,6 m, possui uma área de testes de 0,50mX0,50m e comprimento de 1,74 m. Ele possui, uma porta lateral com visor em acrílico e acessos a área de testes para a inserção de sensores e equipamentos de suporte.

Acoplado ao difusor do túnel há um exaustor industrial axial com dados citados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados técnicos do exaustor

Diâmetro (cm)	Comprimento (cm)	Potência (hp)	Vazão (m <sup>3</sup> /min)	Pressão (mmca)	Peso (Kg)
100	46	2	422	19	95,00

Fonte: Elaborada pelo autor

Este exaustor possui a ele conectado um inversor de frequência modelo CFW08 e fabricado pela WEG, que é responsável por controlar sua rotação e assim possibilita atingir várias velocidades de escoamento para o fluido em estudo.

### 4.2 Revitalização do túnel de vento

Inicialmente, foi necessário o estudo de quais parâmetros do túnel deveriam ser modificados para sua melhoria e otimização. Como o foco principal era sua instrumentação, alguns parâmetros de geometria foram modificados com o intuito de diminuir as oscilações das medições de pressão e velocidade.

#### 4.2.1 Construção do bocal

O bocal inicial tinha geometria reta e com o intuito de reduzir sua perda de carga e aumentar a velocidade na seção de testes, foi construído um bocal para melhorar a entrada do fluxo de ar no túnel de vento. Os materiais utilizados foram tubos de alumínio de 1” para o esqueleto da estrutura, cotovelos de plástico de ½” usados para a conexão dos tubos e madeira compensada, que foram cortadas no perfil da curva otimizada para o bocal.

A equação polinomial do quinto grau utilizada para o perfil deste bocal foi:

Sendo  $H_i = 39,14 \text{ cm}$  e  $H_e = 25 \text{ cm}$ ,



$$Y(X') = -84,84(X')^5 + 212,1(X')^4 - 141,4(X')^3 + 39,14 \quad (14)$$

Figura 11 - Bocal em construção



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.2.2 Revestimento interno

Inicialmente, a parte interna do túnel era toda em madeira, com rugosidade acentuada, cabeças de parafusos e pregos em evidência. O acabamento interno foi melhorado através de um revestimento de folhas com material PVC semirrígido liso, uma vez que apresenta menor rugosidade de acordo com a Tabela 3, cobrindo qualquer obstáculo ao escoamento do ar como exemplificado na Figura 12.

Tabela 4 - Lista de materiais e suas rugosidades

Material	Rugosidade média (mm)
Aço laminado novo	0,0015
Madeira aplainada	0,2 - 0,9
PVC rígido	0,005

Fonte: mspc. (2013).

Figura 12 - Progresso de revestimento interno do Túnel de vento: antes e depois

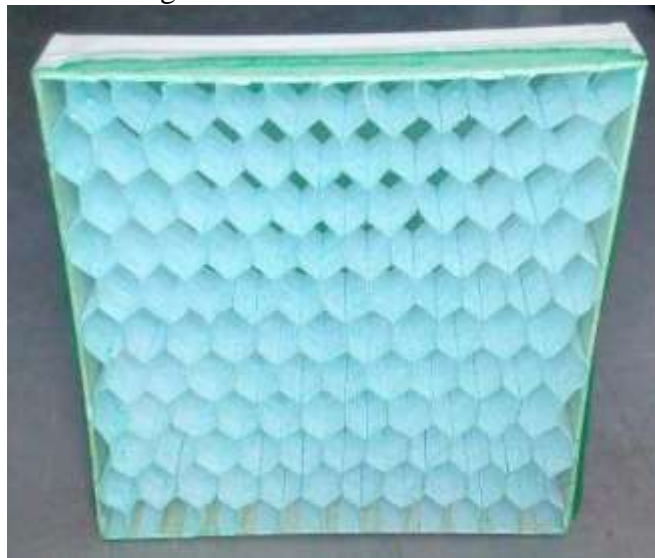


Fonte: Elaborada pelo autor.

#### ***4.2.3 Construção da colmeia***

Apesar de ter sido realizado um bom acabamento interno através do revestimento, foram notadas oscilações quando se deu a realização de medições de pressão na seção de testes. Surgiu então a necessidade de aumentar a estabilidade do escoamento (torná-lo menos turbulento), daí a necessidade da confecção de uma câmara de estabilização. A geometria escolhida para a colmeia foi a hexagonal, por ser a mais eficiente e foi construída em papelão, com moldura de madeira e tela plástica pela sua facilidade de modelagem e baixo custo, exemplificada na Figura 13.

Figura 13 - Colmeia construída



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o dimensionamento da colmeia foi utilizado um comprimento de  $Hl = 10 \text{ cm}$  e então calculado o diâmetro hidráulico da célula e seguindo uma razão entre as duas grandezas de 6. Desta maneira, obteve-se uma porosidade  $\beta_s = 0,9$  superior a 0,57 como recomendado, como exemplificado na Tabela 4.

Tabela 5 - Dimensões da colmeia

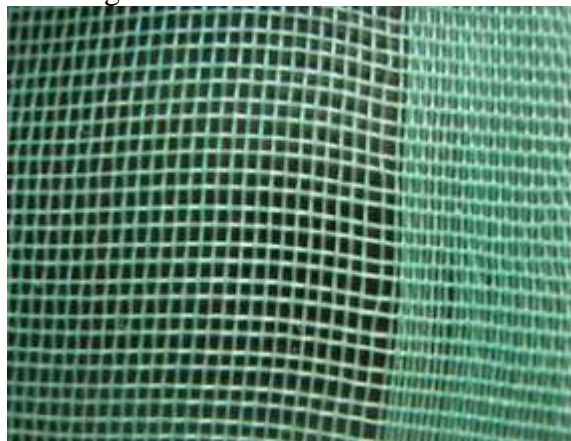
$Hl$	$Hd$	$Hl/Hd$	$e$	$\beta_s$
10	1,666	6	0,2	0,9998552

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.2.4 Escolha da tela

A tela, assim como a colmeia, possui a função de estabilizar o fluxo e reduzir a intensidade de turbulência na seção de testes. A tela foi colada na colmeia e juntas formaram uma estrutura chamada câmara de estabilização, agindo em conjunto para reduzir oscilações nas medidas.

Figura 14 - Tela usada na colmeia



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o dimensionamento da tela foi usado  $dw=0,26\text{mm}$  e  $Wm= 2,26 \text{ mm}$ , o que resulta em uma porosidade  $\beta_s= 0,78$  satisfazendo a faixa entre 0,5-0,8

$$\beta_s = \left(1 - \frac{dw}{Wm}\right)^2 \quad (15)$$

$$\beta_s = \left(1 - \frac{0,26}{2,26}\right)^2 \quad (16)$$

$$\beta_s = 0,78 \quad (17)$$

### 4.3 Instrumentação

Neste tópico, será abordado quais sensores serão usados no túnel de vento, a calibração dos mesmos, programação e componentes utilizados no sistema de aquisição de dados.

#### 4.3.1 Componentes e Sensores de Pressão e Velocidade

Três componentes serão usados nesse estudo:

- **BMP180:** é um sensor digital barométrico, fabricado pela BOSCH com um range de 300 - 1100hPa e uma precisão de 0,12 hPa, o que para este estudo possui uma precisão razoável e por ter dimensões 3,6mm x 3,8mm reduzidas é vasto o número de suas aplicações e torna versátil sua aplicação nos mais variados modelos na seção de teste na medição de pressão. Este sensor também mede temperatura. Para este projeto, foram adquiridos quatro sensores deste tipo. Por sua comunicação ser do tipo *I<sup>2</sup>C* e por possuírem apenas um endereço de registro, não seria possível a leitura de mais de um sensor simultaneamente com a mesma placa de aquisição. Para solucionar este problema, foi adquirido um multiplexador para que se torne possível a utilização de vários sensores simultaneamente.

Figura 15 - Sensor barométrico BMP 180



Fonte: Elaborada pelo autor.

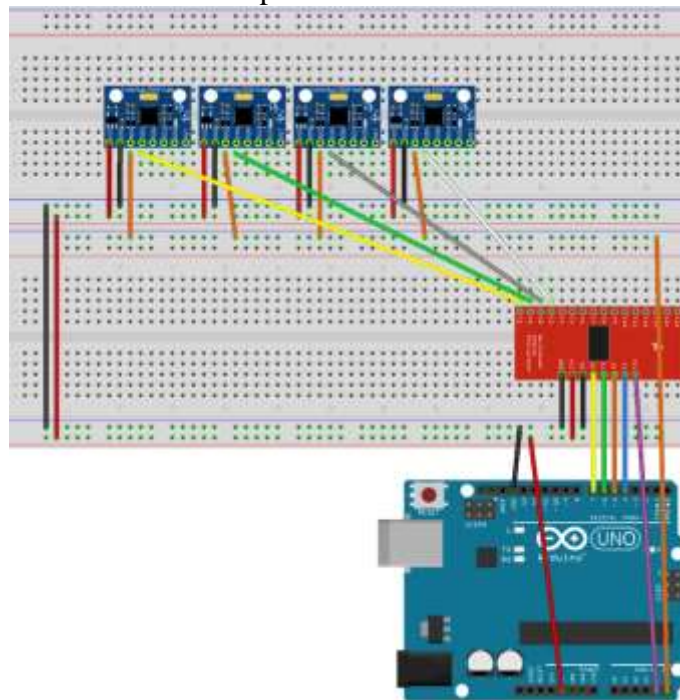
- **Multiplexador Cd74hc4067:** A função do multiplexador é a de, através da seleção de portas específicas, realizar leituras alternadamente em curtos períodos de tempo para que se leiam mais de um sinal. O multiplexador em questão possui 16 portas, o que dá margem para a utilização de até 16 sensores simultaneamente. Esta quantidade de portas foi pensada para atender a demandas futuras.

Figura 16 - Multiplexador Cd74hc4067



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 - Esquema de ligação de múltiplos sensores ao arduino por intermédio de um multiplexador



Fonte: Elaborada pelo autor.

- Mpxv7002dp com tubo de pitot: é um sensor de pressão de silício monolítico e possui uma faixa de pressão: -2 a 2 kPa. Este sensor utiliza duas tomadas de pressão, estática e total, o que o permite realizar o cálculo direto da velocidade através da equação:

$$v = \sqrt{\frac{2 * \Delta P}{\rho}} \quad (18)$$

Sendo:

$$v = \text{velocidade e } \Delta P = P_{tot} - P_{est}$$

$\rho$ =densidade (para o ar  $\rho=1,225 \text{ Kg/m}^3$  ao nível do mar e  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Figura 18 - Sensor Mpxv7002dp com tubo de pitot



Fonte: Elaborada pelo autor.

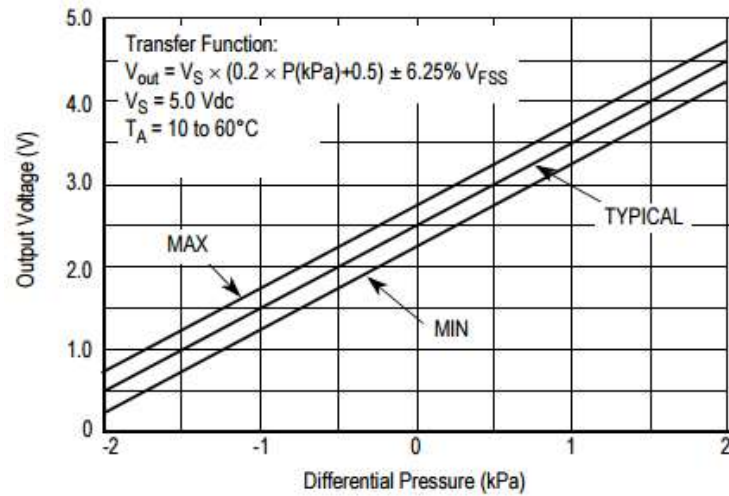
- Arduino Uno: O arduino é uma plataforma que foi usada para a aquisição e processamento de dados dos sensores.

#### 4.3.2 Calibração

O sensor BMP180 já possui calibração de fábrica, onde em seu código de programação já são embutidos onze fatores de correção e calibração.

O sensor Mpxv7002dp baseado na pressão diferencial para o cálculo de velocidade não possui calibração, que deve ser realizada. No *datasheet* do fabricante é disponibilizada uma função de transferência exemplificada no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Função de transferência



Fonte: Freescale Semiconductor, Inc. (2017).

Sendo  $V_{out}$  a tensão de saída,  $P$  a pressão e  $V_{FSS}$  a escala completa de tensão. Ainda no mesmo *datasheet* há a recomendação de se utilizar uma técnica de correção, conhecida como auto zero para reduzir o erro de  $\pm 6,25\%$  para  $\pm 2\%$ . Nesta técnica é crucial se conhecer inicialmente a sensibilidade do sensor. Para isto se usa o range de operação (-2kPa até 2kPa), a escala de tensão ( $V_{FSS}=3,5$ ) e a escala de bits. Como o sensor envia de 0 a 1023 bits e o *range* de pressão é de -2kPa até 2kPa variando em uma escala de tensão de 3,5 V, então:

$$S_{mV/bit} = \frac{3,5}{1023} = 3,42131 \text{ mV/bit} \quad (19)$$

$$S_{mV/Pa} = \frac{3,5}{4000} = 0,875 \text{ mV/Pa} \quad (20)$$

$$S = \frac{S_{mV/bit}}{S_{mV/Pa}} = \frac{3,42131}{0,875} \cong 3,91 \text{ Pa/bit} \quad (21)$$

A sensibilidade  $S$  fica assim determinada e agora se pode utilizar a técnica auto zero que trata de determinar o offset da pressão de referência, ou seja, o valor de pressão que está adicionado à pressão em condição inicial sem excitação e que deve ser retirada da leitura. Sendo  $P_{OFF}$  a pressão medida sem excitação (velocidade zero) e  $P_{inst}$  a pressão instantânea medida



diretamente sem correção em operação e  $P_{real}$  a pressão corrigida e próxima da real. Seguindo a técnica:

$$P_{real} = \frac{(P_{inst} - P_{OFF})}{S} \quad (22)$$

#### 4.3.3 Programação na plataforma Arduino

As aquisições de dados lidos pelos sensores foram feitas pelo Arduino modelo Uno e na sua programação contém a exposição dos dados de velocidade, pressão e temperatura. Através desses valores, ainda no mesmo código de programação, foram inseridas equações de altitude e densidade. O arduino disponibiliza esses valores em formato de string, expondo todas as variáveis criadas na programação como na Figura 19.

Figura 19 - Monitor serial do Arduino

```

= T1: 24.14 C = P1: 100814.00 Pa= T2: 24.27 C = P2: 100807.41 Pa A1= 42.63 A2= 43.14 V = 0.00
= T1: 24.16 C = P1: 100815.81 Pa= T2: 24.27 C = P2: 100810.57 Pa A1= 42.48 A2= 42.88 V = 0.00
= T1: 24.17 C = P1: 100815.72 Pa= T2: 24.28 C = P2: 100811.70 Pa A1= 42.49 A2= 42.78 V = 0.00
= T1: 24.17 C = P1: 100815.02 Pa= T2: 24.28 C = P2: 100814.47 Pa A1= 42.55 A2= 42.55 V = 2.53
= T1: 24.16 C = P1: 100813.72 Pa= T2: 24.29 C = P2: 100812.78 Pa A1= 42.65 A2= 42.69 V = 0.00
= T1: 24.16 C = P1: 100814.83 Pa= T2: 24.28 C = P2: 100813.39 Pa A1= 42.56 A2= 42.64 V = 0.00
= T1: 24.18 C = P1: 100815.40 Pa= T2: 24.28 C = P2: 100812.78 Pa A1= 42.51 A2= 42.69 V = 0.00
= T1: 24.16 C = P1: 100813.72 Pa= T2: 24.29 C = P2: 100810.92 Pa A1= 42.65 A2= 42.85 V = 0.00
= T1: 24.16 C = P1: 100813.12 Pa= T2: 24.28 C = P2: 100805.96 Pa A1= 42.70 A2= 43.26 V = 0.00

```

Fonte: Elaborada pelo autor.

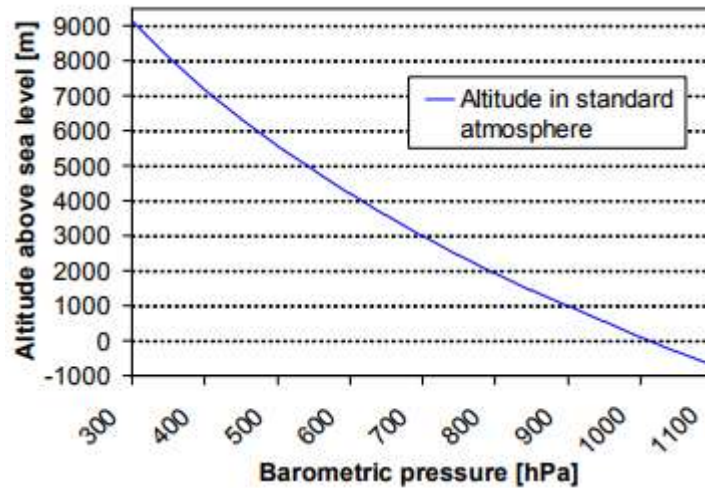
As leituras realizadas pelos sensores possuem ruídos que influenciam suas medições. Por possuírem definição baixa para este trabalho, os picos no gráfico de leitura foram consideráveis com flutuações que podem gerar erros, que tiveram que ser reduzidos através de uma suavização na plotagem de dados. Cada sensor de pressão mostra uma leitura da média aritmética de 50 amostras. Para o sensor de velocidade a técnica de auto zero se mostrou eficiente e não houve a necessidade da mesma suavização na leitura.

Na programação, valores de referência são definidos antes de se iniciar o laço de repetição (loop), necessária para a aplicação da técnica de auto zero, pois define a primeira leitura do sensor de velocidade como uma referência para se ter velocidade zero. No sensor de pressão, os valores de referência antes do loop servem para o cálculo da pressão ambiente antes do início dos testes e assim possibilitar a leitura do valor de altitude, que usa a função de altitude x pressão para ser calculada, exemplificada no Gráfico 2 e Equação 23. Portanto, antes do início dos testes, os sensores devem ser expostos ao ambiente com o mínimo de excitação possível



para que leiam valores de referência. O tempo desta exposição foi definido como 3000 ms, período de tempo suficiente para eliminar picos de carregamento (gerados ao início das primeiras leituras).

Gráfico 2 - Função Altitude[m] X Pressão[hPa]



Fonte: Bosch Sensortec. (2013).

$$altitude = 44330 * \left( 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{5,255}} \right) \quad (23)$$

Onde a pressão ao nível do mar é:  $p_0 = 1013,25\text{hPa}$ .

A densidade foi adquirida a partir da equação da lei dos gases ideais:

$$\rho = \frac{p}{R_{\text{específico}} T} \quad (24)$$

Onde a constante específica para o ar seco é de  $287,058 \text{ J}/(\text{Kg.K})$ .

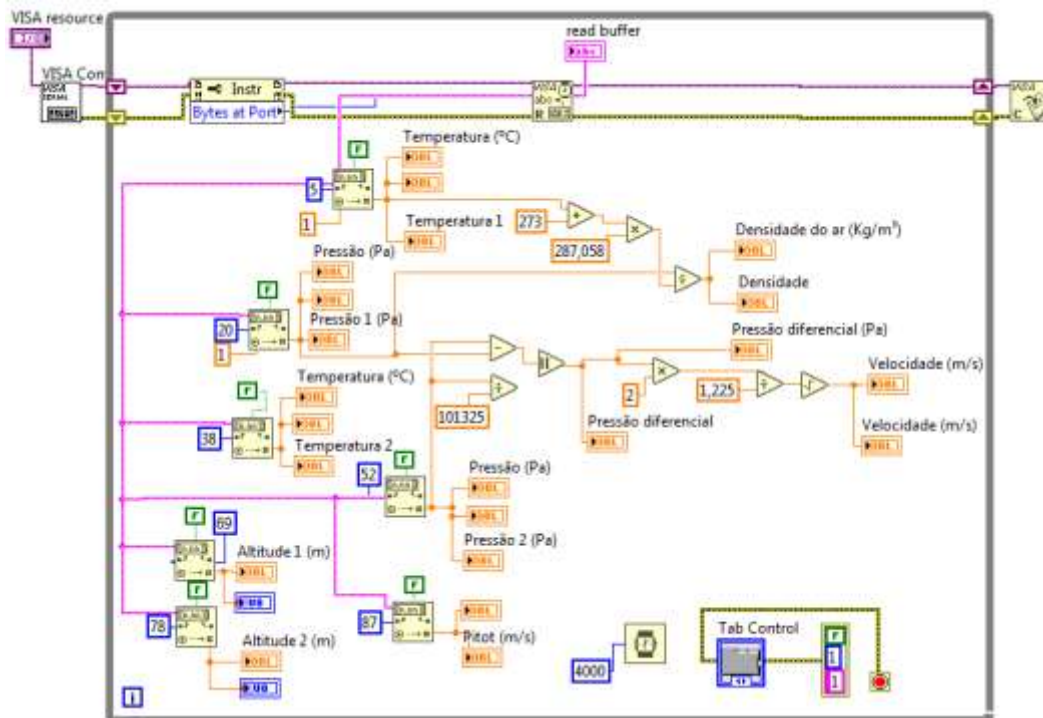
#### 4.3.4 Plataforma Labview

O LabVIEW é um software de engenharia de sistemas criado especificamente para aplicações que envolvam teste, medição e controle, com rápido acesso ao hardware e a informações obtidas a partir dos dados.

A linguagem de programação G é a essência do LabVIEW, tanto que é frequentemente chamada de “programação em LabVIEW”. Com o uso dessa linguagem, há a possibilidade de aliar rapidamente tarefas como aquisição de dados, análise e operações lógicas,

e ainda compreender como os dados estão sendo modificados. De um ponto de vista técnico, G é uma linguagem gráfica de programação utilizada na forma de fluxo de dados, na qual os nós (operações ou funções) trabalham sobre os dados assim que eles ficam disponíveis, melhor do que a maneira sequencial linha-após-linha que muitas linguagens de programação empregam. Neste formato se distribui o “fluxo” dos dados graficamente através da aplicação com fios que conectam a saída de um nó à entrada de outro, como exemplificado na Figura 20.

Figura 20 - Programação em código G na plataforma LabVIEW

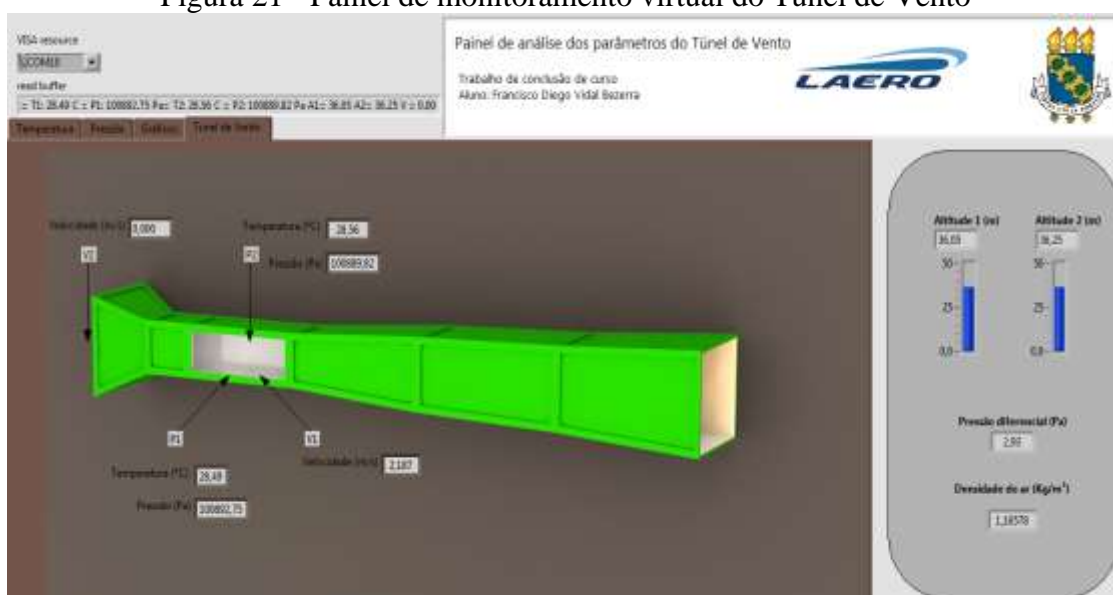


Fonte: Elaborada pelo autor.

A ideia de poder integrar todas as leituras do túnel de vento em um só painel virtual pareceu prática e didática para a compreensão dos fenômenos da mecânica dos fluidos. As variáveis medidas pelos sensores foram enviadas ao LabVIEW, que as processou e foram manipuladas para que se resultasse também em outras variáveis (por exemplo, pressões diferenciais, densidade do ar, altitude etc.)

Após a programação em blocos, automaticamente é montado em paralelo o painel virtual, onde se é possível realizar as leituras dos sensores, como na Figura 21.

Figura 21 - Painel de monitoramento virtual do Túnel de Vento



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.4 Modelagem computacional

Os estudos computacionais foram realizados através do software FLUENT e a análise de dados pelo CFD-Post, um conjunto de softwares disponíveis dentro da plataforma ANSYS versão 14.5

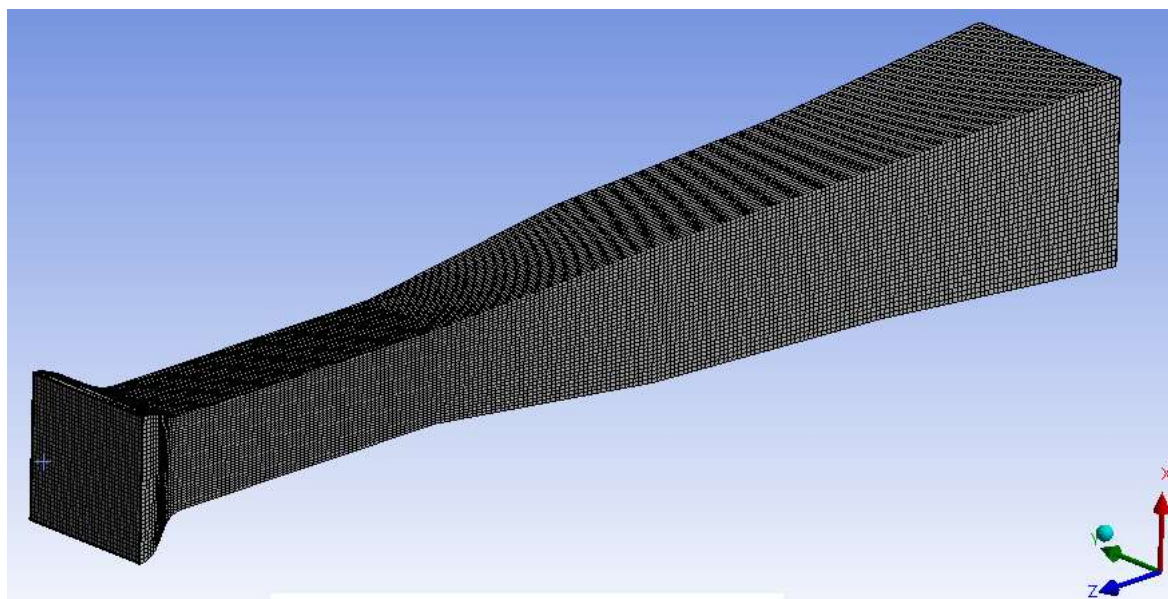
O hardware disponível para o processamento foi:

- Processador: Intel® Core™ i7 – 3610QM CPU @ 2.3GHz
- Memória instalada (RAM): 8,00 GB
- Sistema operacional: *Windows 7 Ultimate – 64 Bits*

##### 4.4.1 Malha

Foi escolhida uma malha estruturada e hexaédrica por sua simplicidade e também por ser recomendada pelo tutorial do software para este caso em estudo, como a exemplificada na Figura 22.

Figura 22 - Malha discretizada do Túnel de Vento

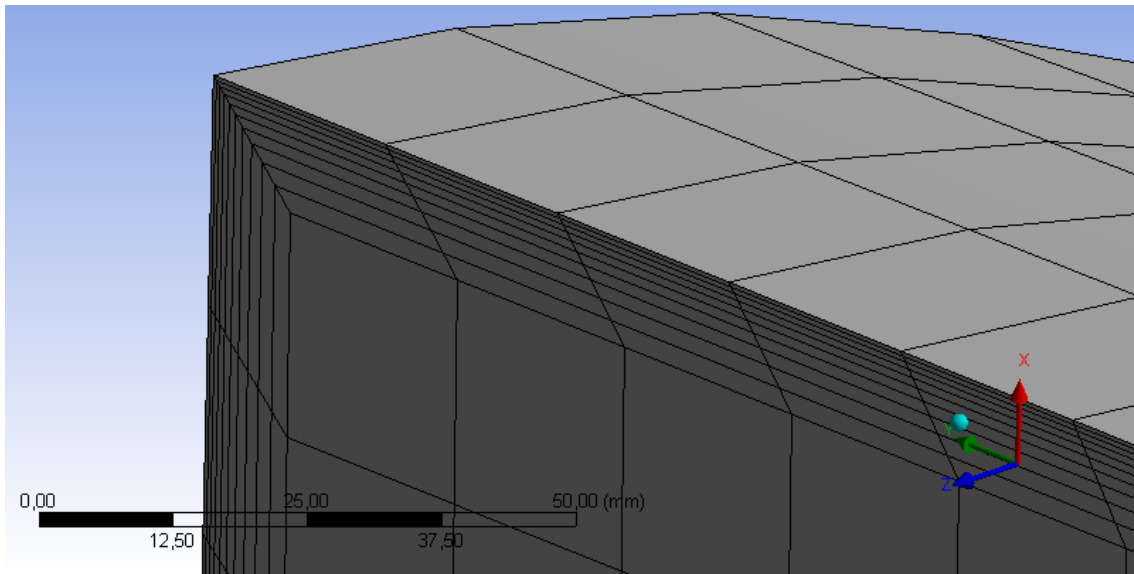


Fonte: Elaborada pelo autor.

A definição da malha foi sendo alterada para que se adequasse aos resultados próximos aos mensurados em laboratório

Para se ter um estudo de qualidade, a construção da malha deve prever possíveis fenômenos que venham a ocorrer. Para este estudo, na proximidade das paredes do túnel, o fluido possui velocidade nula, pois nesta região não há seu deslizamento, portanto, próximo à superfície, a velocidade é nula e isso altera o perfil de velocidade ao longo de uma seção do túnel de vento. Pensando neste efeito, foi usado o recurso *inflation*, exemplificado na Figura 23, para refinar a malha especificamente próxima às paredes do túnel. Com esta ferramenta, foi possível tornar mais realístico o estudo, pois esta é uma região crítica e que teve maior nível de discretização.

Figura 23 - Influência da ferramenta *inflation* nas proximidades das paredes do Túnel de Vento



Fonte: Elaborada pelo autor.

O tipo de *inflation* utilizado foi o *Total Thickness*, onde são determinadas em quantas camadas a malha será processada, a razão de crescimento de célula e a dimensão máxima ou espessura em que se quer definir. No caso deste estudo, a espessura máxima que será definida foi maior que a espessura da camada limite para que seus efeitos possam ser bem representados. Os parâmetros utilizados para o *inflation* podem ser vistos na Figura 24.

Figura 24 - Característica do *inflation* utilizado

Details of "Inflation" - Inflation	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Named Selections
Boundary	Wall
Inflation Option	Total Thickness
Number of Layers	10
Growth Rate	1,2
Maximum Thickness	15, mm
Inflation Algorithm	Pre

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.4.2 Condições de Contorno

Para este estudo, serão considerados dois modelos, um com o túnel de vento sem bocal e outro contendo-o. O diâmetro hidráulico ( $Dh$ ) foi calculado para cada seção e foram inseridas as condições de contorno com os dados da Tabelas 5 e 6.

Tabela 6 - Dados de condições de contorno sem bocal

<b>Sem bocal</b>				
Fronteira/tipo	Pressão (Pa)	Dh(m)	Ti(%)	Rugosidade (m)
<i>pressure-inlet</i>	0 (gauge)	0,495	5	***
<i>exhaust-fan</i>	20 - 45	0,4975	5	***
<i>wall</i>	<i>no slip</i>	***	***	0,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 7 - Dados de condições de contorno com bocal

<b>Com bocal</b>				
Fronteira/tipo	Pressão (Pa)	Dh(m)	Ti(%)	Rugosidade (m)
<i>pressure-inlet</i>	0 (gauge)	0,3914	5	***
<i>exhaust-fan</i>	20 - 45	0,4975	5	***
<i>wall</i>	<i>no slip</i>	***	***	0,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores da intensidade de turbulência ( $TI$ ) e a rugosidade foram determinadas no programa e não foram alteradas inicialmente para que se estudassem os seus resultados preliminares.

#### 4.4.3 O Modelo de Turbulência

O modelo escolhido e recomendado pelo manual do software foi o *Realizable*  $k-\epsilon$ . Este modelo é uma segunda variação de um outro chamado *Standard*  $k-\epsilon$ , sendo mais completo por satisfazer certas restrições matemáticas, coerente com a física dos escoamentos turbulentos.

#### 4.5 Testes

Neste estudo foram realizadas medições através de sensores de pressão e velocidade. A natureza dos testes se basearam em avaliar o perfil de velocidade, através de medições ao longo do eixo central e transversal da seção de testes, e a intensidade de turbulência no centro da seção de testes, variando as configurações de geometria do túnel de vento e rotação do exaustor, controlado pelo inversor de frequência, para que se pudesse atingir diversas velocidades de escoamento. Escolheu-se uma variação total de rotações entre 300 a 800 rpm para todos os testes.

Para as medições se deu necessária a construção de um suporte que comportasse com rigidez, suportando as cargas aplicadas devidas ao escoamento do ar, e estabilidade os sensores. Para este suporte, foi construída uma haste abaulada, para que tivesse um desenho aerodinâmico favorável e interferisse minimamente o escoamento próximo aos sensores, assim como uma base em madeira para ser fixada à parede inferior do túnel. O suporte comportando dois sensores barométricos e um de velocidade (pitot) pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 - Suporte de fixação dos sensores



Fonte: Elaborada pelo autor

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Sensores: Análise das leituras**

Os sensores barométricos BMP 180 se mostraram ineficientes nas medições de pressão total, por ter apresentado flutuações bruscas e aleatórias em longo período em um intervalo de amostragem, tornando as suas leituras inconsistentes. Por outro lado, para a medição de pressão estática os mesmos sensores obtiveram bons resultados e qualidade na medição, aproximando-se dos dados coletados nas simulações computacionais.

Já o sensor Mpxv7002dp de velocidade por pressão diferencial foi o que mais foi exigido nos testes deste trabalho, por ser o único responsável pelas leituras de velocidade e esta variável ter sido muito utilizada nos cálculos de perfil de velocidade e de intensidade de turbulência. Obteve boa qualidade nas medições e muitas vezes se aproximando dos dados adquiridos nas simulações.

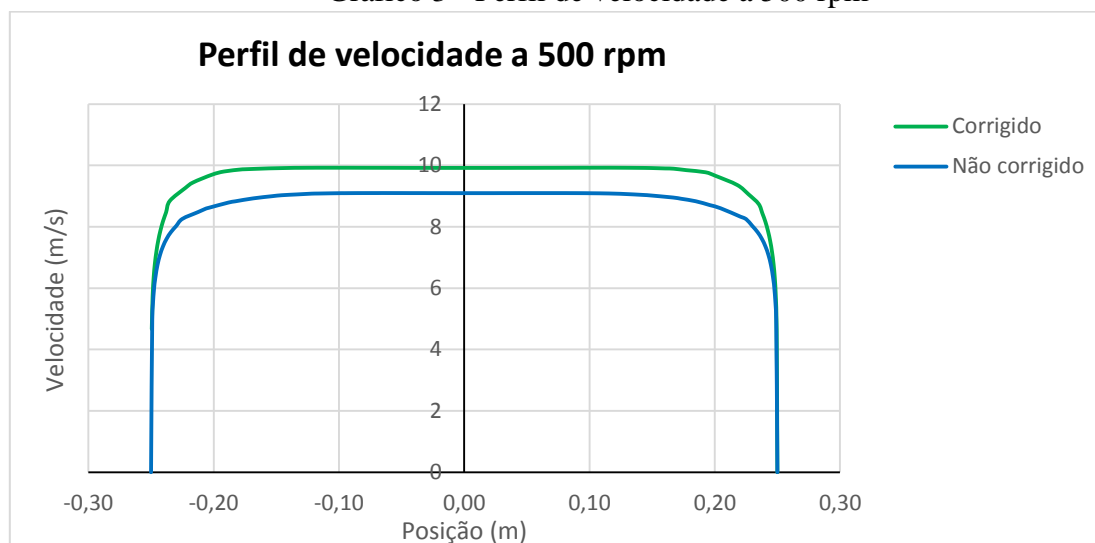
### **5.2 Análise do perfil de velocidade**

A espessura da camada limite foi avaliada para que se modelasse com maior precisão o estudo de simulação computacional, pois deve-se prever os efeitos das fronteiras (wall) de não deslizamento. Inicialmente se modelou a malha com largura de célula de 50 mm nos modelos sem bocal e com bocal e em rotações do exaustor de 500 rpm e 800 rpm. A partir da medição inicial da espessura da camada limite através da plotagem do perfil de velocidade na seção de testes, foi aumentada a definição da malha com a redução da largura de célula para valor menor até que a espessura da camada limite não tivesse consideráveis alterações.

Os Gráficos 3 e 4 do perfil de velocidade plotados no software na seção de testes e as Tabelas 7 e 8 mostraram os primeiros dados de espessura da camada limite, sua posição final, a velocidade livre e a velocidade medida pelo sensor de pitot na posição central da seção de testes.



Gráfico 3 - Perfil de velocidade a 500 rpm



Fonte: Elaborada pelo autor.

No Gráfico 3 pode-se comparar o perfil de velocidade com o bocal (corrigido) e sem (não corrigido) com rotação de 500 rpm e notou-se uma maior velocidade máxima com o teste realizado com o bocal e o efeito de não deslizamento próxima às paredes do túnel agindo, uma vez que a velocidade nesta região é nula.

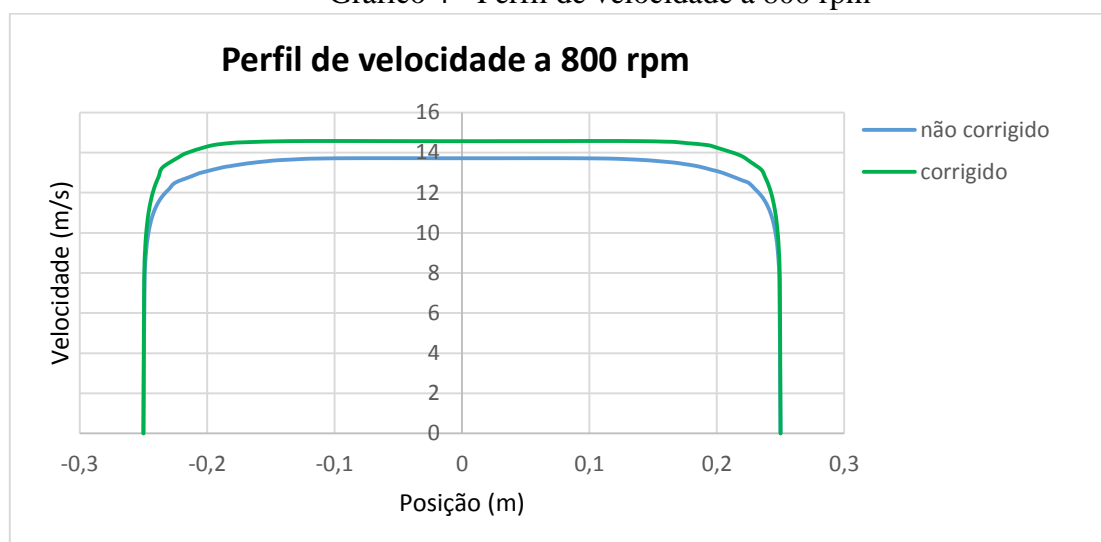
Tabela 8 - Dados referentes à espessura da camada limite a 500 rpm

Tipo (500 rpm)	$v_{livre}(m/s)$	$v_{medida}(m/s)$	$90\%v_{livre}$	Posição (cm)	Espessura (cm)
Sem bocal	9,09746	9,4303	8,187714	22,64	2,36
Com bocal	9,92454	9,6684	8,932086	23,23	1,77

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados da Tabela 7 demonstram que as diferenças entre as velocidades livre, adquiridas da simulação, e a medida em laboratório estão próximas, o que sugere razoável modelagem do estudo simulado.

Gráfico 4 - Perfil de velocidade a 800 rpm



Fonte: Elaborada pelo autor.

No Gráfico 4 notou-se uma diferença de velocidade máxima entre o teste realizado a 800 rpm com o bocal (corrigido) e sem o bocal (não corrigido) menor que a diferença mostrada no teste realizado a 500 rpm.

Tabela 9 - Dados referentes à espessura da camada limite a 800 rpm

Tipo (800 rpm)	$v_{livre}(m/s)$	$v_{medida}(m/s)$	$90\%v_{livre}$	Posição (cm)	Espessura (cm)
Sem bocal	13,72	15,35	12,35	22,7	2,28
Com bocal	14,58	15,77	13,12	23,59	1,41

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o aumento da rotação do exaustor a 800 rpm, os dados da Tabela 8 mostraram maior discrepância entre os valores simulados e medidos em laboratório.

Após refinar a malha, reduzindo a largura mínima de célula, foram alteradas as espessuras do *inflation*, porém com dimensão maior que a da camada limite anteriormente adquirida para que o efeito do não deslizamento de fronteira pudesse ser posto em conta. Os resultados para o ajuste do *inflation* estão nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 10 - Dimensionamento do *inflation* sem bocal

Sem bocal				
Rotação (rpm)	Largura da malha (mm)	$V_{livre}$ (m/s)	Espessura	<i>Inflation</i> (cm)
500	50	9,09746	2,36	2,5
	20	9,3261	1,93	2,2
800	50	13,7253	2,8	2,4
	20	13,2721	2,13	2,2

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 11 - Dimensionamento do *inflation* com bocal

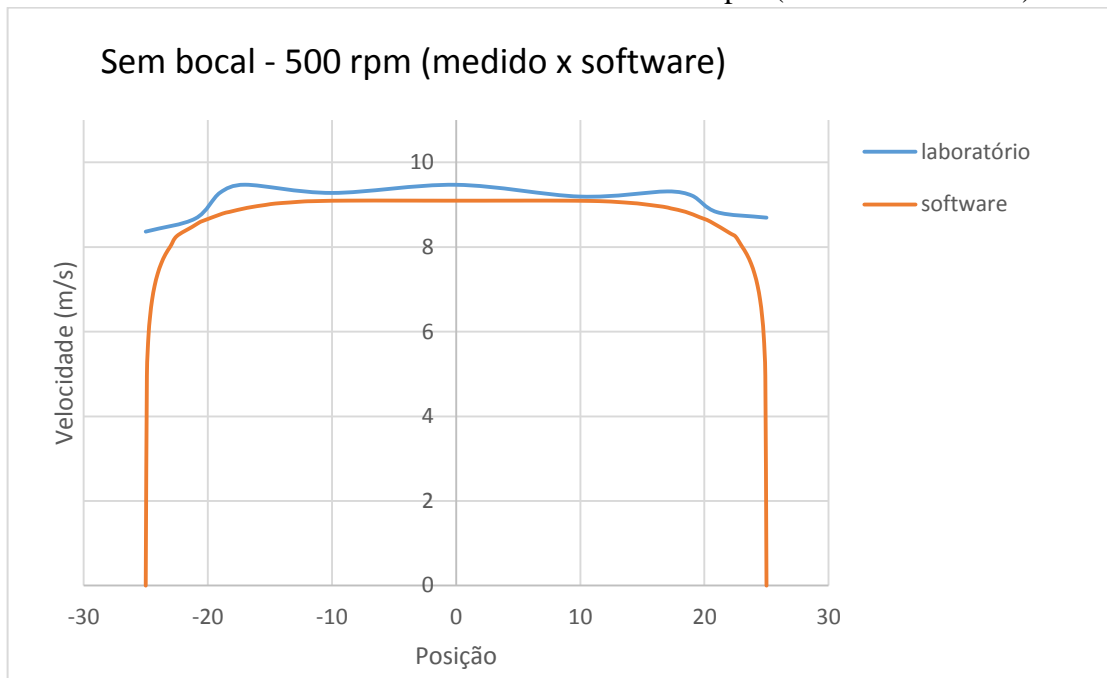
Com bocal				
Rotação (rpm)	Largura da malha (mm)	$V_{livre}$ (m/s)	Espessura (cm)	<i>Inflation</i> (cm)
500	50	9,9245	1,77	2
	20	9,5347	1,5	1,5
800	50	14,5816	1,41	1,5
	20	14,3762	1,19	1,3

Fonte: Elaborada pelo autor.

Dos dados das Tabelas 9 e 10, nota-se que com maior refino da malha se obtiveram menores espessuras da camada limite e assim menores espessuras necessárias para o *inflation*, sugerindo que, com uma menor largura de malha, o grau de discretização nas proximidades da fronteira tende a ser menor.

Finalmente, foram realizados testes de medição de velocidade ao longo da seção de testes que serviram para a comparação do perfil de velocidade gerado pelo software em simulações e o gerado a partir das medições em posições pré-determinadas ao longo da seção de testes em laboratório e exemplificados nos Gráficos 5 e 6.

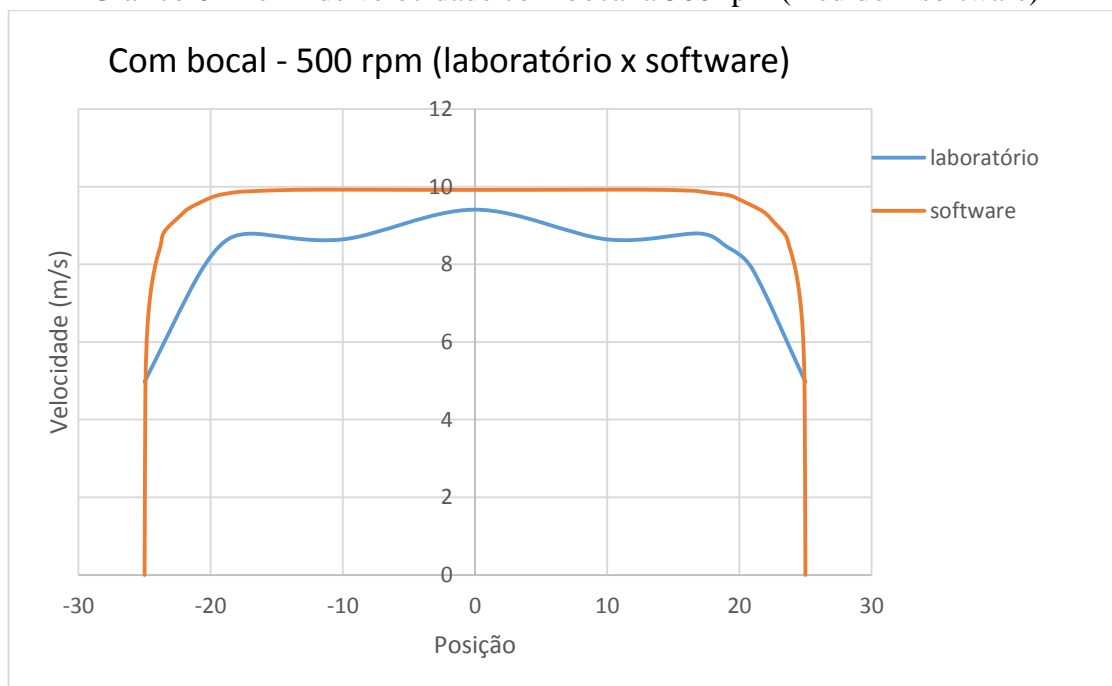
Gráfico 5 - Perfil de velocidade sem bocal a 500 rpm (medido x software)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Através da comparação do perfil de velocidade na seção de testes sem o bocal, como mostrado no Gráfico 5, notou-se uma ligeira aproximação dos dois perfis e discrepâncias razoáveis e que podem ter sido geradas por erros na leitura dos sensores.

Gráfico 6 - Perfil de velocidade com bocal a 500 rpm (medido x software)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A comparação do perfil de velocidade com o bocal também demonstrou algumas discrepâncias, conforme demonstrado no Gráfico 6, mas sugere que o estudo simulado está muito próximo do real realizado em laboratório.

A comparação das espessuras de camada limite medidas pelo software e em laboratório, assim como seus erros estão na Tabela 11.

Tabela 12 - Espessuras de camada limite medidas pelo software e em laboratório

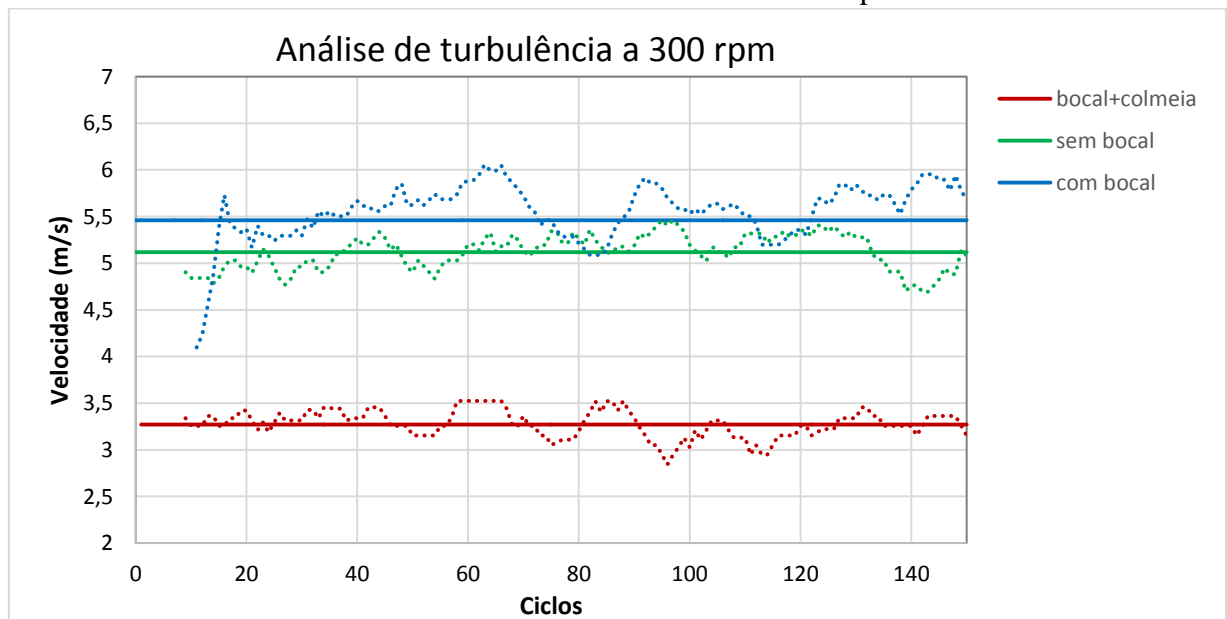
Configuração	Laboratório	Software	Erro (%)
Sem bocal	2,1 cm	2,2 cm	4,5
Com bocal	6,1 cm	1,5 cm	300

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 5.3 Turbulência: análise de turbulência de cada geometria em diversas velocidades

Uma análise de turbulências para diferentes configurações de geometrias e rotações do exaustor foi feita considerando as flutuações das velocidades e suas médias na seção de testes. Os resultados das leituras de velocidade estão plotados nos Gráficos 7, 8 e 9, assim como os cálculos de intensidade de turbulência constam seus resultados nas tabelas 12, 13 e 14.

Gráfico 7 - Análise de turbulência a 300 rpm



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na análise do Gráfico 7, percebe-se maiores flutuações para os gráficos dos estudos realizados sem colmeia.

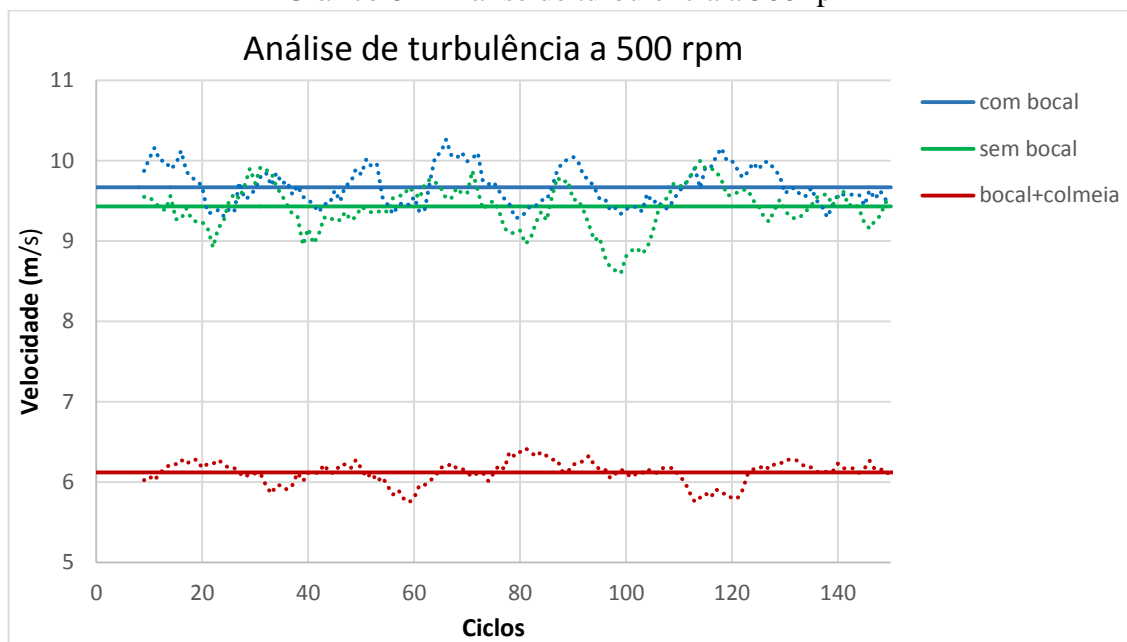
Tabela 13 - Intensidade de turbulência a 300 rpm

300 rpm	$\bar{u}(m/s)$	$\sqrt{u'^2}(m/s)$	$u'(\%)$
Sem bocal	5,1181	0,8479	16,5678
Com bocal	5,4600	0,6306	11,5505
Bocal+Colmeia	3,2708	0,0613	1,8746

Fonte: Elaborada pelo autor.

Da Tabela 12, percebeu-se que a intensidade de turbulência a uma rotação de 300 rpm para o exaustor na configuração com colmeia foi menor, visto que possuiu menor flutuação de velocidade, enquanto a configuração sem o uso do bocal obteve a maior intensidade de turbulência na seção de testes.

Gráfico 8 - Análise de turbulência a 500 rpm



Fonte: Elaborada pelo autor.

Da mesma forma que no estudo realizado com uma rotação de 300 rpm para o exaustor, no estudo realizado a 500 rpm e que gerou o Gráfico 8, a configuração em que se usa a colmeia e bocal se mostrou com menor flutuação de velocidade.

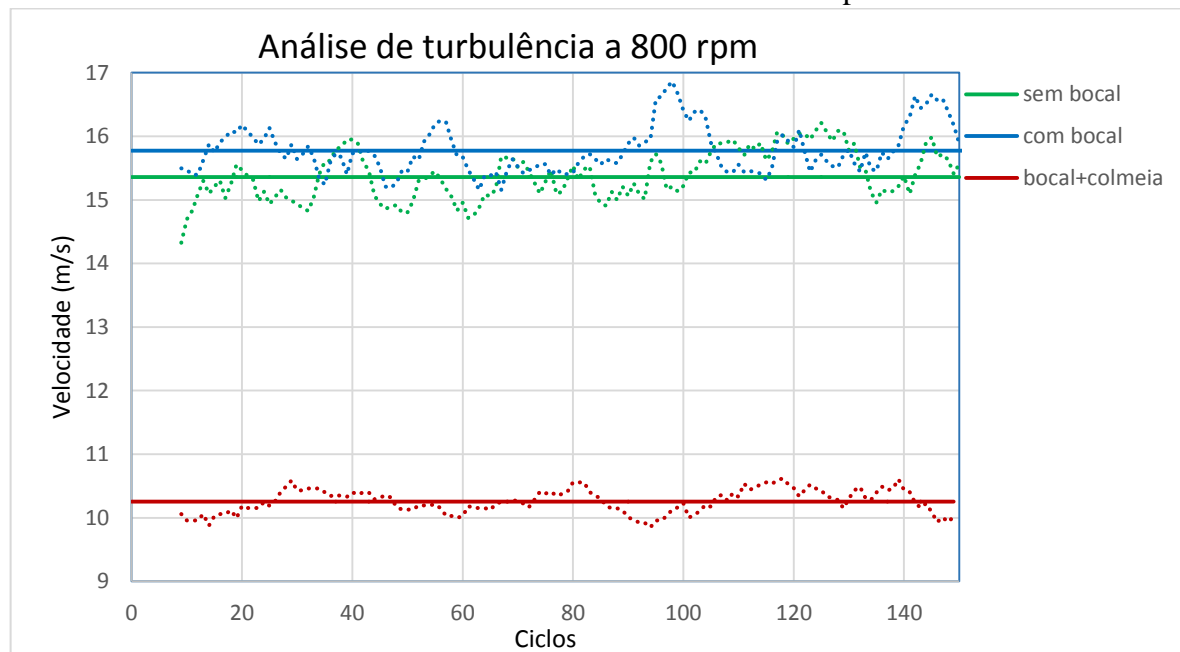
Tabela 14 - Intensidade de turbulência a 500 rpm

500 rpm	$\bar{u}(m/s)$	$\sqrt{u'^2}(m/s)$	$u'(\%)$
Sem bocal	9,4303	0,9222	9,779479391
Com bocal	9,6684	0,8907	9,212509
Bocal+Colmei a	6,119013	0,519765168	8,494264586

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como já visto do Gráfico 8, a configuração em que se usou colmeia e bocal apresentou menor intensidade de turbulência como mostrado na Tabela 13. No teste realizado tendo a rotação do exaustor a 500 rpm, a configuração sem bocal mostrou-se com maior intensidade de turbulência, assim como no teste realizado a 300 rpm.

Gráfico 9 - Análise de turbulência a 800 rpm



Fonte: Elaborada pelo autor.

No Gráfico 9 notou-se que o padrão de flutuação de velocidade é muito parecido aos testes realizados a 300 e 500 rpm.

Tabela 15 - Intensidade de turbulência a 800 rpm

<b>800 rpm</b>	$\bar{u}(m/s)$	$\sqrt{\overline{u'^2}}(m/s)$	$u'(\%)$
Sem bocal	15,35911	1,339319967	8,720037
Com bocal	15,774027	1,283184	8,134789
Bocal+Colmeia	10,25459	0,615137947	5,99866

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados da Tabela 14 sugerem que, da mesma maneira como nos testes anteriores, a configuração em que se usa colmeia e bocal apresenta menor intensidade de turbulência e a configuração sem bocal se mostrou como tendo a maior intensidade de turbulência.



## 6 CONCLUSÃO

Os sensores barométricos bmp180, por terem demonstrado ineficiência nas medições de pressões totais, não são recomendados para serem utilizados em associação para o cálculo de velocidade. Por outro lado, por ter apresentado bons resultados nas leituras de pressões estáticas, podem ser utilizados nas tomadas de pressões superficiais, como em asas ou perfis diversos ou até mesmo para medição de altitude e pressões atmosféricas para servirem de referência.

A integração do arduino com a plataforma LabVIEW, apesar de raras vezes ter demonstrado instabilidade na sincronia das leituras, demandou que houvesse um tratamento das mesmas para que fossem retirados dados espúrios. A combinação da placa arduino para aquisição de dados e sua integração com o LabVIEW, por ser de baixo custo, se mostrou viável e muito bem aceitável para testes de média precisão e suficiente para a realização de práticas laboratoriais didáticas.

Através da análise do perfil de velocidade ao longo da seção transversal de testes e sua plotagem comparativa, conclui-se que o sensor de pressão diferencial para medição da velocidade (pitot) se mostrou eficiente por produzir valores próximos aos adquiridos pela simulação.

A velocidade máxima na seção de testes utilizando a configuração com bocal apresentou pequeno aumento em relação à configuração sem o bocal, de acordo como previsto na literatura, cumprindo sua função de acelerar o fluido na seção de testes. Além da influência da alteração da geometria na velocidade medida na seção de testes, o bocal também foi um fator determinante para a redução da intensidade de turbulência na referida seção.

A colmeia e a tela, que em conjunto formam a câmara de estabilização, cumpriram uma função importante na estabilização do escoamento quanto da sua análise de turbulência. Os dados gerados demonstraram que a câmara de estabilização, apesar de reduzir a velocidade na seção de testes, estabilizou as medições de velocidade e diminuiu a intensidade de turbulência. Portanto, a configuração utilizando bocal e colmeia demonstrou menor intensidade de turbulência quando comparada às outras duas configurações (bocal e sem bocal).

Os dados gerados nas simulações no cálculo da espessura da camada limite e no desenho do perfil de velocidade na seção de testes mostrou grande aproximação às medições realizadas em laboratório, demonstrando que o modelo utilizado para a simulação foi coerente e suficiente.

## REFERÊNCIAS

ANSYS. CFX, 2013. Solver Theory manual. Version 14.5. Ansys.

ARDUINO. Arduino UNO. Disponível em:

<<http://www.arduino.org/products/boards/arduino-uno>> Acesso: em 7 de julho de 2017.

BARLOW, B.J. ; RAE W.H.; POPE, A. Low Speed Wind Tunnel Testing. 3ª ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.

BELL, J. H; MEHTA, R. D. Contraction Design for Small Low-Speed Wind Tunnels. Stanford: 1988. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19890004382>> Acesso em: 7 de julho de 2017.

BOSCH SENSORTEC. Bmp180 datasheet. Disponível em: <<https://cdn.shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>> Acesso em: 7 de julho de 2017.

BOUNDARY LAYER. Disponível em: <<http://patentimages.storage.googleapis.com/EP2048508A2/imgb0001.png>>. Acesso em 7 de julho de 2017.

ÇENGEL, A.Y. ; Cimbala, M. J. Fluid mechanics : Fundamentals and Applications. New York: McGraw-Hill, 2006.

CHOU, P.Y., 1945. On the velocity correlations and solution of the equations of turbulent fluctuation. Quart. Appl. Math. 3, 38-54

DRYDEN, H. L.; KUTHE, A. M. (1930). Natl. Advisory Comm. Aeronaut. Tech. Repts., n.342

ESCOAMENTO TURBULENTO. Disponível em: <<http://mecflu2.usuarios.rdc.puc-rio.br/>>. Acesso em 7 de julho de 2017.

FOX, R. W.; MCDONALD. A. T. Introdução à Mecânica dos Fluidos, 4ª Ed, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1998.

FREESCALE SEMICONDUCTOR. Implementing auto-zero for integrated pressure sensors. Disponível em: <<http://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN1636.pdf>> Acesso em: 7 de julho de 2017.

FREESCALE SEMICONDUCTORINC. MPXV7002DP Datasheet. Disponível em: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/131940/FREESCALE/MPXV7002DP.html>>. Acesso em 7 de julho de 2017.

HINZE, J. O. (1959). Turbulence : An Introduction to Its Mechanism and Theory. New York, McGraw-Hill.

KOLMOGOROV, A. N., 1942, "Equations of turbulence motion of an incompressible fluid". Akad. Nauk USSR, Ser. Phys., (transl. into English by D. B. Spalding as Imperial College, Mech. Engng. Dept. Report ON/6, 1968), Vol. 6, 56-58.

LAUNDER, B. E.;SHARMA, B. I., 1974."Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow near a Spinning Disc," Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 1, No. 2, 131-138.

NATIONAL INSTRUMENTS. Aprenda LabVIEW. Disponível em: <<http://www.ni.com/academic/students/learn-labview/pt/>> Acesso em: 7 de julho de 2017.

O PROCESSO DE SENSORIAMENTO. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/>>. Acesso em 7 de julho de 2017.

SCHEIMAN, J., 1981, "Considerations for the Installation of Honeycomb and Screens To Reduce Wind-Tunnel Turbulence", NASA Technical Memorandum, Langley Research Center, Hampton, Virginia, August, 81868.

WATTENDORF, F.L. Factors Influencing the Energy Ratio of Return Flow Wind Tunnels. 5th International Congress for Applied Mechanics, Cambridge, September 1938.

WILCOX, D. C. Turbulence Modeling for CFD. California: DCW, 1994.

## APÊNDICE

Programa utilizado para leitura dos sensores e controle de iluminação do túnel de vento por meio da interface arduino.

```
#include <SFE_BMP180.h>
#include <Wire.h>
#include <math.h>
#define SAMPLES 50      // Número de amostras
double tempvector;     // Vetor que armazenará as leituras
double tempSensor = 0.0; // Variável auxiliar
double valAnalog = 0;  // Variável para armazenar a leitura do sensor pitot
SFE_BMP180 p1,p2,p3,p4;
//led1=7;  //LED
int botao=7; //LED
int EN = 13;
int s0 = 12;
int s1 = 11;
int s2 = 10;
int s3 = 9;
//
//          SIG
//Any Arduino pins labeled: SDA SCL
//Uno, Redboard, Pro:   A4  A5
//Mega2560, Due:       20  21
//Leonardo:           2   3
//- (GND) to GND
//+ (VDD) to 3.3V
void out1(){
  digitalWrite(EN, HIGH);
digitalWrite(s0, HIGH);
  digitalWrite(s1, LOW);
  digitalWrite(s2, LOW);
  digitalWrite(s3, LOW);
digitalWrite(EN, LOW);
}
void out2(){
  digitalWrite(EN, HIGH);
digitalWrite(s0, LOW);
digitalWrite(s1, HIGH);
  digitalWrite(s2, LOW);
digitalWrite(s3, LOW);
```

```
digitalWrite(EN, LOW);
}
void out3(){
  digitalWrite(EN, HIGH);
digitalWrite(s0, HIGH);
  digitalWrite(s1, HIGH);
  digitalWrite(s2, LOW);
  digitalWrite(s3, LOW);
digitalWrite(EN, LOW);
}
void out4(){
  digitalWrite(EN, HIGH);
  digitalWrite(s0, LOW);
digitalWrite(s1, LOW);
  digitalWrite(s2, HIGH);
digitalWrite(s3, LOW);
  digitalWrite(EN, LOW);
}
int asPin = 1;      // MPXV5004DP Vout pin - A1
float Poff = 0;    // Variável para V offset (autozero)
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  delay(3000);
// pinMode(led1,OUTPUT);
pinMode(botao,INPUT);
  pinMode(EN,OUTPUT);
pinMode(s0,OUTPUT);
  pinMode(s1,OUTPUT);
  pinMode(s2,OUTPUT);
  pinMode(s3,OUTPUT);
Poff = analogRead(asPin) * 3.910068426197458455522971652; //pitot
  out1();
  p1.begin();
  out2();
  p2.begin();
  out3();
  p3.begin();
  out4();
  p4.begin();
```

```

}
void loop()
{
float Pinst = 0; //pitot
float Pout = 0; //pitot
float dynPress = 0; //pitot
float airSpeed = 0; //pitot
Pinst = analogRead(asPin) * 3.910068426197458455522971652; //pitot
Pout = (Pinst - Poff);
dynPress = Pout;
airSpeed = sqrt((2 * dynPress)/1.225);
out1(); //Ler Sensor 1

char status;
double T1,P1;
for (int i=0; i<= SAMPLES; i++){
status = p1.startTemperature();
if (status != 0)
{
delay(status);
status = p1.getTemperature(T1);
if (status != 0)
{
status = p1.startPressure(3);
if (status != 0)
{
delay(status);
status = p1.getPressure(P1,T1);
}
}
}
tempvector = P1;
tempSensor = tempSensor + tempvector;
}
double A = tempSensor/(SAMPLES+1);
tempSensor=0;
out2(); //Ler sensor 2
double T2,P2;
for(int i=0; i<=SAMPLES; i++)
{

```

```

status = p2.startTemperature();
if (status != 0)
{
delay(status);
status = p2.getTemperature(T2);
if (status != 0)
{
status = p2.startPressure(3);
if (status != 0)
{
delay(status);
status = p2.getPressure(P2,T2);
}
}
}
tempvector = P1;
tempSensor = tempSensor + tempvector;
}

double B = tempSensor/(SAMPLES+1);
tempSensor=0;
//out3();          //Ler Sensor 3
//double T3,P3;
// status = p3.startTemperature();
// if (status != 0)
// {
//   delay(status);
//   status = p3.getTemperature(T3);
//   if (status != 0)
//   {
//     Serial.print(" T3: ");
//     Serial.print(T3,2);
//     Serial.print(" C ");
//     status = p3.startPressure(3);
//     if (status != 0)
//     {
//       delay(status);
//       status = p3.getPressure(P3,T3);
//       if (status != 0)
//       {

```

```

// Serial.print(" P3: ");
// Serial.print(P3,2);
// Serial.print(" mb");
// }
// }
// }
// }
// out4();           //Ler Sensor 4
//
// double T4,P4;
//
// status = p4.startTemperature();
// if (status != 0)
// {
// delay(status);
//
// status = p4.getTemperature(T4);
//
// if (status != 0)
// {
// Serial.print(" T4: ");
// Serial.print(T4,2);
// Serial.print(" C ");
// status = p4.startPressure(3);
// if (status != 0)
// {
// delay(status);
// status = p4.getPressure(P4,T4);
// if (status != 0)
// {
// Serial.print(" P4: ");
// Serial.print(P4,2);
// Serial.print(" mb");
// Serial.print("\n");
// }
// }
// }
// }
Serial.print("= T1: ");
Serial.print(T1,2);

```



```
Serial.print(" C ");
Serial.print("= P1: ");
Serial.print((A-4.3)*100,2);
Serial.print(" Pa");
Serial.print("= T2: ");
Serial.print(T2,2);
Serial.print(" C ");
Serial.print("= P2: ");
Serial.print((B-4.34)*100,2);
Serial.print(" Pa ");
Serial.print("A1= ");
Serial.print(44330*(1-pow((A-4.3)/1013.25,1/5.255))); //Altitude 1 em m
Serial.print(" A2= ");
Serial.print(44330*(1-pow((B-4.335)/1013.25,1/5.255))); //Altitude 2 em m
Serial.print(" V = ");
Serial.println(airSpeed);
//delay(100);
}
```