



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA  
FACULDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
Bacharelado em Ciência e Tecnologia

Lucas da Silveira Moreira

**PROPOSTA E CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO ADAPTADO  
PARA ENSAIOS DE MICROGERADORES EÓLICOS E DIFUSORES**

Ananindeua

2018

Lucas da Silveira Moreira

**PROPOSTA E CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO ADAPTADO  
PARA ENSAIOS DE MICROGERADORES EÓLICOS E DIFUSORES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia com ênfase em Tecnologia Mecânica.

Orientador: Prof. Msc. Disterfano Lima Martins Barbosa

Ananindeua

2018

Lucas da Silveira Moreira

**PROPOSTA E CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL DE VENTO ADAPTADO  
PARA ENSAIOS DE MICROGERADORES EÓLICOS E DIFUSORES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia com ênfase em Tecnologia Mecânica da Universidade Federal do Para, Campus Universitário de Ananindeua como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia com ênfase em Tecnologia Mecânica.

**APROVADO EM:** 14/12/2018.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador Prof. Msc. Disterfano Lima Martins Barbosa  
Faculdade de Ciência e Tecnologia / UFPA

---

Prof. Dr. Marcelo de Oliveira e Silva  
Faculdade de Engenharia Mecânica / UFPA

---

Prof. Jouberson Leônidas da Rocha Moreira  
Faculdade de Engenharia de Materiais / UFPA

---

Prof. Kelvin Alves Pinheiro  
Faculdade de Engenharia Mecânica / UFPA

Dedico este trabalho a toda minha família, especialmente aos meus pais Vânia da Silveira e Ayrton Moreira, que sempre me deram todo o amor e suporte necessário em todas as etapas da minha vida. Sou e sempre serei eternamente grato pela pessoa que vocês me tornaram.

## **AGRADECIMENTOS**

A força criadora deste universo que criou a possibilidade de minha existência e de todas as pessoas que amo, sem ela nada disso seria possível.

A minha família por todo o apoio imensurável que sempre me deram, principalmente ao meu pai Ayrton e minha mãe Vânia, por todo amor, carinho, confiança e incentivo que sempre depositaram em mim. Saibam que a principal motivação para eu terminar este trabalho é ver o rosto de felicidade de vocês. Esta página é pequena demais para agradecer o quanto vocês merecem. Amo vocês demais.

Aos meus amigos de sala que passaram por bons e maus momentos comigo neste curso, mas no final sempre demos um jeito de supera-los. Amigos que sempre me incentivaram para a conclusão deste trabalho e acreditaram no meu potencial quando eu não acreditava. Todos nós iremos alcançar nossos objetivos de vida.

Agradeço especialmente ao meu amigo Thales Cunha, que desde o início do curso me incentivou aos estudos, criando uma motivação que nunca tive para isso. Além de me ajudar na construção do equipamento deste trabalho de maneira rápida, sem ele provavelmente não estaria escrevendo estes agradecimentos neste momento.

A todos meus professores de graduação que foram grandes fontes de conhecimento e inspiração, principalmente ao meu orientador, Disterfano Barbosa, pela dedicação, compromisso, cooperatividade, ensinamentos passados neste trabalho e durante as disciplinas do curso, não seria possível concluir esta etapa sem sua ajuda.

A Sinara Mendes por estar ao meu lado durante todo o período deste curso, estando comigo não somente nos ótimos momentos, mas também me entendendo e me ajudando nos momentos mais difíceis de minha vida.

A todos que de alguma forma me ajudaram na conclusão deste trabalho.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

(Charles Chaplin)

## RESUMO

Mesmo com o contínuo avanço da tecnologia computacional, a qual auxiliou no estudo da dinâmica dos fluidos, túneis de vento continuam sendo importantes equipamentos científicos na pesquisa dos fenômenos aerodinâmicos, fornecendo dados confiáveis e reproduzindo condições de escoamento que não podem ser realizadas por computadores. Este trabalho possui como objetivo construir, a partir de um ventilador axial, um túnel de vento de baixo custo e funcional de circuito aberto do tipo soprador e de seção de teste aberta de 500 mm x 500 mm, para ser utilizado em ensaios de microgeradores e difusores de pequeno porte. Pesquisas de custos foram realizadas para definir o melhor material a ser utilizado na construção do túnel, optando por sua construção com madeira compensada, fornecendo rigidez necessária a estrutura. Para verificar a qualidade do escoamento, foi mapeado o seu perfil de velocidade na seção de teste utilizando um tubo de Pitot e analisado visualmente o comportamento do escoamento através de injeção de fumaça. Os resultados obtidos foram satisfatórios, o escoamento apresentou boa qualidade para serem ensaiados difusores e microgeradores.

**Palavras-chave:** Túnel de vento. Aerodinâmica. Mecânica dos fluidos. Construção.

## **ABSTRACT**

Even with the continuous advancement of computational technology, which has aided in the study of fluid dynamics, wind tunnels remain important scientific equipment in the research of aerodynamic phenomena, providing reliable data and reproducing flow conditions that cannot be performed by computers. The objective of this work is to construct a low-cost, open-circuit blower-type wind tunnel with an open test section of 500 mm x 500 mm to be used in turbine and diffuser tests of small size. Cost surveys were carried out to define the best material to be used in the construction of the tunnel, opting for its construction with plywood, providing necessary rigidity to the structure. To verify the flow quality, its velocity profile was mapped in the test section using a Pitot tube and visually analyzed the flow behavior through the injection of smoke. The results were satisfactory, the flow presented good quality to be tested diffusers and small turbines.

**Keywords:** Wind Tunnel. Aerodynamics. Fluid Mechanics.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplos de utilização de tuneis de vento. ....	15
Figura 2 - Modelo de avião em um túnel de vento. ....	19
Figura 3 - Túnel de vento de circuito aberto do tipo sucção. ....	20
Figura 4 – Esquema de túnel de vento de sucção. ....	20
Figura 5 - Túnel de vento de circuito aberto do tipo soprador. ....	21
Figura 6 - Esquema de túnel de vento soprador. ....	21
Figura 7 - Túnel de vento de circuito Red Bull. ....	22
Figura 8 – Esquema de túnel de vento de circuito fechado. ....	22
Figura 9 - Túnel de vento com destaque a seção de testes de com lateral abaixada. ....	24
Figura 10 - Esquema típico de uma seção de teste. ....	25
Figura 11 - Efeito da contração na variação da velocidade axial. ....	27
Figura 12 - Comparação entre os perfis de contração. ....	29
Figura 13 - Esquema de contração. ....	29
Figura 14 - Contração de paredes planas. ....	30
Figura 15 - Colmeia de alumínio. ....	31
Figura 16 - Diferentes formas da seção transversal de uma colmeia. ....	32
Figura 17 - Esquema de fluxo de ar em um ventilador centrífugo. ....	34
Figura 18 - Diferentes tipos de rotor para ventiladores centrífugos. ....	35
Figura 19 - Vista lateral de um ventilador de fluxo axial. ....	35
Figura 20 - Esquema de tudo de Pitot para medição de velocidade. ....	37
Figura 21 - Visualização do escoamento pela utilização de fumaça em um túnel de vento. ...	38
Figura 22 - Difusor ensaiado externamente ao túnel de vento. ....	40
Figura 23 - Esquema da vista lateral do túnel de vento. ....	41
Figura 24 - Esquema do ventilador. ....	42
Figura 25 - Ventilador axial industrial. ....	43
Figura 26 - Esquema contração. ....	45
Figura 27 – Face trapezoidal da contração com furos igualmente espaçados. ....	46
Figura 28 - Contração. ....	47
Figura 29 - Esquema da seção de estabilização. ....	47
Figura 30 - Seção de estabilização. ....	48
Figura 31 - Esquema da colmeia de canudos. ....	49
Figura 32 - Colmeia de canudos. ....	50

Figura 33 - Esquema da colmeia de PVC.....	51
Figura 34 - Configurações das fileiras para construção da colmeia de PVC. ....	51
Figura 35 - Colmeia de PVC. ....	52
Figura 36 – a) Ventilador e contração encaixados. b) vista lateral do acoplamento. ....	53
Figura 37 - Túnel de vento finalizado. ....	53
Figura 38 - Configuração final do túnel. ....	54
Figura 39 - Arranjo final dos equipamentos.....	55
Figura 40 - Posicionamento do microgerador após a boca do túnel.....	56
Figura 41 - Microgerador posicionada para medição da tensão elétrica. ....	56
Figura 42 - a) Mapeamento em cruz. b) Mapeamento quadrado. c) Mapeamento das bordas superior e inferior. ....	57
Figura 43 – a) Tubo de Pitot posicionado para as medições. b) Vista frontal do posicionamento.....	58
Figura 44 - Máquina de fumaça.....	59
Figura 45 - Perfil de velocidade do mapeamento em cruz. a) Posição vertical. b) Posição horizontal.....	62
Figura 46 - Gráfico de superfície 3D para o mapeamento quadrado.....	63
Figura 47 - Perfil de velocidade do mapeamento nas bordas. a) Região superior. b) Região inferior. ....	65
Figura 48 – a) Vista superior do escoamento do ar na saída da colmeia de canudos. b) Vista lateral do escoamento do ar na saída da colmeia de canudos. c) Fluxo de ar após a colmeia de tubos PVC. d) Escoamento sobre um difusor.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões do túnel de vento. ....	54
Tabela 2 - Custo da construção do túnel de vento. ....	60
Tabela 3 - Custo da instrumentação. ....	60
Tabela 4 - Valores de tensão medidos no microgerador. ....	61
Tabela 5 - Velocidade média e desvio do escoamento na posição vertical e horizontal. ....	63
Tabela 6 - Velocidade média e desvio do escoamento nas séries de 1 a 3. ....	64
Tabela 7 - Velocidade média e desvio do escoamento nas séries de 4 a 6. ....	65
Tabela 8 - Velocidade média e desvio na região superior. ....	66
Tabela 9 - Velocidade média e desvio na região inferior. ....	67

## LISTA DE SÍMBOLOS

$K_i$	coeficiente de perda de carga local
$q_i$	pressão dinâmica local
$K_t$	coeficiente de perda de pressão na seção de teste
$K_c$	coeficiente de perda de pressão na contração
$K_h$	perda de pressão na colmeia
$D_{h,t}$	diâmetro hidráulico da seção de teste
$D_{h,e}$	diâmetro hidráulico da entrada do bocal
$D_h$	diâmetro hidráulico
$D_{hc}$	diâmetro hidráulico da célula da colmeia
$f$	coeficiente de atrito
$f_m$	fator de atrito médio da contração
$L_t$	comprimento da seção de teste
$L_c$	comprimento da contração
$L_{hc}$	comprimento da célula da colmeia
$Re_{Dh}$	número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico
$Re_{\Delta}$	baseado na rugosidade e no diâmetro hidráulico da célula.
$c$	razão de contração
$\delta_e$	fator de variação de velocidade na saída da contração
$\delta_i$	fator de variação de velocidade na entrada da contração
$H_i$	altura na entrada da contração
$H_e$	altura na saída da contração
$X'$	distância axial medida no eixo X a partir da entrada da contração
$\beta_h$	porosidade da colmeia
$\Delta$	rugosidade da célula da colmeia
$\lambda_h$	Parâmetro baseado no material da colmeia
$\rho$	massa específica
$U$	velocidade média do fluido
$\mu$	viscosidade dinâmica
$p_2$	pressão total do fluido
$p_1$	pressão dinâmica do fluido

$\gamma$	peso específico do fluido
$S_e$	área de entrada da contração
$S_s$	área de saída da contração

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>1.1 Considerações gerais</b> .....	15
<b>1.2 Justificativa</b> .....	17
<b>1.3 Objetivos</b> .....	17
1.3.1 Objetivo geral .....	17
1.3.2 Objetivos específicos.....	17
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	19
<b>2.1 Túnel de vento</b> .....	19
2.1.1 Tipos de túneis de vento .....	20
2.1.2 Componentes .....	23
2.1.2.1 Seção de teste.....	24
2.1.2.2 Contração.....	26
2.1.2.3 Colmeia.....	31
2.1.2.4 Ventiladores.....	33
<b>2.2 Medição de velocidade</b> .....	36
2.2.1 Tubo de Pitot .....	36
<b>2.3 Visualização de escoamento por injeção de fumaça</b> .....	38
<b>3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	40
<b>3.1 Aparato Experimental</b> .....	42
3.1.1 Ventilador axial .....	42
3.1.2 Elementos do túnel .....	43
<b>3.2 Procedimento Experimental</b> .....	45
3.2.1 Contração.....	45
3.2.2 Seção de estabilização .....	47
3.2.3 Colméia de canudos plásticos.....	48
3.2.4 Colméia de tubos PVC .....	50

3.2.5 Acoplamento dos componentes .....	52
3.2.6 Quantificação do perfil de velocidade .....	55
3.2.7 Visualização do escoamento por injeção de fumaça .....	59
<b>3.3 Orçamento do projeto .....</b>	<b>60</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>61</b>
<b>4.1 Tensão elétrica no microgerador .....</b>	<b>61</b>
<b>4.2 Perfil de velocidade na seção de teste .....</b>	<b>61</b>
<b>4.3 Visualização do Escoamento.....</b>	<b>68</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>70</b>
<b>5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>

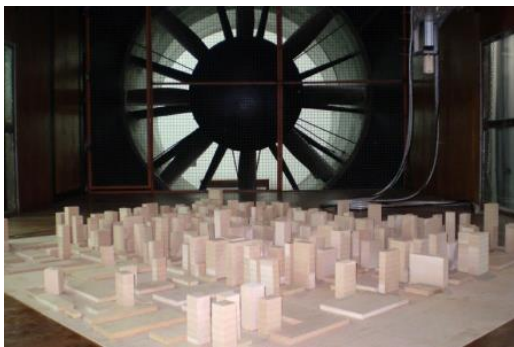
# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações gerais

A Mecânica dos Fluidos tem como objetivo estudar o comportamento físico de líquidos e gases, assim como as leis que regem esse comportamento (BRUNETTI, 2008). Uma área em particular desta ciência trata do escoamento sobre corpos imersos em um fluido sem fronteiras, o qual recebe o nome de *escoamento externo*. Este tipo de escoamento é útil para o estudo de diversos problemas de aerodinâmica, tais como os presentes em as asas de aeronaves, automóveis, escoamento do vento sobre prédios, construções civis, turbinas eólicas, entre outros.

Para analisar tais problemas, se faz necessário reproduzir estes fenômenos em condições controladas em laboratório. Isto pode ser obtido com o auxílio de um Túnel de Vento. Um Túnel de vento é uma estrutura que tem o objetivo de reproduzir ou simular o escoamento de ar sobre objetos sólidos, como ocorre em situações cotidianas.

Figura 1 - Exemplos de utilização de tuneis de vento.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: a) IPT (2009). b) Heidrich (2013). c) NLR (2012). d) Prandi (2013)

A finalidade de um túnel de vento é estudar o escoamento do ar sobre objetos em tamanho real, ou posicionados em sua seção de teste utilizando corpos de prova cujas dimensões são geralmente inferiores às dimensões reais dos objetos a serem analisados. Os elementos que o compõe são arranjados de tal maneira a fornecer condições de escoamento de maneira controlada, com velocidade aproximadamente constante e baixa turbulência na seção de teste (COUTINHO, 2014).

Mesmo com os computadores atuais, túneis de vento são ferramentas essenciais na engenharia, tanto para testes em modelos quanto para a pesquisa básica. De acordo com Barlow *et al.* (1999), estes equipamentos incluem a complexidade de um escoamento real e podem fornecer uma grande quantidade de dados confiáveis, sendo muitas vezes os mais rápidos, econômicos e precisos para realizar pesquisas aerodinâmicas e obter dados essenciais para projetos.

Em uma sociedade que está crescendo dependente de computadores e sempre evoluindo em relação a novas tecnologias, o uso de túneis de vento para resolver problemas aerodinâmicos pode parecer obsoleto, entretanto, a sua aplicação para resolver tantos problemas aerodinâmicos básicos quanto complexos ainda é necessário atualmente. Ao contrário dos computadores os quais produzem dados quantitativos, os túneis de vento fornecem uma visualização de fluxo única que permite encontrar problemas críticos e soluções não obtidas de forma numérica. Com sua capacidade de combinar os dois tipos de informações, eles são instrumentos críticos no processo de projeto rápido e completo de qualquer estudo que envolva dinâmica de fluidos (ARIFUZZAMAN e MASHUD, 2012).

É difícil e imprudente estabelecer normas de projetos inflexíveis para a construção de um túnel de vento, principalmente, por causa da ampla variedade de requerimentos e, sobretudo, da variedade de configurações da seção de teste, sendo mais usual estabelecer apenas diretrizes de construção dos principais componentes do túnel, baseados em dados de projetos que obtiveram êxito e alguns projetos originais (MEHTA e BRADSHAW, 1979).

Conforme Barlow *et al.* (1999), devido ao baixo custo inicial, um túnel de vento de circuito aberto é muitas vezes ideal para escolas e universidades onde é requerido para uma atividade de sala de aula e pesquisa. Contudo, mesmo o túnel de vento mais simples pode possuir um elevado custo de construção devido a quantidade de material necessário para fabricá-lo, sendo este custo um entrave para a utilização deste equipamento em pesquisas sobre aerodinâmica nas universidades.

## **1.2 Justificativa**

A relevância do tema deste trabalho corresponde à necessidade de se estudar a aerodinâmica de objetos sólidos com o objetivo de melhorar o projeto de estruturas ou máquinas que estão submetidas ao escoamento de ar, tais como as turbinas eólicas. Assim, será construído um túnel de vento de baixo custo para ensaios aerodinâmicos de microgeradores eólicos e difusores, com o intuito de projetá-lo sem gastos excessivos, de modo a fomentar a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias relacionadas à aerodinâmica de máquinas e demais dispositivos, através de equipamentos e instrumentação adequada em laboratórios.

A construção deste túnel de vento se deve primordialmente pela disponibilidade de um ventilador axial industrial que se encontrava sem uso no Laboratório de Engenharia Mecânica LABEM (UFPA-campus Guamá), assim, diminuindo substancialmente o custo de construção. Em função de a potência do ventilador já estar definida, a seção de teste será relativamente inferior às dimensões utilizadas comumente na indústria e na pesquisa.

Portanto, justifica-se este projeto de túnel de vento para realização de ensaios aerodinâmicos, contribuindo para pequenos experimentos e simulações, além de viabilizar o estudo e projeto de microgeradores eólicos, como foco em sua construção com o menor custo possível, tornando-o um equipamento mais acessível economicamente. Seu uso também pode ser feito de caráter didático, já que algumas disciplinas do referido curso se relacionam com este trabalho.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo geral**

Construir um túnel de vento de circuito aberto do tipo soprador, adaptado de um ventilador axial industrial, e de baixo custo, operando com boa eficiência para ser utilizado inicialmente no ensaio de microgeradores eólicos e difusores em baixas velocidades.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Determinar materiais de baixo custo para construção dos componentes do túnel de vento.

- Definir a melhor geometria e dimensões do túnel, otimizando a quantidade de material necessário para sua construção.
- Construir um duto de seção quadrada de modo a simular uma seção de estabilização.
- Construir um ou mais retificadores de fluxo para reduzir os vórtices gerados.
- Verificar quantitativamente o perfil de velocidade na saída do túnel de vento.
- Verificar qualitativamente o escoamento de ar na saída do túnel.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Túnel de vento

O principal objetivo de um túnel de vento é produzir um escoamento uniforme na câmara de testes onde o modelo estudado deve ser posicionado, desta forma, é possível mensurar velocidades de escoamento global e local, bem como a pressão e temperatura ao redor do corpo, também podendo fornecer a visualização das linhas de corrente através de métodos de visualização do escoamento.

Figura 2 - Modelo de avião em um túnel de vento.



Fonte: NASA (2017)

O ar escoia nestes equipamentos utilizando ventiladores os quais propiciam a circulação de ar em seu interior, através de um duto munido de elementos retificadores como as colmeias, telas e outros dispositivos que possuem como finalidade diminuir o nível de turbulência até as condições ideais para ensaios. Segundo Santos Junior (2015), os primeiros túneis não possuíam elementos retificadores ou seções transversais variadas, eram constituídos somente de uma seção de testes uniforme e de um ventilador.

### 2.1.1 Tipos de túneis de vento

Existem basicamente duas configurações de túneis de vento: circuito fechado e circuito aberto. Em um túnel de vento de circuito aberto o ar que escoar através do túnel segue um caminho essencialmente reto desde a sua entrada até este ser expelido, não havendo circulação do fluido. Este tipo de túnel possui dois tipos de configurações, os túneis sopradores e os sugadores.

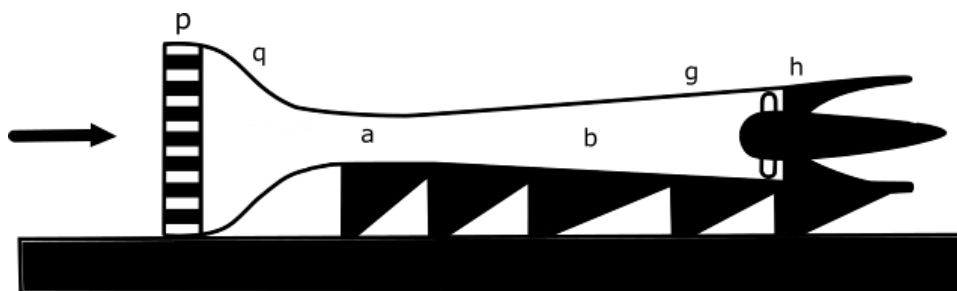
No tipo sugador utiliza-se frequentemente ventiladores axiais na saída do difusor, possuindo a configuração mais simples dos túneis de vento como mostram as Figura 3 e 4. Estes túneis possuem um custo de construção relativamente mais baixo e sua configuração facilita a purga se for desejado realizar a visualização do fluxo via fumaça.

Figura 3 - Túnel de vento de circuito aberto do tipo sucção.



Fonte: Hui (2011)

Figura 4 – Esquema de túnel de vento de sucção.



Fonte: Adaptado de Barlow *et al.* (1999)

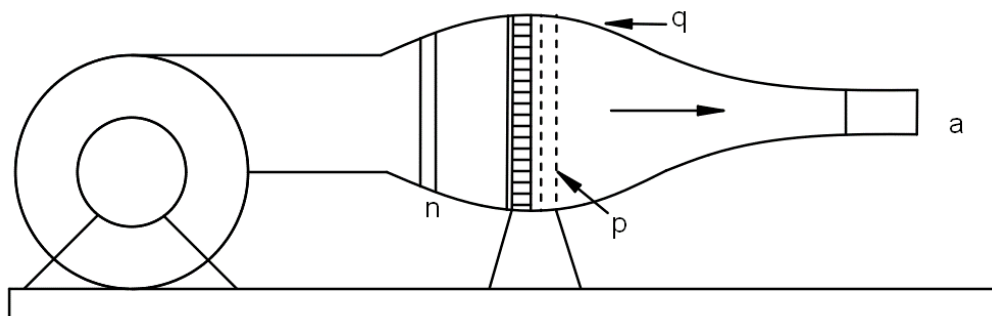
No tipo soprador, Figura 5 e 6, utiliza-se normalmente ventiladores centrífugos, sendo possível trabalhar com maiores demandas de carga do sistema e gerando barulhos e vibrações adequadamente baixos. De acordo com Mehta (1977), apesar do fluxo de saída do ventilador centrífugo ser não uniforme e turbulento, é de fácil correção.

Figura 5 - Túnel de vento de circuito aberto do tipo soprador.



Fonte: Politerm

Figura 6 - Esquema de túnel de vento soprador.



Fonte: Adaptado de Barlow *et al.* (1999)

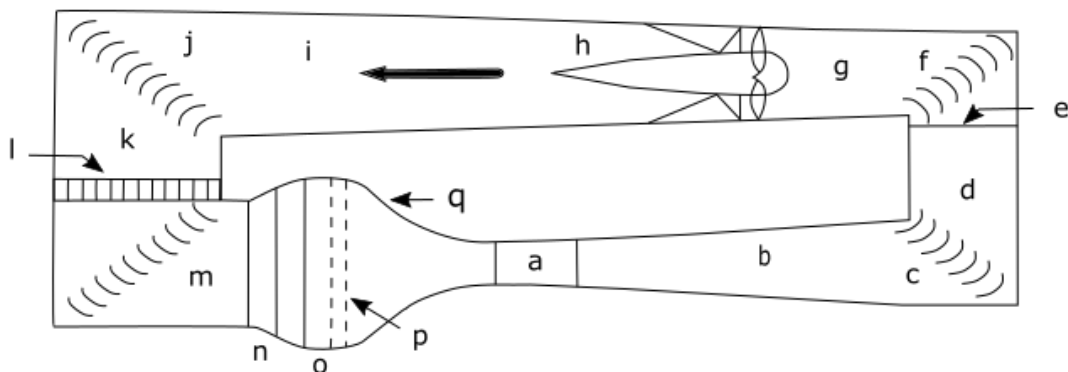
Diferentemente dos túneis de vento de circuito aberto, nos de circuito fechado o fluxo de ar percorre um circuito havendo uma recirculação do ar. Utilizando-se telas e palhetas de desvio, o fluxo pode ser redirecionado em 90° e sua qualidade pode ser bem controlada, sendo independente de interferências exteriores ao túnel, tal como o clima. Estes túneis também geram menos ruídos e requerem menos energia para operar para um dado tamanho da seção de teste e velocidade de escoamento (BARLOW *et al.*, 1999).

Figura 7 - Túnel de vento de circuito Red Bull.



Fonte: NU.NL (2018)

Figura 8 – Esquema de túnel de vento de circuito fechado.



Fonte: Barlow *et al.* (1999)

As Figuras 4, 6 e 8 exibem esquemas de túneis de vento de circuitos abertos e fechados, nestes esquemas cada túnel possui diferentes seções as quais encontram-se representadas por letras. A lista abaixo mostra expõe os detalhes destas seções de acordo com sua respectiva enumeração:

- (a) a seção de teste pode ser aberta, fechada, parcialmente aberta ou conversível;
- (b) um difusor de área de seção transversal de no mínimo 3-4 vezes o tamanho da área de seção de teste. Seu formato é cônico e seu ângulo varia entre 2-5°, com os menores

ângulos desejáveis. Típicas razões de áreas estão na faixa de 2-3, sendo os menores valores desejáveis;

- (c) primeira curva, incorporando as palhetas de desvio;
- (d) segunda curva que pode ser continuação do difusor ou área constante;
- (e) tela de segurança para prevenir que pedaços do modelo ou outros objetos não atinjam o ventilador;
- (f) segunda curva, incorporando palhetas de desvio;
- (g) transição da seção retangular para seção circular;
- (h) seção do ventilador;
- (i) retorno ou segundo difusor;
- (j) terceira curva, incorporando palhetas de desvio;
- (k) terceira curva pode ser de área constante;
- (l) trocador de calor;
- (m) quarta curva, incorporando palhetas de desvio;
- (n) difusor Grande Angular com telas de controle de separação. Ângulos de cerca de 45° e razão de área de 2-4;
- (o) câmara de Estabilização;
- (p) Condicionadores de fluxos, normalmente incluindo um direcionador de fluxo e telas de controle de turbulência;
- (q) Contração ou bocal. Típicas razões de área na faixa 7-12, embora valores menores ou maiores sejam utilizados.

### 2.1.2 Componentes

O tamanho do túnel de vento e a configuração de seus componentes dependem diretamente das necessidades dos testes para os quais são projetados. Túneis com seções de testes pequenas são usualmente utilizados em pesquisas e instrução, não sendo necessárias altas velocidades de escoamento na seção de teste (CHIESSI, 2006).

Devido ao fluxo de ar no interior do túnel resultar em uma dissipação de energia provocada pelo efeito mecânico do atrito no escoamento do fluido, cada seção do túnel de vento estará sujeito às *perdas de carga*, entretanto, devido as diferentes geometrias de seus componentes, cada seção estará sujeita a diferentes perdas, as quais serão calculadas segundo equações específicas para cada elemento do túnel.

A perda de carga total do túnel de vento ( $\Delta p_{tot}$ ) pode ser calculada através da soma das perdas de carga de cada componente através da Equação 1.

$$\Delta p_{tot} = \sum_{i=1}^n k_i q_i \quad (1)$$

Sendo  $k_i$  o coeficiente de perda de carga local e  $q_i$  a pressão local onde o índice varia  $i$  para cada elemento. A perda de carga é útil para definir a potência que o ventilador deve possuir para que o túnel de vento opere dentro das especificações desejadas.

### 2.1.2.1 Seção de teste

De acordo com Mehta (1977), a seção de teste é frequentemente o ponto de partida para o projeto de um túnel de vento, sendo a seção do túnel onde os modelos a serem testados e a instrumentação para obtenção de dados são inseridos para a realização dos ensaios aerodinâmicos. Com o escoamento controlado para a velocidade desejada, os instrumentos medem a força a qual age sobre o modelo, tais como sustentação e arrasto. Utilizando-se das medições e da relação conhecida entre o ambiente na seção de ensaio e as condições reais de voo, é possível prever precisamente o desempenho do corpo testado em escala real fora do túnel. Suas paredes devem facilitar a visualização do experimento e manuseio do modelo, principalmente quando deseja-se visualizar as linhas de corrente através de técnicas de visualização.

Figura 9 - Túnel de vento com destaque a seção de testes de com lateral abaixada.

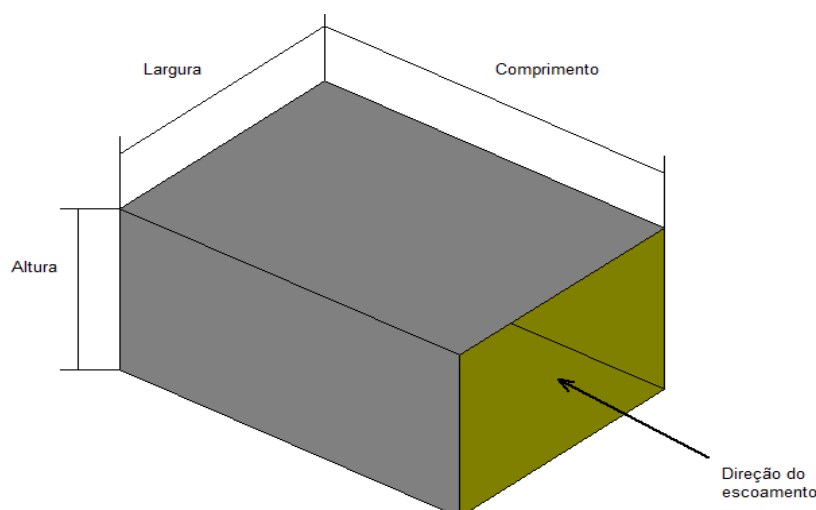


Fonte: Inmetro (2010)

A escolha de seu tamanho e geometria dependerá dos corpos a serem ensaiados em seu interior, velocidade de operação e qualidade do escoamento desejada, necessitando ser projetada para minimizar a interferência das paredes do túnel durante os testes (MEHTA, 1977). A sua geometria pode variar de acordo com a finalidade do projeto, entretanto, para aplicações civis e industriais, frequentemente a seção quadrada é a mais comum e mais recomendada. Conforme Hernández *et al.* (2013), a área frontal do corpo de prova não pode ultrapassar 10% da área da seção de teste para evitar a necessidade de correção devido ao bloqueio

A seção de teste deve ser configurada para que o escoamento seja controlado de forma satisfatória aos testes realizados, sendo as suas dimensões iguais a da garganta do bocal. O escoamento do ar no túnel torna a camada limite mais espessa, diminuindo a efetividade da seção de teste, devido a isto, seu comprimento deve ser de 0.5 a 3 vezes o seu diâmetro hidráulico (MEHTA, 1977). Segundo Mehta (1977), é necessário a instalação da sessão de ensaios a uma distância de no mínimo de 0,5 vezes o diâmetro hidráulico devido a não uniformidade do fluxo de ar que sai do bocal, com esta distância mínima, este problema é amenizado. Para seções de teste muito longas, maiores que 3 vezes o seu diâmetro hidráulico, há um aumento da espessura da camada limite o qual pode resultar em uma queda de pressão na direção axial e conseqüentemente no descolamento da camada limite na saída desta seção.

Figura 10 - Esquema típico de uma seção de teste.



Fonte: Adaptado de Hernández *et al.* (2013)

Segundo Idel’Cik (1969), o coeficiente de perda de pressão na seção de teste ( $K_t$ ), relacionado a pressão dinâmica na seção de teste, a qual é a pressão dinâmica de referência para todos os cálculos, é determinado pela Equação 2.

$$K_t = f \frac{L_t}{D_{h,t}} \quad (2)$$

Em que  $L_t$  é o comprimento da seção de teste,  $D_{h,t}$  é o diâmetro hidráulico da seção e  $f$  é o coeficiente de atrito, o qual é obtido através da expressão de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left( \frac{e/D_h}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re}_{D_h} \sqrt{f}} \right) \quad (3)$$

Sendo  $\text{Re}_{D_h}$  o número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico da seção e  $D_h$ , o diâmetro hidráulico no respectivo componente.

#### 2.1.2.2 Contração

A contração é o componente mais crítico no projeto de um túnel de vento, pois é responsável pelo maior impacto na qualidade do escoamento que chegará a seção de teste (HERNÁNDEZ *et al.*, 2013), localizando-se frequentemente à montante da seção de teste. Suas duas principais funções são: aumentar a velocidade média do escoamento, permitindo que a colmeia e telas sejam instaladas em regiões de baixa velocidade, reduzindo a queda de pressão e conseqüentemente o fator de potência do túnel de vento, e reduzir tanto as variações da velocidade média quanto suas flutuações ao longo do tempo, devido à pressão total ao longo da contração ser constante (MEHTA e BRADSHAW, 1979).

O projeto de um bocal está focado na produção de um escoamento estável e uniforme e requer que seja evitado separação no fluxo. Outros dois critérios desejados também incluem espessura mínima da camada limite de saída e comprimento mínimo de contração. É sempre possível evitar separação do escoamento na contração construindo-a com um grande comprimento, mas isto resulta em um aumento do comprimento do túnel, custo e espessura da camada limite (MEHTA e BRADSHAW, 1979).

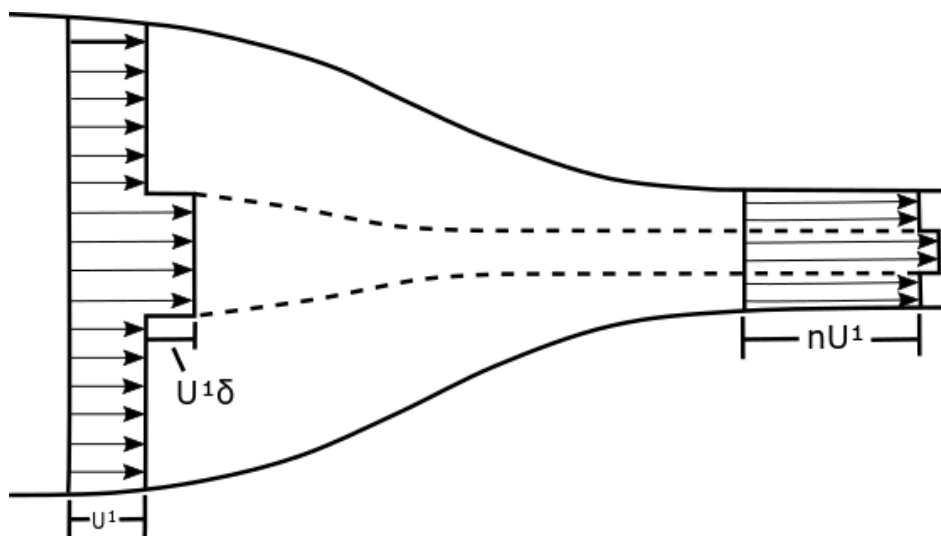
O parâmetro mais importante da contração para alcançar os dois efeitos desejados é a razão de contração ( $c$ ) entre a área de entrada e a garganta (seção de área mínima). O efeito de

redução das variações da velocidade axial ocasionadas por uma contração foi estudado por Bradshaw (1970). O autor aplicou a Equação de Bernoulli a um escoamento incompressível em uma pequena região de alta velocidade, mostrada na Figura 11, para representar a falta de uniformidade no escoamento. Após manipulações algébricas e considerações realizadas em seu trabalho, ele obteve a seguinte expressão.

$$\delta_e = \frac{\delta_i}{c^2} \quad (4)$$

Sendo  $\delta_e$  e  $\delta_i$  são respectivamente o fator variação de velocidade na saída e na entrada da contração.

Figura 11 - Efeito da contração na variação da velocidade axial.



Fonte: Adaptado de Bradshaw (1970)

Observando a Equação 4, nota-se que o fator de variação de velocidade axial de saída é inversamente proporcional à razão de contração, logo, a variação de velocidade axial é muito menor e o perfil tende a ser mais uniforme para uma maior razão de contração. Grandes razões de contrações são vantajosas, pois podem suprimir os efeitos de pequenas separações do escoamento na entrada da contração. Entretanto, uma contração com uma elevada razão de contração e um adequado comprimento pode ocasionar um aumento na angulação das paredes, podendo levar à separação do escoamento próximo as extremidades da contração (MEHTA e BRADSHAW, 1979). Ademais, grandes razões de contrações podem gerar ruídos excessivos.

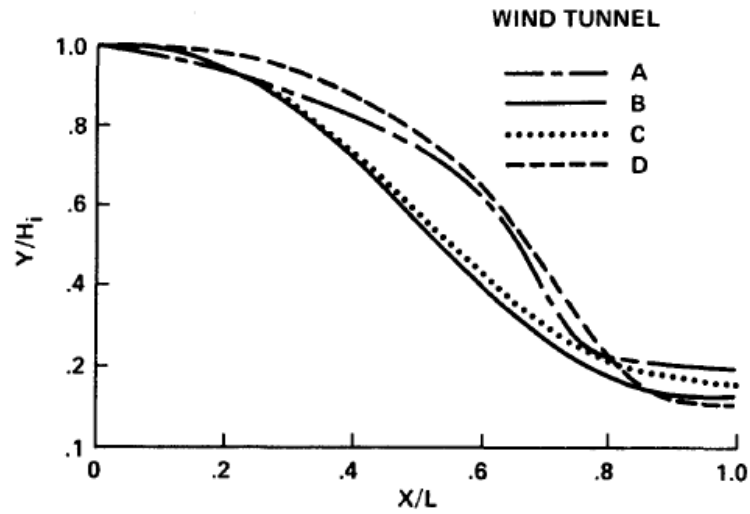
Isso sugere que o comprimento da contração deve ser minimizado para amenizar o crescimento da camada limite, custo e espaço ocupado pelo túnel. Contudo, o risco de separação da camada limite aumenta à medida que o comprimento de contração é reduzido. O descolamento desta camada na contração leva a contribuições indesejáveis para a não uniformidade e instabilidade no escoamento de saída, além de uma redução da relação de contração efetiva. O perigo da separação da camada limite resulta da presença de regiões de gradiente de pressão adverso nas paredes próximas a cada extremidade da contração, que se tornam mais fortes à medida que o comprimento de contração diminui (BELL e MEHTA, 1988).

Conforme Hernández *et al.* (2013), no caso de túneis de vento para aplicações civis e industriais, uma razão de contração entre 4 e 6 pode ser suficiente. Com um bom projeto e forma, a turbulência do escoamento e a não uniformidade podem chegar a ordem de 2%, sendo aceitável para a maioria das aplicações. Entretanto, razões entre 6 e 10 foram encontradas como sendo as mais adequadas para grande parte de túneis de vento de baixas velocidades (MEHTA e BRADSHAW, 1979; BELL e MEHTA, 1988).

O formato da contração é o segundo parâmetro a ser definido. Diversos métodos teóricos já foram desenvolvidos, embora não exista um projeto de contração ideal, pois estes dependem das condições da seção de teste, diversos trabalhos fornecem orientações úteis para o projeto deste componente.

Bell e Mehta (1988) em seus estudos sobre as contrações desenvolveram polinômios de terceira, quinta e sétima ordem para o projeto do formato das paredes da contração, como pode ser observado suas comparações na Figura 12. A equação de quinto grau (Equação 5), indicada no gráfico da figura como “túnel de vento B”, obteve melhores resultados em relação às demais pois estava livre de separação do escoamento tanto na linha de centro quanto em seus cantos e fornece um número de Reynolds adequado ( $\sim 400$ ), além de proporcionar uma ótima uniformidade ao escoamento.

Figura 12 - Comparação entre os perfis de contração.



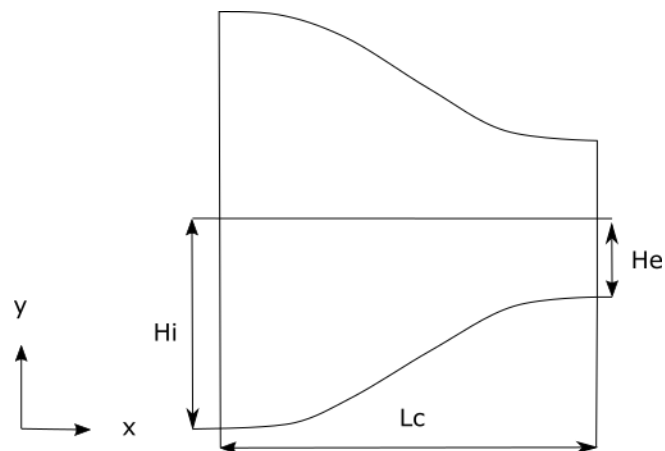
Fonte: Bell e Mehta (1988)

$$Y(X) = H_i - (H_i - H_e)[6(X')^5 - 15(X')^4 + 10(X')^3] \quad (5)$$

$$X' = \frac{x}{L_c} \quad (6)$$

Em que  $H_i$  e  $H_e$  são respectivamente a altura na entrada e na saída da contração,  $L_c$  o comprimento da contração e  $X'$  a distância axial adimensional medida no eixo  $X$  a partir da entrada da seção (Figura 13).

Figura 13 - Esquema de contração.



Fonte: Autoria própria

De acordo com Bell e Mehta (1988), utilizando o perfil criado a partir do polinômio de quinto grau, ocorre uma separação no escoamento quando a relação  $L_c/H_i$  é igual a 0,667. Contudo, a separação da camada limite também ocorre para contrações muito longas ( $L_c/H_i = 1,79$ ). Este descolamento ocorre devido a região de gradiente de pressão adverso próximo a saída da contração. Caso a contração seja muito curta, a separação da camada limite também tenderia a ocorrer, porém, próximo à entrada da contração.

Apesar do perfil criado a partir do polinômio de quinto grau ser um dos mais utilizados para projetos de túneis de vento, há pesquisas na literatura as quais contrações são construídas com paredes planas, alcançando resultados excelentes na qualidade do escoamento obtido (ARIFUZZAMAN e MASHUD, 2012; OLIVEIRA, *et al.*, 2015).

Figura 14 - Contração de paredes planas.



Fonte: Oliveira *et al.* (2015)

As perdas de pressão na seção de contração são consideradas unicamente devido ao atrito com a parede, estas perdas são usualmente na ordem de 3% das perdas totais do circuito. Uma expressão razoável para o cálculo do coeficiente de perda de pressão na contração ( $K_c$ ) foi dada por Wattendorf (1938).

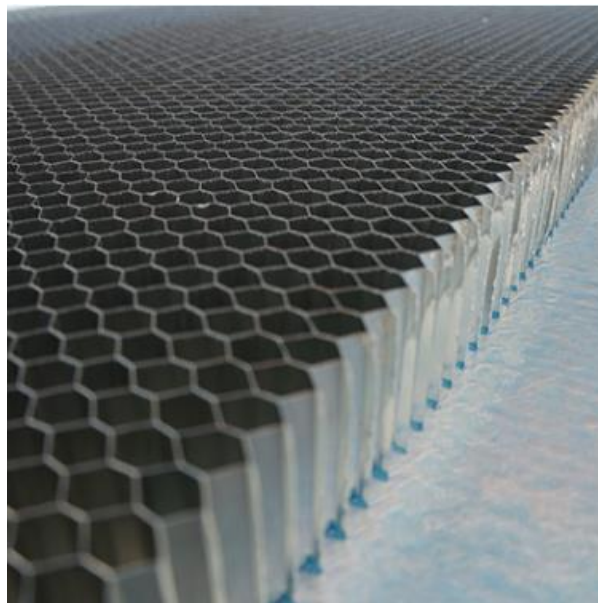
$$K_c = 0,32 f_m \left( \frac{L_c}{D_{h,e}} \right) \quad (7)$$

Onde  $f_m$  é o fator de atrito médio da contração, usando o número de Reynolds igual o valor médio entre o número Reynolds na entrada e na saída da contração e  $D_{h,e}$  é o diâmetro hidráulico da entrada do bocal (WATTENDORF, 1938).

### 2.1.2.3 Colmeia

Segundo Prandtl (1933), a colmeia é um dispositivo guia através do qual os filamentos de ar individuais tornam-se paralelos. Consiste em uma passagem de dutos justapostos de mesmo comprimento ao longo do eixo do túnel de vento, de modo a remover as variações de velocidade transversal e redemoinhos originados pelo ventilador, desde que o ângulo de variação lateral do escoamento não ultrapasse  $10^\circ$ . A colmeia tem pouco efeito na velocidade de escoamento devido à sua baixa queda de pressão (MEHTA e BRADSHAW, 1979).

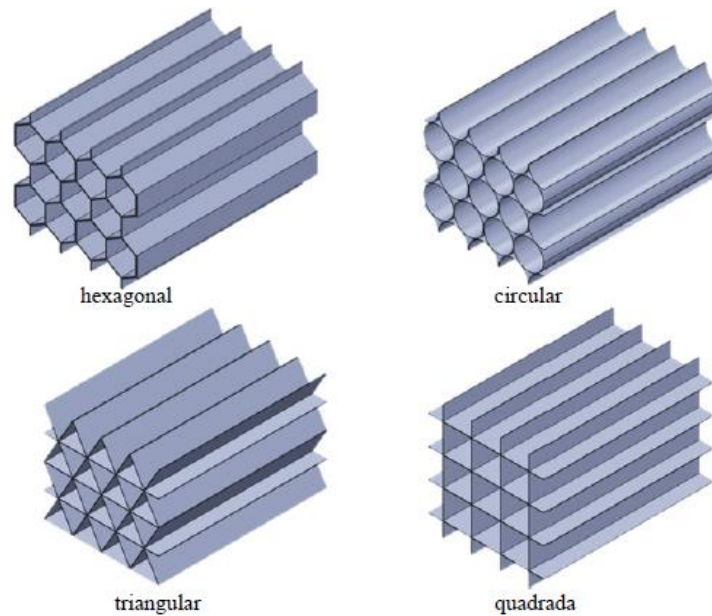
Figura 15 - Colmeia de alumínio.



Fonte: Limitech (2017)

Existem diversos tipos de geometria das células de uma colmeia, sendo mais comuns as triangulares, hexagonais, circulares e quadradas, esquematizadas na Figura 16. A seção transversal na forma hexagonal é a mais utilizada em colmeias, porém formas quadradas e triangulares também são encontradas, o formato deve ser escolhido principalmente de modo a facilitar a construção do componente (MEHTA e BRADSHAW, 1979).

Figura 16 - Diferentes formas da seção transversal de uma colmeia.



Fonte: Pabón (2014)

De acordo com Mehta (1977), para obter uma colmeia de configuração ideal e para obter o máximo benefício sobre a qualidade do escoamento, o comprimento adequado deve ser entre 7 a 10 vezes o diâmetro hidráulico da célula. O formato das seções transversais deve ser escolhido de acordo com a disponibilidade e facilidade de montagem, sendo aconselhável o uso de células pequenas para suprimir a turbulência.

Mehta e Bradshaw (1979) afirmam que para os melhores resultados na otimização do escoamento o comprimento da célula deve estar na faixa de 6-8 vezes o seu diâmetro hidráulico.

Valores típicos da razão comprimento/diâmetro das células estão entre 6 e 8 e sua porosidade ( $\beta_h$ ), razão entre área vazada e área total da colmeia, na faixa de 0,8. Estes valores levam a produção de uma colmeia de coeficiente de perda de cerca de 0,5 (BARLOW *et al.*, 1999).

Uma expressão para o cálculo das perdas de pressão em colmeias ( $K_h$ ) é dada pela Equação 8, proposta por Eckert *et al.* (1976), a qual relaciona o diâmetro hidráulico da célula ( $D_{hc}$ ), o seu comprimento ( $L_{hc}$ ), sua porosidade ( $\beta_h$ ), sua rugosidade ( $\Delta$ ) e o número de Reynolds ( $Re_\Delta$ ) baseado na rugosidade e no diâmetro hidráulico da célula:

$$k_h = \lambda_h \left( \frac{L_{hc}}{D_{hc}} + 3 \right) \left( \frac{1}{\beta_h} \right)^2 + \left( \frac{1}{\beta_h} - 1 \right)^2 \quad (8)$$

$\lambda_h$  é um parâmetro baseado no material da colmeia:

$$\lambda_h = \begin{cases} 0,375 \left( \frac{\Delta}{D_{hc}} \right)^{0,4} \text{Re}_{\Delta}^{-0,1} & \text{Re}_{\Delta} \leq 275 \\ 0,214 \left( \frac{\Delta}{D_{hc}} \right)^{0,4} & \text{Re}_{\Delta} \geq 275 \end{cases} \quad (9)$$

Sendo o número de Reynolds ( $\text{Re}_{\Delta}$ ) pode ser obtido através da Equação 10:

$$\text{Re}_{\Delta} = \frac{\rho U D_{hc}}{\mu} \quad (10)$$

em que  $\rho$  a massa específica do fluido,  $U$  sua velocidade média e  $\mu$  sua viscosidade dinâmica.

#### 2.1.2.4 Ventiladores

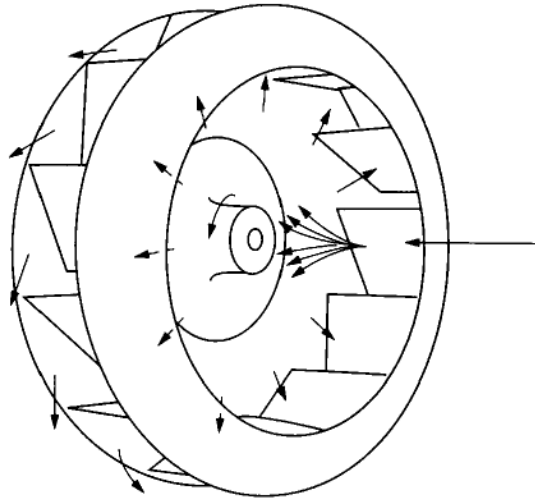
Ventiladores são máquinas que produzem escoamento de ar com duas ou mais pás fixadas a um eixo em rotação, estes equipamentos convertem energia mecânica rotacional, proveniente dos seus eixos, em aumento de pressão total do ar em movimento, conversão obtida através da alteração do momento do fluido (OTAM, 2003).

Também chamado de sistema propulsor em túneis de vento, o ventilador é um componente de extrema importância para o bom funcionamento de todo o equipamento, sendo o responsável por gerar o escoamento de ar no interior do túnel e superar as perdas geradas em cada componente, atendendo a demanda do sistema. Os ventiladores utilizados podem ser tanto axiais quanto centrífugos, os quais podem puxar ou empurrar o ar através da seção de teste, funcionando tanto através de eixo quanto para correia de acionamento para transmissão de potência, dependendo dos custos e performances desejáveis ao projeto (CATTAFESTA *et al.*, 2010).

Em ventiladores centrífugos, o ar entra no rotor axialmente e é descarregado radialmente em uma carcaça do tipo voluta. O princípio de funcionamento destes equipamentos é uma combinação de dois efeitos: força centrífuga e deflexão do fluxo de ar pelas pás em uma direção radial para o exterior do rotor em um padrão de fluxo espiral como

visto na Figura 17. A medida que o ventilador rotaciona, o ar localizado entre as pás rotaciona juntamente a elas sujeito a força centrífuga e sendo expelido pela saída (BLEIER, 1997).

Figura 17 - Esquema de fluxo de ar em um ventilador centrífugo.

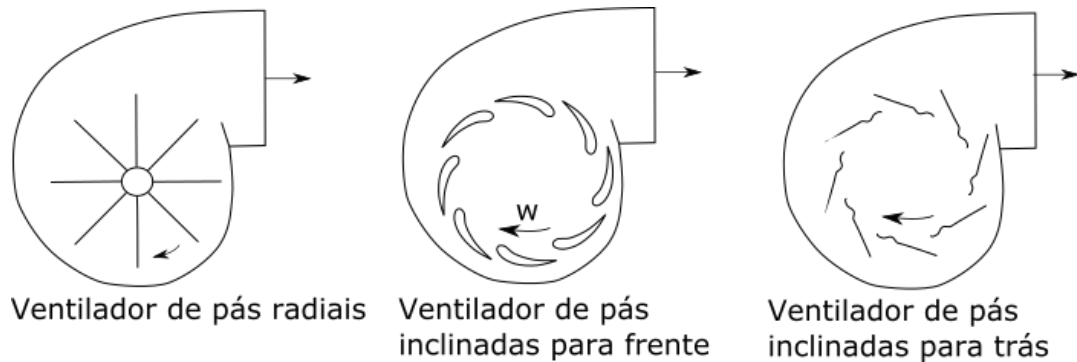


Fonte: Bleier (1997)

Segundo Mehta e Bradshaw (1979), ventiladores centrífugos usualmente são utilizados em túneis de vento de circuito aberto, sendo instalados a montante do túnel, podendo também ser instalados na saída do túnel, entretanto, não há nenhuma vantagem em particular nessa configuração. Estes ventiladores são capazes de operar com relativa estabilidade e eficiência em uma ampla gama de condições de escoamento devido a toda extensão da pá operar sobre o mesmo coeficiente de sustentação. Seu ruído e pulsações produzidos também são adequadamente baixos, mesmo em condições fora de projeto.

Os ventiladores centrífugos são basicamente divididos em três tipos, sendo classificados de acordo com seu tipo de rotor: rotor de pás curvadas para frente, rotor de pás curvadas para trás, rotor de pás radiais. Os que possuem rotor com pás inclinadas para frente movimentam-se a rotações relativamente baixas e normalmente são utilizados para produzir altas vazões a baixas pressões estáticas. Os de pás voltadas para trás possuem rotação até duas vezes mais rápidas dos que os ventiladores com pás curvadas pra frente, possuindo maior rendimento. Já os ventiladores que possuem pás radiais são adequados para lidar com baixos volumes de ar em pressões estáticas relativamente altas (OTAM, 2003). De acordo com Mehta e Bradshaw (1979), o tipo mais comum de pás utilizada é a inclinada para trás, ventiladores com pás inclinadas para frente são menos eficientes. A Figura 18 mostra os três tipos de configurações.

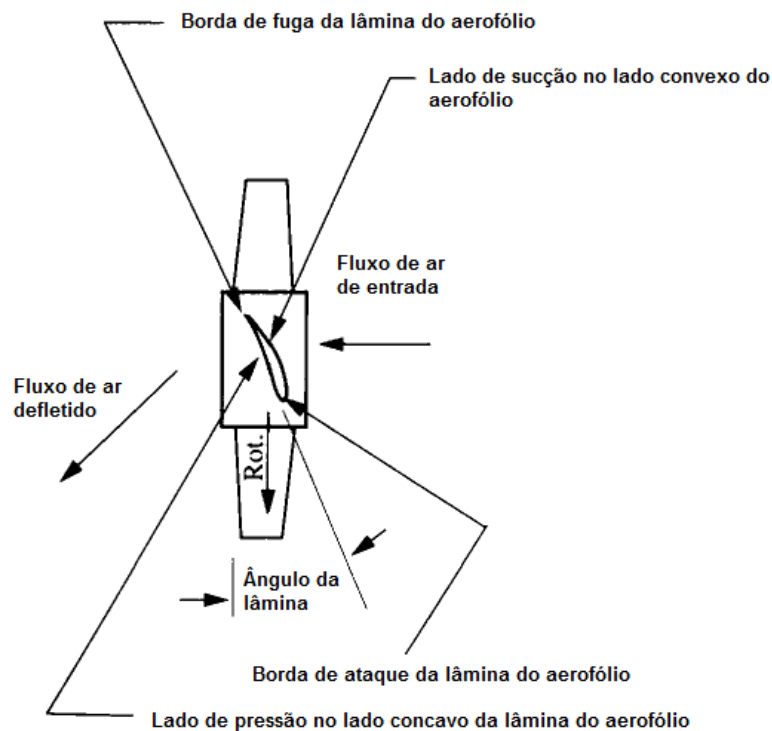
Figura 18 - Diferentes tipos de rotor para ventiladores centrífugos.



Fonte: Adaptado de Mehta e Bradshaw (1979)

Ventiladores axiais são máquinas que expõem o fluido paralelo ao seu eixo de rotação. O princípio de operação destes equipamentos é simplesmente a deflexão do fluxo de ar pelas pás do rotor, como mostrado pela Figura 19. O padrão do escoamento desviado é de forma helicoidal, sendo que a velocidade do ar pode ser dividida em dois componentes: uma velocidade axial e uma tangencial. A velocidade axial é o componente útil do escoamento, ele move o ar para o local desejado, o componente tangencial da velocidade é uma perda de energia fornecida ao fluido (BLEIER, 1997).

Figura 19 - Vista lateral de um ventilador de fluxo axial.



Fonte: Adaptado de Bleier (1997)

Os ventiladores axiais dividem-se em três grupos: propeller, turboaxial e vaneaxial. Os ventiladores turboaxiais e os vaneaxiais são semelhantes entre si, ambos são ventiladores com um rotor axial montados em um cilindro, porém, ventiladores vaneaxiais possuem palhetas direcionais. Estas palhetas removem grande parte dos vórtices do ar e melhoram o rendimento. As desvantagens dos ventiladores axiais são o alto nível de ruído e o rendimento menor que do que os ventiladores centrífugos (OTAM 2013).

Estes tipos de ventiladores são usualmente usados em túneis de vento sugadores, de circuito aberto e de baixa velocidade de escoamento, também sendo encontrados quase sempre em túneis de vento de circuito fechado. O arranjo usual em túneis de circuito fechado é posicionar as palhetas direcionais a montante do ventilador, desta forma, o redemoinho na saída será quase nulo. Em ventiladores de circuito aberto, redemoinhos presentes no escoamento fora do ventilador podem ser removidos antes do escoamento chegar a seção de teste, mais uma vantagem remanescente das palhetas direcionais é que a velocidade relativa das pás do ventilador é maior do que se o estator estivesse ausente ou a jusante do rotor do ventilador (MEHTA e BRADSHAW, 1979).

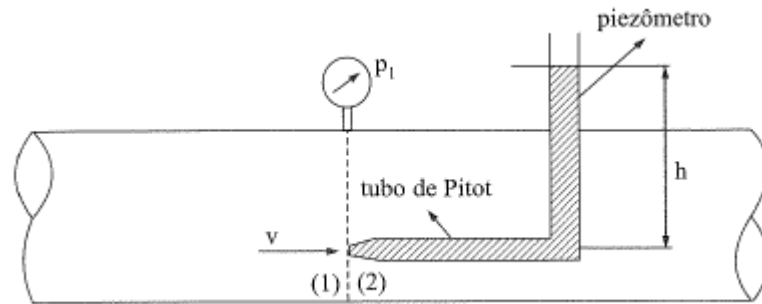
De acordo com Mehta e Bradshaw (1979), a eficiência de ventiladores axiais está na ordem de 90%, logo, a minimização das perdas não são importantes, sendo o procedimento usual é escolher o coeficiente de sustentação da pá para ser tão elevado quanto seguro, sem restrição à razão sustentação/arrasto, onde valores típicos são da ordem de 0,7 a 0,9.

## **2.2 Medição de velocidade**

### **2.2.1 Tubo de Pitot**

O tubo de Pitot é basicamente um instrumento tubular em formato de “L” colocado com sua abertura na direção da trajetória do fluido o qual está escoando, o tubo posteriormente é dobrado em um ângulo reto onde normalmente é adaptado um piezômetro (Figura 20) (BRUNETTI, 2008).

Figura 20 - Esquema de tudo de Pitot para medição de velocidade.



Fonte: Brunetti (2008)

Para o entendimento do funcionamento do tubo de Pitot, é necessário conhecer o conceito de pressão dinâmica e estática. A pressão estática pode ser definida como a força por unidade de área que é exercida por um fluido em todas as direções. Uma massa fluida movimentando-se possuirá, tanto energia potencial proveniente da pressão estática, quanto energia cinética. Ao entrar em contato com um corpo qualquer, a energia cinética do fluido é transferida ao mesmo sob a ação de uma força, essa força é denominada pressão dinâmica ou pressão de velocidade. A soma das pressões dinâmicas e estáticas corresponde a quantidade total de energia contida no ar, correspondendo a pressão total (LACERDA FILHO e MELO, 2008).

Observando a Figura 20, quando as partículas de fluido incidem em (2), chamado de ponto de estagnação, estas são paradas ao encontrar o fluido do piezômetro, a coluna “h” então será formada devido parte à carga da pressão e parte à carga de velocidade, já que no ponto (2) a energia cinética é transformada em efeito de pressão pelo contínuo choque de partículas que chegam em (2) a cada instante (BRUNETTI, 2008).

Aplicando a Equação de Bernoulli (Equação 11) e considerando o ponto (1) muito próximo de (2), de maneira que as perdas entre os pontos serão desprezíveis:

$$Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} = Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \quad (11)$$

Sendo  $p_2$  a pressão total,  $p_1$  a pressão estática e  $\gamma$  o peso específico do fluido.

Como:

$$Z_1 = Z_2$$

$$v_2 = 0 \text{ (ponto de estagnação)}$$

pode-se determinar a velocidade do fluido por meio da Equação 12:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g(p_2 - p_1)}{\gamma}} \quad (12)$$

### 2.3 Visualização de escoamento por injeção de fumaça

Em diversos tipos de pesquisas sobre escoamentos de fluidos, a visualização é uma importante ferramenta na área experimental da mecânica dos fluidos, a qual pode fornecer o quadro geral do campo de escoamento. As técnicas de visualização são aplicadas por alguns motivos: para obter uma foto do fluido em torno do modelo testado, para desenvolver ou verificar novas e melhores teorias sobre escoamento ou modelos (RISTIĆ, 2007).

Durante um teste em um túnel de vento, o modelo é colocado na seção de teste e o ar é forçado a passar por ele. Em alguns túneis, há interesse em estudar as forças aerodinâmicas que atuam sobre o modelo. Em outros, o interesse é obter informações sobre o escoamento em torno do modelo utilizando técnicas de visualização de escoamento. Uma das mais antigas técnicas de visualização é a utilização de fumaça (HALL, 2015).

Figura 21 - Visualização do escoamento pela utilização de fumaça em um túnel de vento.



Fonte: Ristić (2007)

Segundo Hall (2015), a fumaça é utilizada para visualizar o escoamento que está longe da superfície do modelo, podendo detectar vórtices e regiões de separação de escoamento.

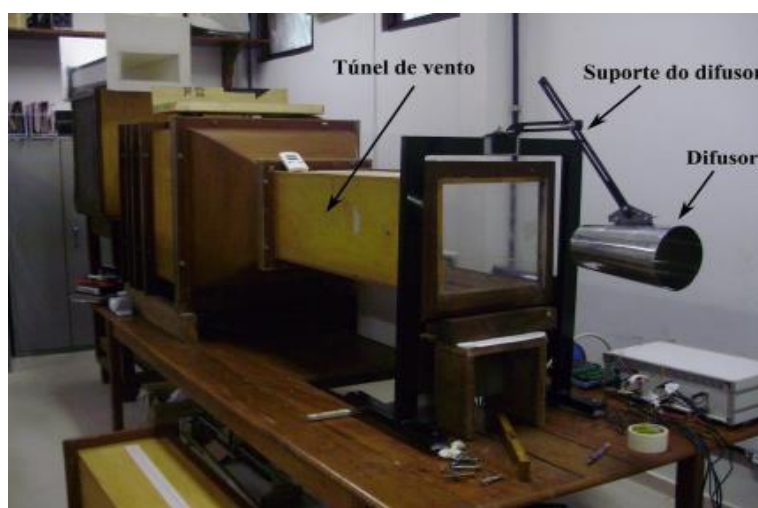
Ademais, este método possui a grande vantagem de ser relativamente barato. A fumaça pode ser injetada sobre a superfície do modelo ou dispersada por um bastão oco que pode ser deslocado através do campo de escoamento. A desvantagem deste método é que não pode ser utilizado de forma adequada a velocidades superiores a 500 km/h. A fumaça precisa ser densa e branca para visibilidade, não podendo ser tóxica ou corrosiva (RISTIĆ, 2007).

### 3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Dentre as configurações de túneis de vento disponíveis na literatura, para este trabalho foi escolhida a do tipo soprador e de circuito aberto, visto que o local onde o equipamento será montado para os testes não possui espaço físico suficiente para a construção de um túnel de circuito fechado, ademais, a configuração de circuito aberto possui um menor custo de projeto. Desta forma, um túnel de vento de circuito aberto atinge os objetivos deste trabalho: minimizar os custos para a construção do equipamento e realizar ensaios aerodinâmicos de microgeradores eólicos e difusores.

Para diminuir os gastos do projeto do túnel de vento, foi necessário que a sua construção fosse realizada com materiais de baixo custo e de fácil aquisição. O dimensionamento de seus componentes não ficou restrito as diretrizes estabelecidas na literatura, pois não se tratam de regras fixas, e sim condições de projeto aproximadas baseadas em túneis de vento já existentes e de bom desempenho. A seção de teste do túnel de vento deste trabalho será aberta, localizada após a saída da seção de estabilização, sendo externa ao equipamento, portanto, os difusores e microgeradores que serão ensaiados neste trabalho serão posicionados na saída do túnel de vento, sendo estes ensaios baseados no trabalho de Barbosa (2013), o qual ensaiou difusores cônicos após a saída do escoamento do túnel.

Figura 22 - Difusor ensaiado externamente ao túnel de vento.

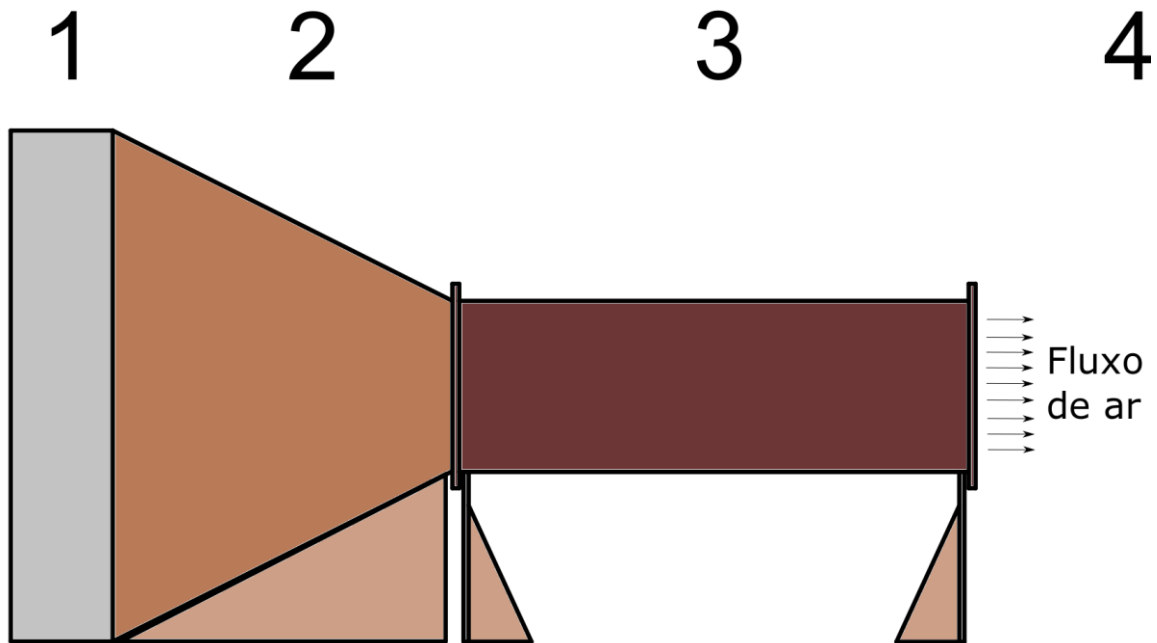


Fonte: Barbosa (2013)

Nesta seção serão listados os materiais utilizados para a construção do túnel de vento, o processo de construção de seus componentes, a averiguação visual da uniformidade do escoamento e quantificação do perfil de velocidade na saída do túnel. Todos os esquemas

exibidos neste capítulo possuirão suas dimensões dadas em centímetros. A Figura 23 mostra o esquema de como será o túnel de vento construído neste trabalho.

Figura 23 - Esquema da vista lateral do túnel de vento.



Fonte: Autoria própria

Os componentes do túnel de vento exibidos na Figura 23 são:

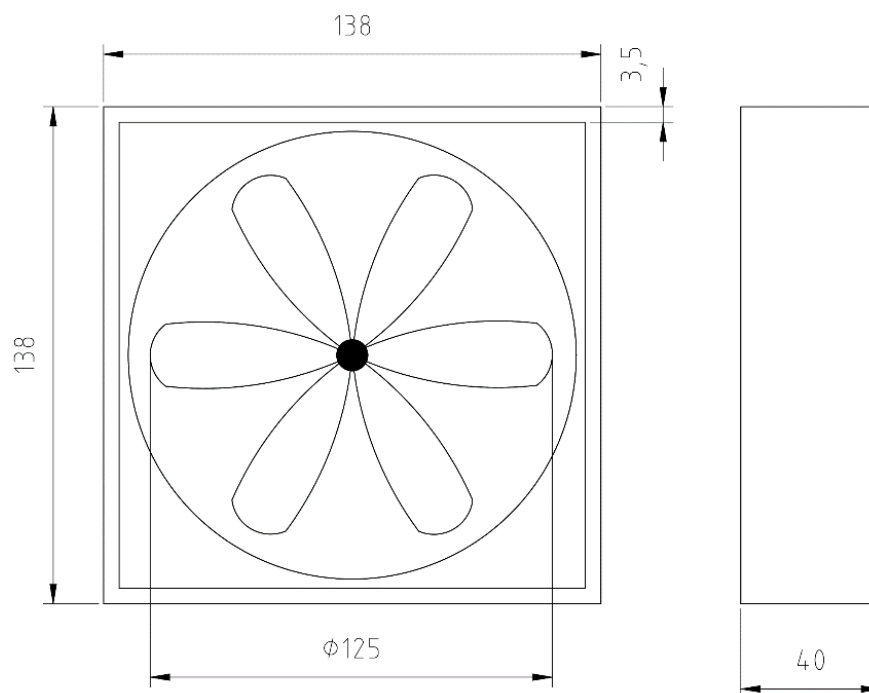
1. Ventilador axial;
2. Contração;
3. Seção de estabilização (contendo duas colmeias);
4. Seção de teste aberta.

### 3.1 Aparato Experimental

#### 3.1.1 Ventilador axial

O ventilador axial disponível no LABEM é o modelo HYA-1380 da empresa Hengyuan Refining Company Berhad (HRC), este será utilizado como sistema propulsor do túnel de vento deste trabalho. Suas características técnicas e dimensões estão apresentadas respectivamente pelo Quadro 1 e Figura 25.

Figura 24 - Esquema do ventilador.



Fonte: Autoria própria

Quadro 1 – Características de operação do ventilador axial.

Ventilador axial industrial HYA - 1380	
Velocidade de rotação das lâminas	439 rpm
Velocidade de rotação do motor	1400 rpm
Vazão	44000 m <sup>3</sup> /h
Pressão total	56 mmca
Ruído	≤ 70 dB
Tensão	380 V
Potência	1,1 kW

Fonte: Autoria própria

Figura 25 - Ventilador axial industrial.



Fonte: Autoria própria

### 3.1.2 Elementos do túnel

Com o objetivo de construção do túnel de vento, foram necessários a montagem dos seguintes componentes: a) contração; b) seção de estabilização; c) colmeia de tubos PVC; d) colmeia de canudos plásticos.

Para a montagem dos elementos supracitados foram necessários os seguintes materiais:

#### a) Contração

- Folhas de compensado (2 folhas, 1,60 m x 2,2 m, espessura 10 mm)
- Cantoneiras (12 unidades, aço, 40 mm x 40 mm)
- Parafusos cabeça “panela” (24 unidades,  $d = 6$  mm)
- Porcas sextavadas (24 unidades)
- Arruelas lisas (48 unidades)

#### b) Seção de estabilização

- Folhas de compensado (1 folha, 1,60 m x 2,2 m, espessura 18 mm)
- Pregos (3 cm)

- 1 tubo de cola para madeira
  - Porca garra aço carbono zincado (16 unidades)
  - Parafusos cabeça sextavada (16 unidades,  $d = 8\text{mm}$ )
  - Tinta plástica marrom (0,5 litro)
- c) Colmeia de canudos plásticos
- Canudos plásticos (9 pacotes de 100 unidades, diâmetro de 10 mm, comprimento de 21 cm)
  - Parafusos cabeça “panela” (24 unidades,  $d = 6\text{ mm}$ )
  - Chapas de aço galvanizado
  - Fita adesiva
- d) Colmeia de tubos de PVC
- 2 Tubos de PVC ( $d = 50\text{mm}$ ,  $L = 6\text{ m}$ )
  - 1 Tubos de PVC ( $d = 40\text{mm}$ ,  $L = 6\text{ m}$ )
  - Fita adesiva

Demais equipamentos utilizados:

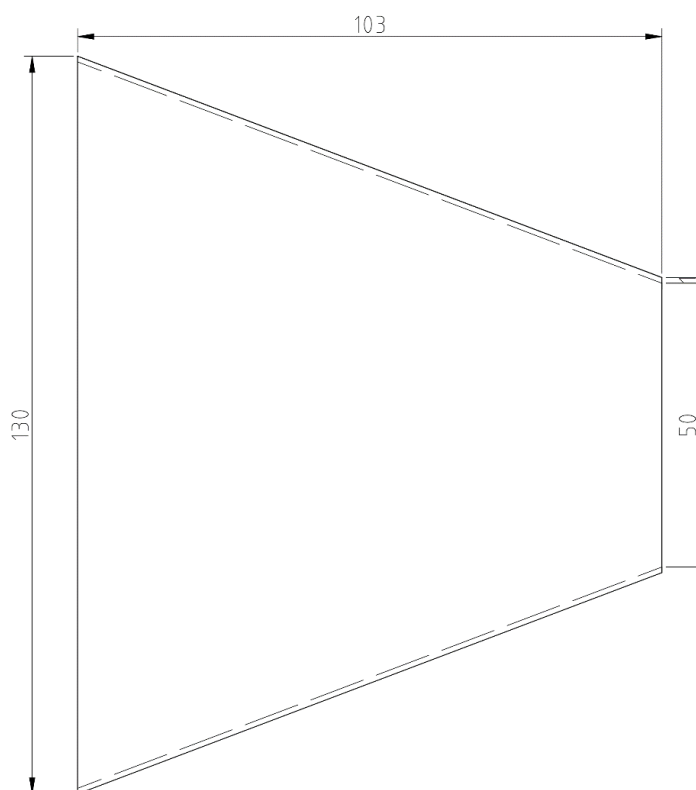
- Tubo de Pitot ( $L = 50\text{ cm}$ ,  $d = 6\text{ mm}$ )
- Transdutor de diferença de pressão (498,18 Pa)
- Fonte chaveada (24V, 1A)
- Microcomputador (Core 2 Duo, 4GB)
- Inversor de frequência (380 V)
- Máquina de fumaça
- Microgerador
- Multímetro

## 3.2 Procedimento Experimental

### 3.2.1 Contração

A contração foi construída utilizando-se folhas de compensado de 10 mm de espessura. Ao contrário da geometria usual recomendada pela literatura, a qual o perfil da contração é determinado pela equação de 5 grau (Equação 5), foi utilizada uma geometria de tronco de pirâmide de base quadrada, por motivos de redução de custos e simplificação na montagem. As dimensões da área de entrada e saída do escoamento da contração já são definidas respectivamente pela área da seção transversal do ventilador da seção de estabilização, enquanto que o comprimento do bocal foi determinado de modo que a contração pudesse ser construída utilizando-se apenas duas folhas de compensado. As dimensões da contração podem ser conferidas na Figura 26.

Figura 26 - Esquema contração.



Fonte: Autoria própria

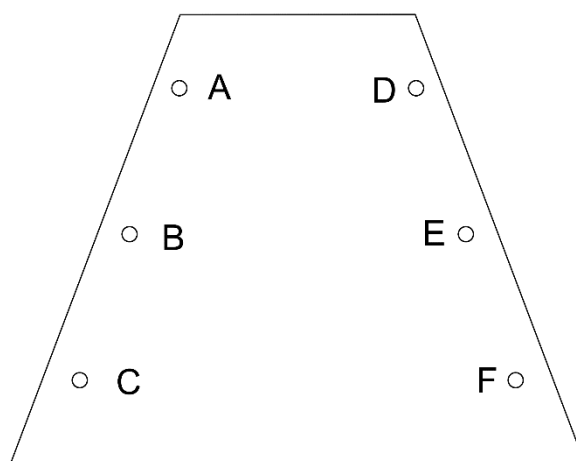
As dimensões do bocal satisfazem um parâmetro importante quanto as diretrizes de construção deste elemento, a razão de contração. Esta é definida pela Equação 13, sendo definida como a razão entre a área de entrada ( $S_e$ ) e a área de saída da contração ( $S_s$ ):

$$c = \frac{S_e}{S_s} \quad (13)$$

É recomendável que a razão de contração deva possuir valores entre 6 e 10 para a maioria dos túneis de vento de baixas velocidades. Utilizando as dimensões da contração do túnel deste projeto, encontra-se um valor de contração de 6,76, satisfazendo os valores recomendados.

Para a montagem deste elemento, as duas folhas de compensado utilizadas para sua construção foram previamente cortadas em quatro faces em formato trapezoidal no local de sua compra. Com o auxílio de uma furadeira, seis furos foram feitos nestas faces conforme a Figura 27.

Figura 27 – Face trapezoidal da contração com furos igualmente espaçados.



Fonte: Autoria própria

Utilizando-se uma das faces como base da contração, outras duas folhas foram posicionadas em suas laterais para serem firmadas a base. Em seguida, com o auxílio de cantoneiras, parafusos, porcas e arruelas as faces foram unidas através de seus furos. Do mesmo modo, a última face foi posicionada e fixada no topo da contração utilizando-se cantoneiras, desta forma, completando a contração conforme mostra a Figura 28. A escolha de cantoneiras para construção deve-se ao fato de que não desejava-se fixar as faces da contração de modo permanente, pois isto facilitaria que o elemento fosse desmontado e transportado quando necessário.

Figura 28 - Contração.

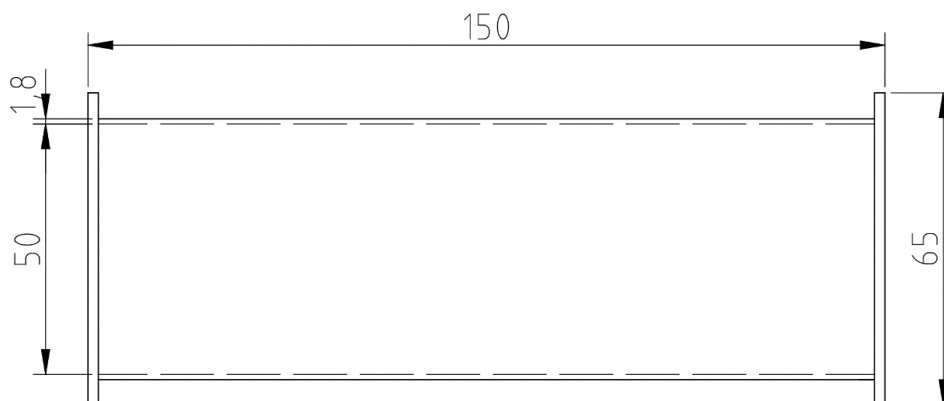


Fonte: Autoria Própria

### 3.2.2 Seção de estabilização

As dimensões da seção de estabilização foram definidas conforme a Figura 29 para que ela pudesse ser construída a partir de uma única folha de compensado de 18 mm de espessura, em uma seção quadrada de 50 cm x 50 cm, a qual é a seção transversal desejada para os ensaios no túnel de vento deste trabalho.

Figura 29 - Esquema da seção de estabilização.



Fonte: Autoria própria

As dimensões almejadas para a seção de estabilização foram levadas a um marceneiro o qual construiu o elemento. Por fim, foi utilizado tinta plástica marrom para o acabamento, proporcionando uma superfície externa lisa e de boa aparência a seção, como mostra a Figura 30.

Figura 30 - Seção de estabilização.



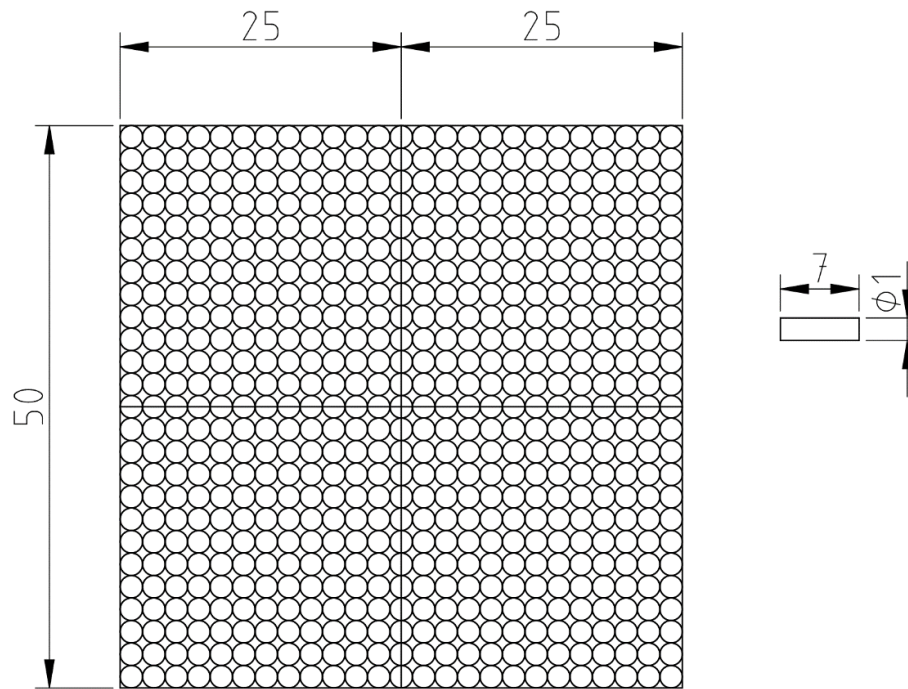
Fonte: Autoria própria

### 3.2.3 Colméia de canudos plásticos

Este componente é constituído de canudos plásticos unidos de modo a formar uma matriz destes elementos, sendo dispostos de forma semelhante a uma colmeia. Este retificador deve possuir dimensões equivalentes a seção transversal da seção de estabilização, pois será fixado em uma das extremidades do interior da seção de estabilização.

Os canudos utilizados para a construção do retificador possuem 10 mm de diâmetro e 21 cm de comprimento. A colmeia foi dividida em 4 módulos de 25 cm x 25 cm, separadas por chapas de aço galvanizado, cada um destes módulos será preenchido com aproximadamente 676 canudos plásticos, possuindo um total em torno de 2700 células na colmeia. Para obter as 2700 células, seccionou-se 900 canudos em três partes de 7 cm de comprimento, de modo que cada canudo gerou 3 células da colmeia. A figura 31 mostra as dimensões deste elemento.

Figura 31 - Esquema da colmeia de canudos.



Fonte: Autoria própria

Verifica-se que as dimensões da colmeia satisfazem a relação entre comprimento e diâmetro recomendados pela literatura (MEHTA, 1977; MEHTA E BRADSHAW, 1979), a qual sugere que o comprimento da célula seja sete vezes maior que o seu diâmetro hidráulico oferecendo maior eficiência a qualidade do escoamento.

Em seguida, utilizando fita adesiva, os canudos foram fixados em fileiras de 26 células e firmados em suportes feitos de chapa de aço utilizando-se novamente fita adesiva. Por fim, os módulos foram posicionados em uma extremidade da seção de estabilização e firmados a seção por meio de encaixe, a pressão exercida entre módulos foi suficiente para estabiliza-los no túnel. A figura 32 mostra a colmeia construída.

Figura 32 - Colmeia de canudos.



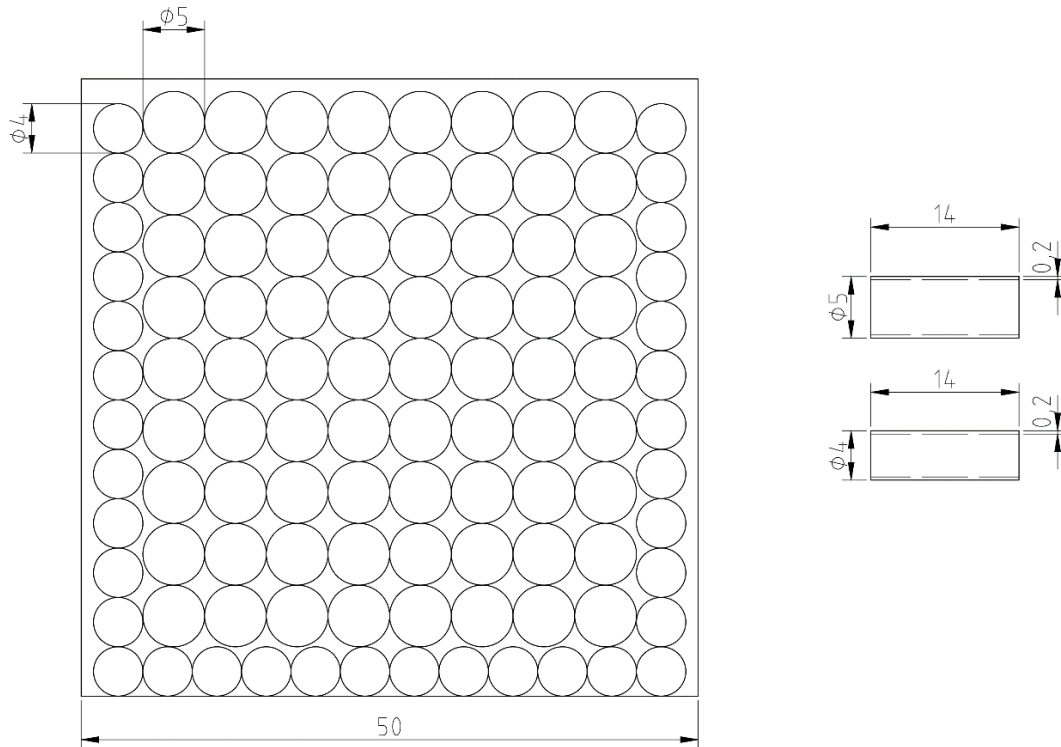
Fonte: Autoria própria

### 3.2.4 Colméia de tubos PVC

A segunda colmeia foi construída a partir de tubos de PVC unidos de modo a formar uma matriz semelhante a colmeia de canudos, visando possuir dimensões iguais às da seção transversal da seção de estabilização, pois este elemento também será fixado no interior da seção de estabilização e na extremidade oposta a colmeia de canudos.

Inicialmente, considerou-se que este componente poderia ser constituído de 100 tubos de PVC de 50 mm de diâmetro, dispostos em fileiras 10 x 10, contudo, devido a seção de estabilização não possuir exatamente 50 x 50 cm<sup>2</sup> devido as imprecisões em sua construção, tal configuração tornou-se inviável. Para solucionar este problema, utilizou-se de tubos PVC de 40 e 50 mm de diâmetro em uma nova configuração, como mostra a Figura 33. O comprimento de cada célula da colmeia foi definido de acordo com o comprimento original dos tubos PVC de 40 e 50 mm compradas, de maneira que ao cortar os tubos para formar as células da colmeia, cada tubo disponha do máximo comprimento possível, sendo este comprimento 14 cm para os dois diâmetros de tubos.

Figura 33 - Esquema da colmeia de PVC.

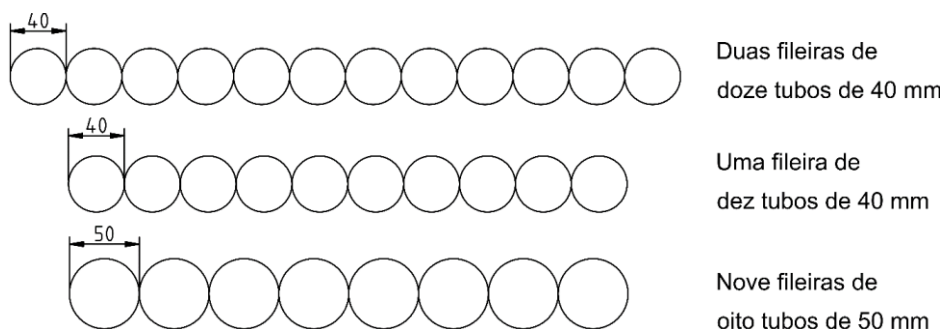


Fonte: Autoria própria

Nesta nova configuração, os canos de PVC de 40 mm estariam dispostos na extremidade inferior e laterais da colmeia, no formato de “U”, o restante seria preenchido com os tubos de 50 mm, desta forma, os tubos ocupariam aproximadamente as mesmas dimensões da seção transversal da seção de estabilização.

Para obter a geometria desejada, utilizando-se uma maquina, os tubos PVC foram seccionados com o comprimento preestabelecido. Estas células foram unidas com o auxílio de fita adesiva em três diferentes configurações de fileiras, como exibe a Figura 34.

Figura 34 - Configurações das fileiras para construção da colmeia de PVC.



Fonte: Autoria própria

Após obter as fileiras de tubos, eles foram arranjados na seção de estabilização conforme a Figura 33. A disposição final dos tubos está apresentada na Figura 35.

Figura 35 - Colmeia de PVC.



Fonte: Autoria própria

A colmeia de PVC será o primeiro retificador a corrigir os vórtices provenientes do ventilador axial, sendo o elemento responsável por corrigir os turbilhões de maior escala, posteriormente, a colmeia de canudos plásticos refinará novamente o escoamento, reduzindo uma vez mais a intensidade dos turbilhões remanescentes.

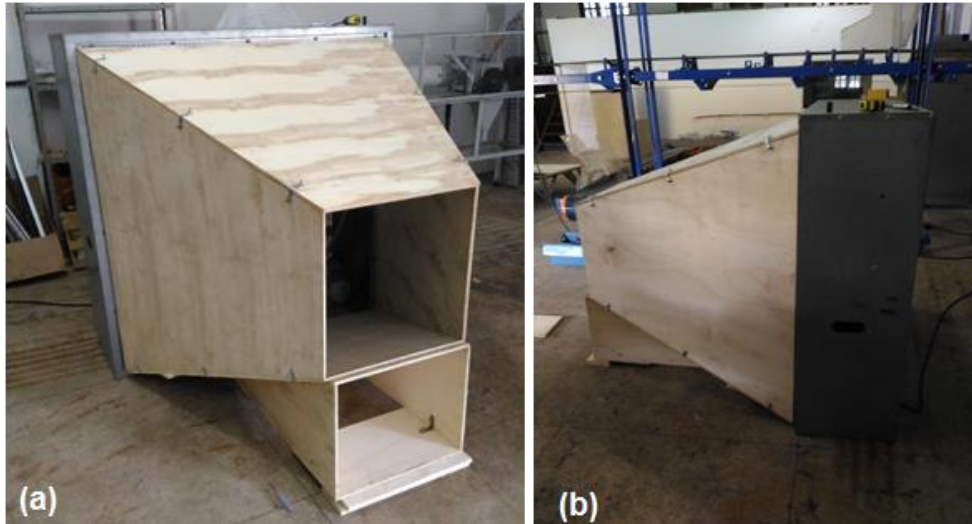
### 3.2.5 Acoplamento dos componentes

Após a elaboração de todos os elementos, iniciou-se a montagem do túnel de vento. Fez-se necessário a construção de elementos de suporte do túnel de vento para alinhar o eixo da contração e da seção de estabilização com o eixo do ventilador axial. Estes suportes foram construídos com pregos e materiais restantes oriundos dos cortes das folhas de compensado de outros elementos.

A primeira peça a ser montada foi a contração, para fixá-la ao ventilador axial, a área de maior seção transversal do bocal foi dimensionada para encaixar-se a estrutura do ventilador, desta maneira, facilitando a união destes elementos. Com o auxílio dos suportes do túnel e uma trena, posicionou-se e nivelou-se a contração na posição requerida. Cordas

amarradas nas cantoneiras da contração e na estrutura do ventilador também foram utilizadas para auxiliar na fixação destes elementos, proporcionando também rigidez a estrutura.

Figura 36 – a) Ventilador e contração encaixados. b) vista lateral do acoplamento.



Fonte: Autoria própria

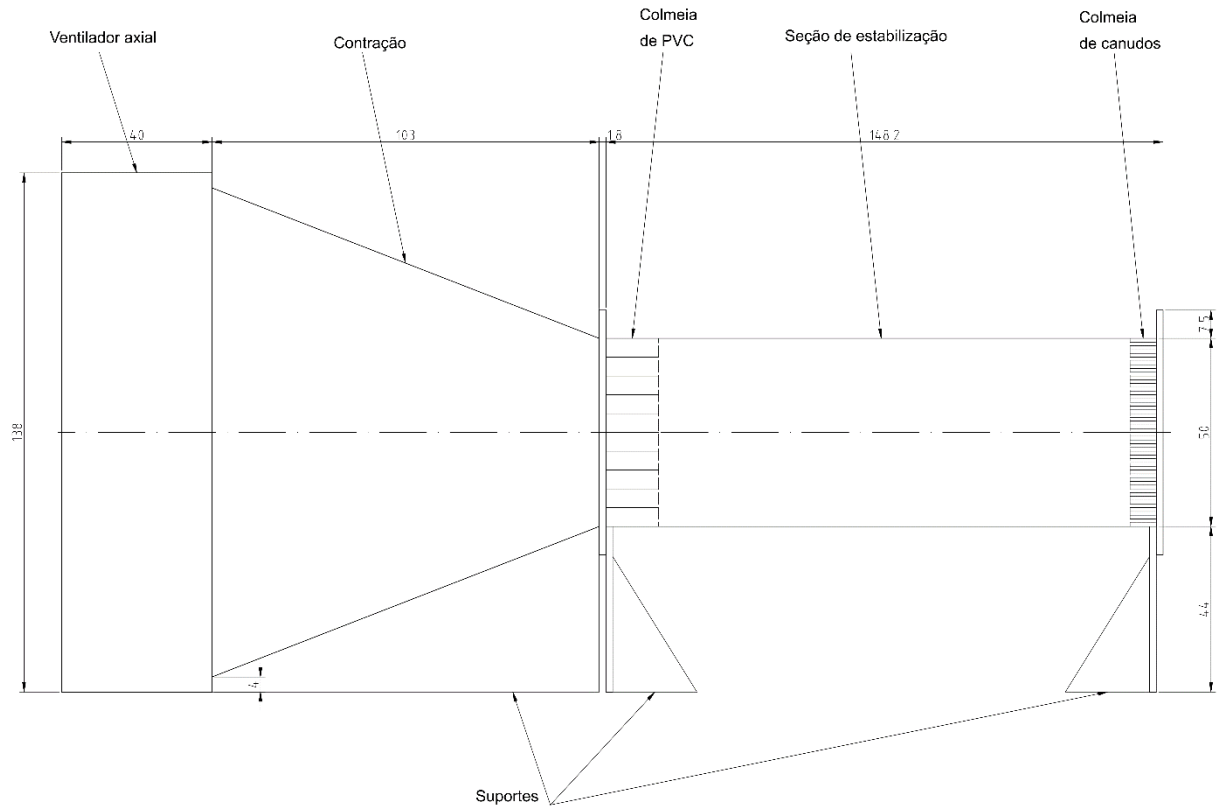
Em seguida, encaixou-se a estrutura da Figura 36 com a extremidade da seção de estabilização que continha a colmeia de PVC. Para que não ocorresse vazamento do ar que circula no interior do túnel de vento para o meio externo, vedou-se a ligação entre os componentes com fita adesiva. A Figura 37 exibe o túnel de vento completamente construído.

Figura 37 - Túnel de vento finalizado.



Fonte: Autoria própria

Figura 38 - Configuração final do túnel.



Fonte: Autoria própria

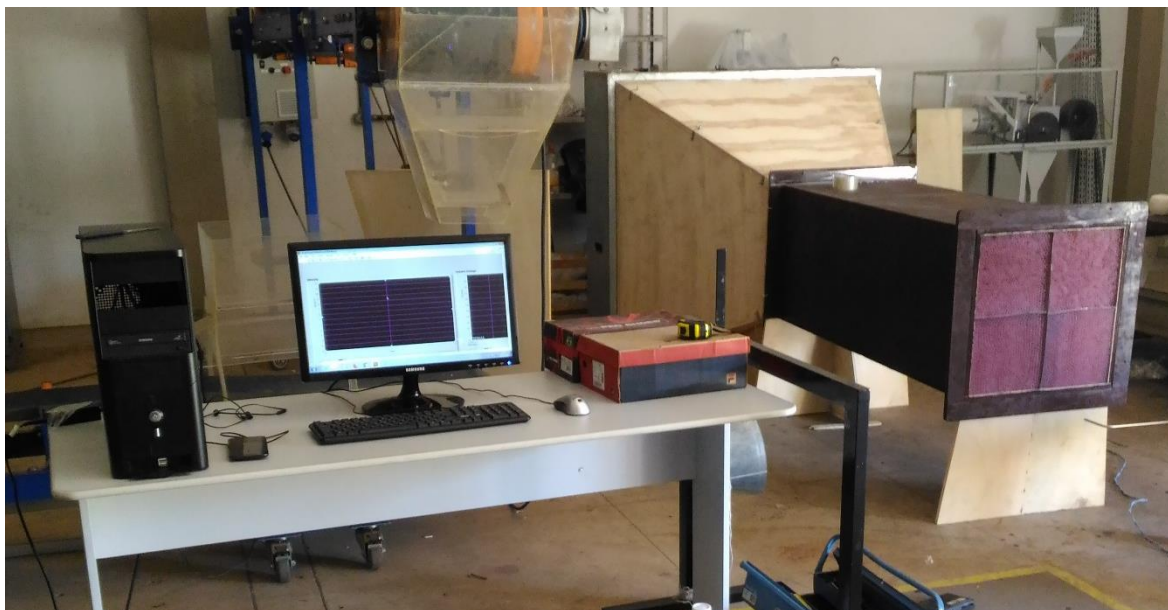
Com os elementos e túnel de vento finalizados, a Tabela 1 expõe os dados dimensionais do túnel.

Tabela 1 - Dimensões do túnel de vento.

	Ventilador	Contração	Seção de estabilização
Seção transversal	1,38 x 1,38 m <sup>2</sup>	-	0,5 x 0,5 m <sup>2</sup>
Comprimento	0,4 m	1,03 m	1,5 m
<b>Comprimento total</b>			<b>2,93 m</b>

Fonte: Autoria própria

Figura 39 - Arranjo final dos equipamentos.



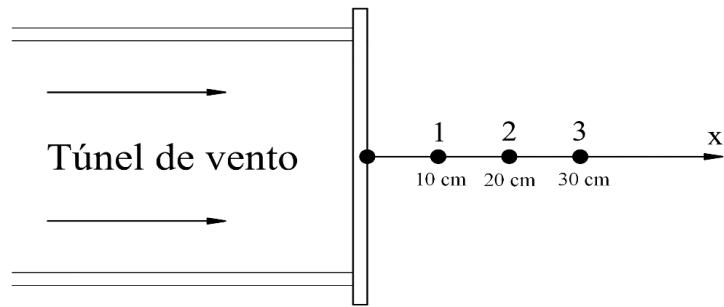
Fonte: Autoria própria

### 3.2.6 Quantificação do perfil de velocidade

Após a construção do túnel de vento, torna-se necessário sua avaliação para verificar se o equipamento está operando de maneira adequada. Como o túnel de vento deste trabalho será utilizado para ensaios de difusores e microgeradores em uma seção de teste aberta, utilizou-se como referência a metodologia empregada por Barbosa (2013) para validar a qualidade do escoamento. A metodologia consiste em mapear a região de influência do escoamento proveniente do túnel de vento após a saída da seção de estabilização, deste modo, verificando se o perfil permanecerá uniforme à medida que afastar-se do túnel.

Utilizando um microgerador e um multímetro, realizou-se o mapeamento do escoamento de ar na saída da seção de estabilização do túnel, onde serão posicionados os modelos para ensaios. O objetivo deste teste é verificar se havia uma diferença entre as tensões elétricas medidas pelo multímetro à medida que se distanciava o microgerador da boca do túnel de vento. O microgerador foi posicionado em três pontos diferentes como mostra a Figura 40.

Figura 40 - Posicionamento do microgerador após a boca do túnel.



Fonte: Autoria própria

Figura 41 - Microgerador posicionada para medição da tensão elétrica.

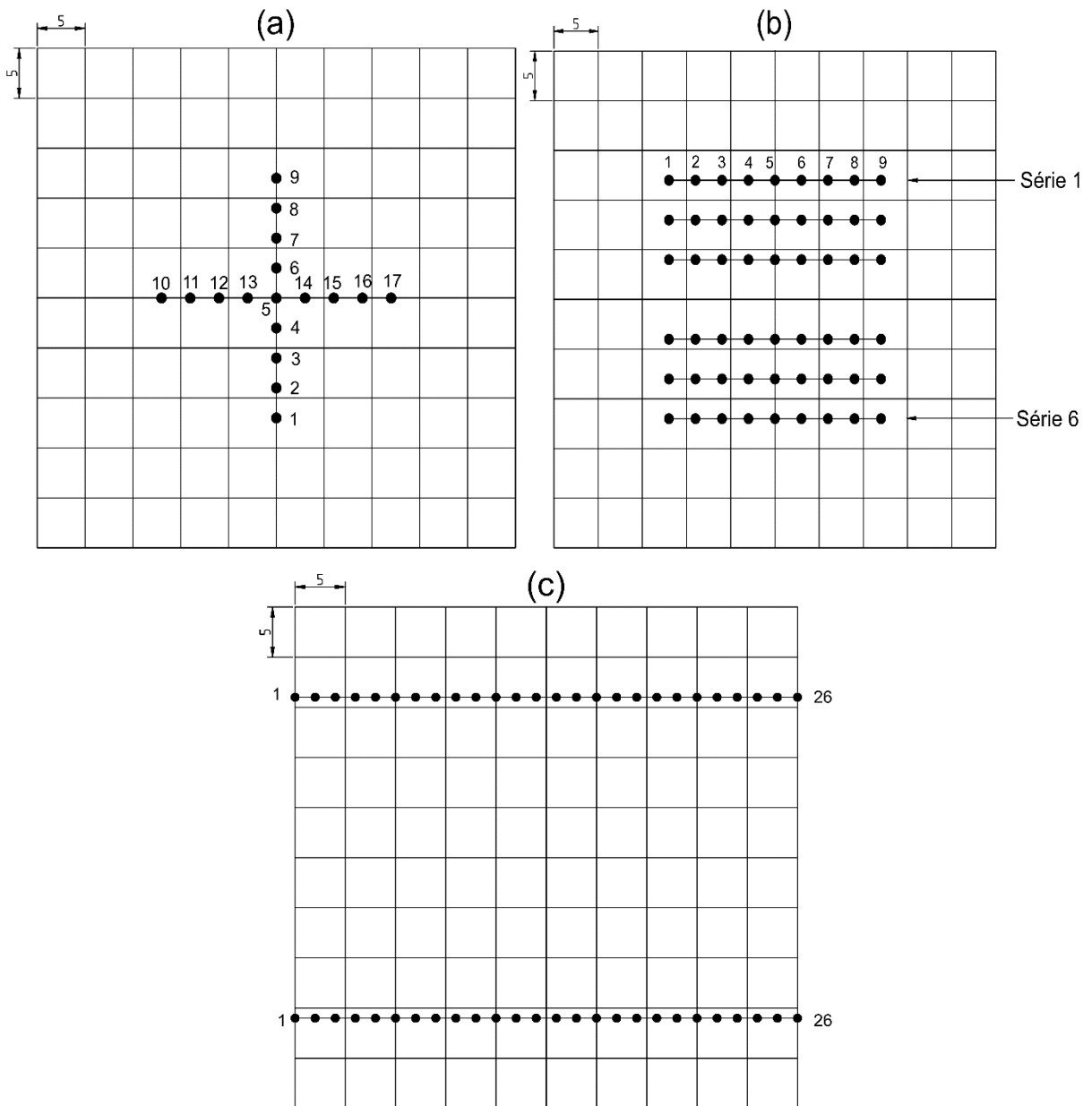


Fonte: Autoria própria

Após a verificação das tensões elétricas, é necessário obter informações sobre o comportamento do escoamento, para isto, um tubo de Pitot foi utilizado para analisar o perfil de velocidade na região de influência. Uma região de área igual a seção transversal da seção de estabilização foi mapeada, estando afastada a 10 cm da saída do túnel de vento.

Para avaliar o perfil de velocidade nesta região, três diferentes mapeamentos foram realizados, a distribuição dos pontos os quais as velocidades foram medidas estão expostos na Figura 42.

Figura 42 - a) Mapeamento em cruz. b) Mapeamento quadrado. c) Mapeamento das bordas superior e inferior.



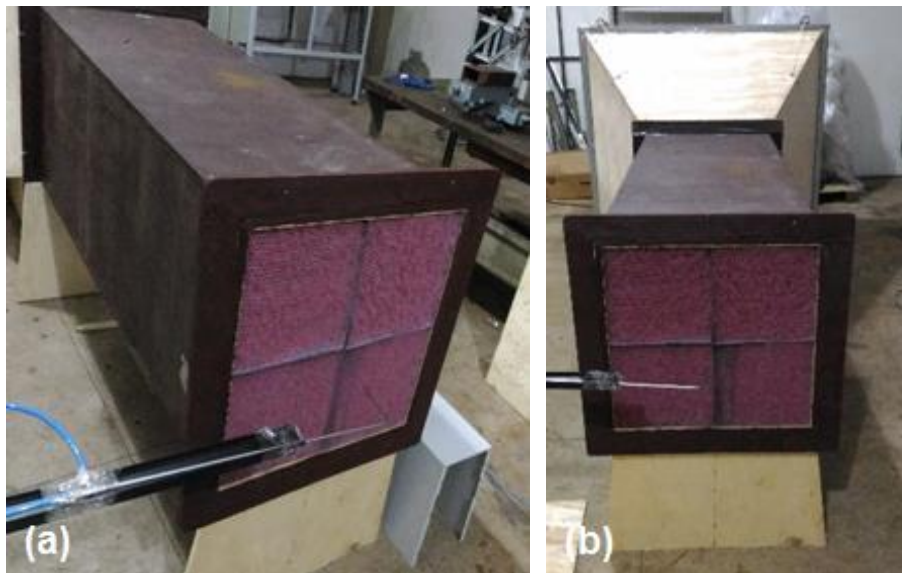
Fonte: Autoria própria

O mapeamento em cruz da Figura 42 (a) consistiu em dividir a região em duas linhas: uma horizontal e uma vertical. O cruzamento dessas linhas coincide com o centro da seção transversal. Para este mapeamento, um total de 17 pontos de interesse foram escolhidos, sendo 8 verticais, 8 horizontais e 1 no cruzamento das linhas, arranjados de forma simétrica. Os pontos estão separados de seus subsequentes a uma distância de 3 cm, sendo que os pontos localizados nas extremidades estão afastados das bordas da seção a uma distância de 13 cm.

O segundo mapeamento realizado encontra-se ilustrado pela Figura 42 (b). A seção foi dividida em 6 linhas horizontais de comprimento equivalente, cada uma contendo 9 pontos de interesse, no qual para cada linha foi dado um número de série de 1 a 6 para facilitar a organização dos resultados da análise de velocidade. Os pontos estão afastados consecutivamente a uma distância de 3 cm, sendo que os localizados nas extremidades encontram-se afastados das margens da seção a uma distância de 13 cm.

Para realizar o terceiro e último mapeamento, utilizou-se duas linhas horizontais de igual comprimento e afastadas das extremidades superior e inferior a uma distância de 9 cm. Cada linha contém um total de 26 pontos, distanciados em 2 cm de seus consecutivos.

Figura 43 – a) Tubo de Pitot posicionado para as medições. b) Vista frontal do posicionamento.



Fonte: Autoria própria

Após as malhas para o mapeamento serem definidas, o tubo de Pitot foi posicionado a uma distância de 10 cm da saída do túnel com suas tomadas de pressão voltadas para o interior da seção de estabilização como mostra a Figura 43. Utilizando o inversor de frequência, os testes foram conduzidos a uma frequência de 25 Hz, pois esta era a potência mínima de acionamento do microgerador utilizada no ensaio do teste de diferença de potencial. Para cada ponto nos três diferentes mapeamentos, a taxa de obtenção de dados no tubo de Pitot foi de 20 Hz durante 15 segundos.

### 3.2.7 Visualização do escoamento por injeção de fumaça

Para verificar visualmente o escoamento na saída do túnel de vento e obter o seu quadro geral, utilizou-se a técnica de injeção de fumaça, esta fumaça será gerada pela máquina exibida na Figura 44. A fumaça também foi inserida anteriormente a colmeia de PVC, a fim de comparar o perfil de escoamento proveniente das duas colmeias.

Figura 44 - Máquina de fumaça.



Fonte: Autoria própria

Utilizando-se uma furadeira, um pequeno furo foi aberto na lateral da seção de estabilização próximo à saída do túnel de vento. Uma conexão para mangueira foi acoplada a máquina de fumaça para que o gás pudesse ser injetado diretamente pela abertura sem que ocorresse vazamentos.

### 3.3 Orçamento do projeto

A Tabela 2 e 3 apresentam, respectivamente, os custos referentes a construção do túnel de vento e da instrumentação utilizada. Os materiais e instrumentos que já estavam disponíveis para o projeto não serão incluídos nas tabelas.

Tabela 2 - Custo da construção do túnel de vento.

Categoria	Mercadoria	Valor (R\$)
Contração	Folhas de compensado	144,00
	Cantoneiras	30,00
	Parafusos cabeça “panela”	7,20
	Porcas sextavadas	9,60
	Arruelas lisas	7,20
Seção de estabilização	Folhas de compensado	92,00
	Pregos	11,00
	Tubo de cola para madeira	6,50
	Porca garra aço carbono zincado	6,40
	Parafusos cabeça sextavada	8,80
Colmeia de canudos plásticos	Tinta plástica Marrom	10,50
	Canudos plásticos	28,80
Colmeia de PVC	Parafusos cabeça “panela”	7,20
	Tubos de PVC (d = 50mm)	34,00
Serviços de Terceiro	Tubo de PVC (d = 40mm)	13,50
	Construção da seção de estabilização	90,00
<b>Total</b>		<b>509,70</b>

Fonte: Autoria própria

Tabela 3 - Custo da instrumentação.

	Mercadoria	Valor (R\$)
Instrumentação	Tubo de Pitot	805,00
	Máquina de fumaça	280,00
<b>Total</b>		<b>1085,00</b>

Fonte: Autoria própria

O custo total do projeto do túnel de vento, a soma do custo da construção do túnel e de sua instrumentação, foi de R\$ 1594,70.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Tensão elétrica no microgerador

A Tabela 4 apresenta os valores de tensão elétrica obtida ao posicionar o microgerador nas posições de 10, 20 e 30 cm a partir da saída do túnel de vento.

Tabela 4 - Valores de tensão medidos no microgerador.

Posição X (cm)	Tensão (V)
10	0,67
20	0,67
30	0,66

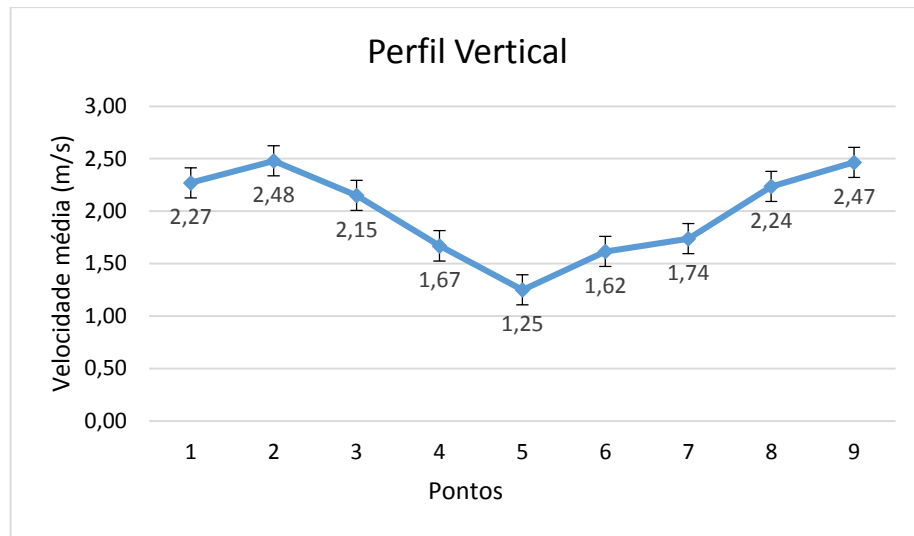
Fonte: Autoria própria

Os resultados apontam que há uma baixa redução na tensão elétrica obtida a medida que a microgerador é afastada da saída do túnel de vento. Logo, nesta região de influência do escoamento compreendida entre a saída da seção de estabilização e 30 cm distante de sua saída, o escoamento do ar é uniforme e não ocorrerá interferência referente a distância sobre os resultados dos ensaios que serão realizados no túnel de vento. Sendo este resultado similar ao mapeamento do jato de ar na boca do difusor de Barbosa (2013).

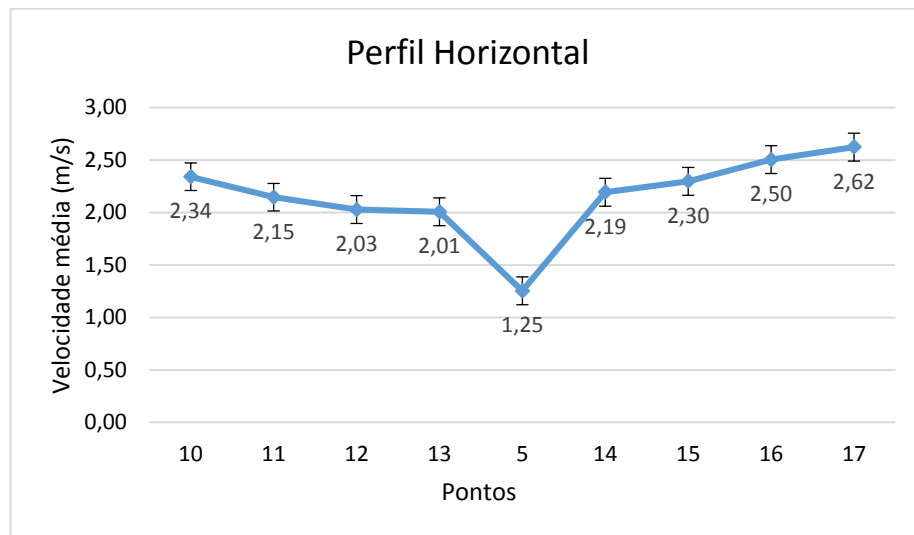
### 4.2 Perfil de velocidade na seção de teste

A Figura 45 exibe os perfis de velocidade na posição vertical e horizontal do mapeamento em cruz.

Figura 45 - Perfil de velocidade do mapeamento em cruz. a) Posição vertical. b) Posição horizontal.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria

Através dos gráficos da Figura 45, nota-se que os perfis de escoamentos são similares: sua velocidade no ponto 5 (correspondente ao ponto central da seção) é mínima, e a velocidade aumenta conforme os pontos são distanciados do centro. Isto ocorre devido ao perfil de escoamento do ventilador axial já possuir esse formato em sua saída, sendo mínima no centro e em suas extremidades. Contudo, esta variação de velocidade em um ventilador axial ocorre de maneira mais abrupta, constatando que os elementos do túnel amenizaram a variação de velocidade, tornando o perfil mais uniforme, desta forma, melhorando a qualidade do escoamento.

A Tabela 5 expõe os valores médios de velocidade e desvios padrão do perfil vertical e horizontal em cada ponto de medição.

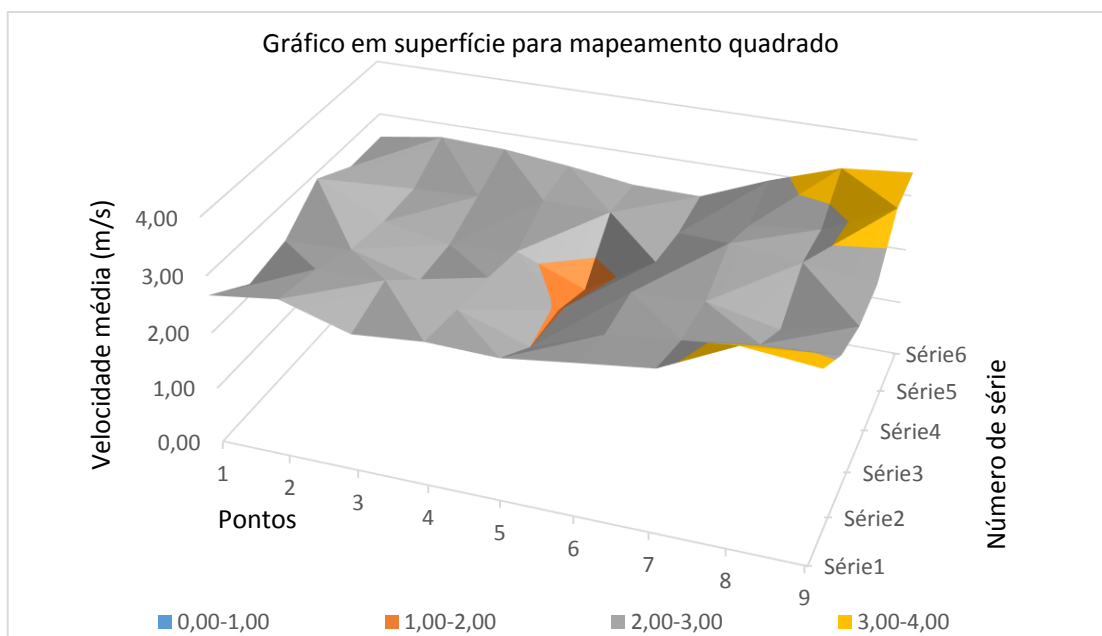
Tabela 5 - Velocidade média e desvio do escoamento na posição vertical e horizontal.

Posição Vertical			Posição Horizontal		
Ponto	Média (m/s)	Desvio (m/s)	Ponto	Média (m/s)	Desvio (m/s)
1	2,27	0,143	10	2,34	0,193
2	2,48	0,112	11	2,15	0,142
3	2,15	0,135	12	2,03	0,131
4	1,67	0,138	13	2,01	0,151
5	1,25	0,279	5	1,25	0,279
6	1,62	0,169	14	2,19	0,131
7	1,74	0,226	15	2,30	0,114
8	2,24	0,113	16	2,50	0,127
9	2,47	0,101	17	2,62	0,115

Fonte: Autoria própria

A Figura 46 apresenta as velocidades medidas em um gráfico de superfície 3D para o mapeamento quadrado, contendo todas as 6 linhas da malha.

Figura 46 - Gráfico de superfície 3D para o mapeamento quadrado.



Fonte: Autoria própria

Observando a Figura 46, é perceptível que seus perfis de velocidade são semelhantes ao mapeamento em cruz, principalmente em relação as séries 2, 3 e 4. Ademais, há uma leve concentração de velocidade entre os pontos 6 e 9, o que pode ser explicado por uma pequena abertura nas vedações entre os componentes, concentrando uma maior quantidade de ar em uma das extremidades da seção. Porém, o acréscimo de velocidade não é suficientemente alto para prejudicar a qualidade do escoamento.

As Tabela 6 e 7 apresentam os valores médios de velocidade e desvios padrão de todas as séries mapeadas na malha.

Tabela 6 - Velocidade média e desvio do escoamento nas séries de 1 a 3.

Ponto	Série 1		Série 2		Série 3	
	Média (m/s)	Desvio (m/s)	Média (m/s)	Desvio (m/s)	Média (m/s)	Desvio (m/s)
1	2,66	0,145	2,19	0,140	2,34	0,086
2	2,82	0,141	2,68	0,102	2,40	0,165
3	2,45	0,098	2,71	0,183	2,05	0,117
4	2,56	0,114	2,42	0,218	2,33	0,163
5	2,52	0,234	2,00	0,179	1,96	0,093
6	2,69	0,164	2,46	0,110	2,52	0,069
7	2,84	0,125	2,60	0,151	2,58	0,091
8	3,46	0,156	2,77	0,095	2,32	0,158
9	3,34	0,200	2,83	0,315	2,62	0,132

Fonte: Autoria própria

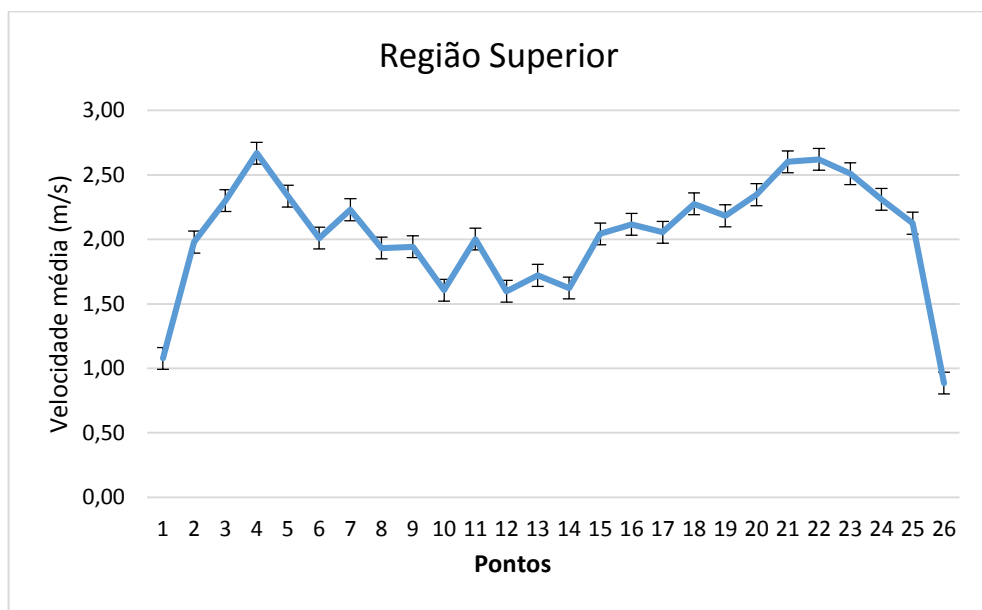
Tabela 7 - Velocidade média e desvio do escoamento nas séries de 4 a 6.

Ponto	Série 4		Série 5		Série 6	
	Média (m/s)	Desvio (m/s)	Média (m/s)	Desvio (m/s)	Média (m/s)	Desvio (m/s)
1	2,89	0,294	2,54	0,128	2,56	0,121
2	2,29	0,111	2,31	0,178	2,74	0,155
3	2,08	0,162	2,37	0,106	2,69	0,168
4	2,16	0,124	2,50	0,099	2,56	0,155
5	1,67	0,172	2,48	0,105	2,40	0,141
6	2,40	0,120	2,30	0,106	2,38	0,101
7	2,95	0,237	2,65	0,139	2,88	0,153
8	2,83	0,101	2,79	0,180	3,30	0,254
9	2,68	0,091	3,38	0,323	3,42	0,132

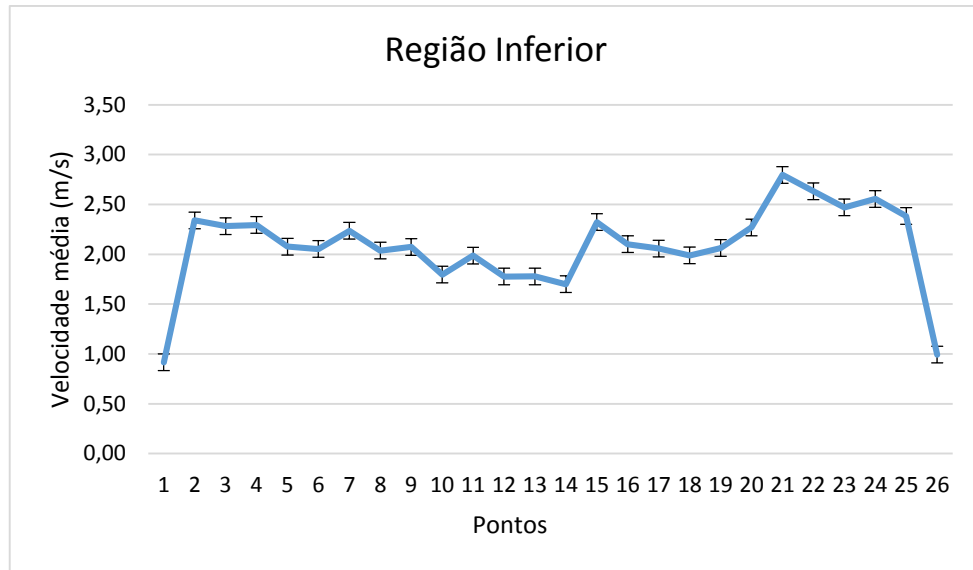
Fonte: Autoria própria

Os gráficos do terceiro mapeamento, referente as bordas superior e inferior, estão apresentados na Figura 47.

Figura 47 - Perfil de velocidade do mapeamento nas bordas. a) Região superior. b) Região inferior.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria

Analisando os dados obtidos no mapeamento das regiões superior e inferior, é possível observar que seus valores de velocidade estão na mesma faixa dos obtidos nos mapeamentos anteriores, possuindo uma velocidade ligeiramente menor no centro. As velocidades registradas nos pontos 1 e 26 são menores que as demais devido ao efeito de rugosidade da parede, normalizando conforme ocorre o distanciamento das extremidades.

A Tabela 8 e 9 apresentam os valores os valores médios de velocidade em cada ponto de medição na região superior e inferior, com seus respectivos desvios padrão.

Tabela 8 - Velocidade média e desvio na região superior.

Região Superior					
Ponto	Média (m/s)	Desvio (m/s)	Ponto	Média (m/s)	Desvio (m/s)
1	0,92	0,34	14	1,70	0,30
2	2,34	0,34	15	2,32	0,27
3	2,28	0,24	16	2,10	0,25
4	2,29	0,29	17	2,06	0,36
5	2,08	0,30	18	1,99	0,31
6	2,05	0,22	19	2,06	0,39
7	2,24	0,30	20	2,27	0,22
8	2,04	0,24	21	2,80	0,22
9	2,07	0,39	22	2,63	0,20
10	1,80	0,29	23	2,47	0,23
11	1,99	0,28	24	2,56	0,27
12	1,78	0,29	25	2,38	0,21
13	1,78	0,28	26	0,99	0,33

Fonte: Autoria própria

Tabela 9 - Velocidade média e desvio na região inferior.

Região Inferior					
Ponto	Média (m/s)	Desvio (m/s)	Ponto	Média (m/s)	Desvio (m/s)
1	1,08	0,31	14	1,62	0,30
2	1,98	0,27	15	2,04	0,34
3	2,30	0,23	16	2,12	0,33
4	2,67	0,27	17	2,06	0,25
5	2,34	0,27	18	2,28	0,34
6	2,01	0,30	19	2,18	0,23
7	2,23	0,26	20	2,35	0,19
8	1,93	0,32	21	2,60	0,24
9	1,94	0,34	22	2,62	0,23
10	1,61	0,26	23	2,51	0,22
11	2,00	0,27	24	2,31	0,30
12	1,60	0,31	25	2,13	0,23
13	1,72	0,30	26	0,88	0,35

Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados dos mapeamentos realizados, nota-se um comportamento similar do perfil de velocidade em todos eles. Como dito anteriormente, as regiões do túnel de vento que possuem maior concentração de velocidade podem ser justificadas como uma abertura na vedação. Além disso, o fato do túnel possuir um pequeno comprimento total também influencia na variação de velocidade, pois para maiores comprimentos o escoamento tenderia a tornar-se desenvolvido, entretanto, não há espaço suficiente no local onde o equipamento foi construído para túneis de maiores dimensões.

Ademais, embora os perfis possuam regiões em que a velocidade aumenta de maneira tênue, esta variação não é suficiente para invalidar o equipamento para ensaios. O objetivo deste trabalho não é montar um túnel de vento cuja qualidade de escoamento seja idêntica a túneis de alta precisão os quais possuíram altos custos de projeto, e sim construir um túnel com qualidade de escoamento suficiente para ensaios de difusores e microgeradores.

O túnel de vento deste trabalho foi utilizado para ensaios de microgeradores e difusores no trabalho de Tanoue (2018), obtendo bons resultados em seus experimentos, concordando com outros trabalhos científicos que foram realizados em túneis de vento de alta precisão.

### 4.3 Visualização do Escoamento

A Figura 48 exibe as imagens obtidas com a técnica de visualização por injeção de fumaça.

Figura 48 – a) Vista superior do escoamento do ar na saída da colmeia de canudos. b) Vista lateral do escoamento do ar na saída da colmeia de canudos. c) Fluxo de ar após a colmeia de tubos PVC. d) Escoamento sobre um difusor.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria

As imagens da Figura 48 mostram que as colmeias foram eficientes para remoção de redemoinhos e velocidades transversais existentes no escoamento de um ventilador axial, havendo um refinamento ao passar pela colmeia de PVC e um maior refinamento através da colmeia de canudos plásticos, sendo nítido o escoamento sem altos níveis de turbulência e paralelo ao eixo do túnel na Figura 48 (a) e (b).

Embora não seja perfeitamente visível o escoamento completo da Figura 48 (d) por limitações da câmera utilizada, houve uma formação de vórtices na saída do difusor. Este comportamento do escoamento é condizente com a literatura e com a pesquisa de Ohya e Karasudani (2010), os quais estudaram o comportamento do escoamento de ar em um difusor com uma turbina acoplada em seu interior utilizando-se a técnica de injeção de fumaça.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo construir um túnel de vento de baixo custo do tipo soprador e de circuito aberto, a partir de um ventilador axial industrial, para ensaios de microgeradores e difusores de pequeno porte, contendo uma seção de teste aberta de 500 mm x 500 mm. Deve ser ressaltado que este ventilador não foi selecionado, tal como comumente ocorre nos projetos de túneis de vento, mas sim reaproveitado já que o equipamento se encontrava disponível e sem uso.

Em seguida, após a revisão bibliográfica sobre túneis de vento e reunido sugestões para o dimensionamento de seus componentes, foi realizado um levantamento sobre os possíveis materiais os quais poderiam ser utilizados para a construção do equipamento, objetivando sua construção a um menor custo possível. Os materiais escolhidos foram a madeira compensada para a estrutura do túnel compreendendo a câmara de estabilização e seção de contração, além de canudos plásticos e tubos PVC para uniformizar o escoamento proveniente do ventilador, por possuírem um preço mais acessível que os demais. Posteriormente, a configuração do túnel foi definida.

A forma como a colmeia na saída do túnel de vento foi construída também pode ter influência no perfil de velocidade, já que em sua montagem, por necessidade, duas paredes internas foram postas no centro da seção de saída, criando um efeito de barreira que reduzia a velocidade no centro da seção de testes. Isso pode ser minimizado substituindo os quatro módulos que suportam os canudos de plásticos por uma única seção sem as chapas de aço.

Tendo em vista que o túnel de vento será utilizado para ensaios de microgeradores e difusores, fez-se necessário a verificação da qualidade do escoamento, de modo que o equipamento tivesse seu comportamento o mais próximo possível de um túnel de vento profissional, através da quantificação do perfil de velocidade, utilizando um tubo de Pitot, e da visualização do escoamento por meio da injeção de fumaça. Os resultados obtidos foram satisfatórios, pois o perfil de velocidade tornou-se suficientemente uniforme, mesmo que ainda distante da uniformidade obtida por um túnel de vento profissional, possibilitando o ensaio dos dispositivos para os quais o túnel foi construído, o qual já foi utilizado por Tanoue (2018) em seus ensaios de difusores aplicados a microgeradores eólicos.

O custo total do projeto foi de R\$ 1594,70, já que a instrumentação se fez necessária para avaliar a eficiência do túnel de vento. O custo de construção apenas da estrutura do túnel de vento foi de R\$ 509,70. O custo de instrumentação, tal como o tubo de Pitot e demais dispositivos, além da máquina de fumaça foi de R\$ 1085,00. Este custo está muito abaixo dos

projetos de túneis de vento encontrados em outros trabalhos acadêmicos e no mercado, observando que este não possui a mesma eficiência. Ainda assim, se concluiu que com baixo custo e poucos recursos, se pode construir um túnel de vento que tenha comportamento similar a um túnel de vento profissional, sendo ainda possível ser aperfeiçoado.

Logo, todos os objetivos propostos neste trabalho foram alcançados, pois o túnel de vento foi construído a partir de materiais de baixo custo, reduzindo abruptamente o seu valor final. Ademais, o túnel também é totalmente funcional, pois opera em boas condições para ensaios de microgeradores e difusores.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

- Mapear o perfil de velocidade ao longo de toda a estrutura interna do túnel de vento, objetivando identificar a eficiência de cada componente na qualidade do escoamento.
- Testar variadas seções transversais de colmeias para verificar seus efeitos no escoamento.
- Projetar uma seção de testes fechada para verificar sua influência na qualidade do escoamento.

## REFERÊNCIAS

- ARIFUZZAMAN, M.; MASHUD, M. **Design construction and performance test of a low cost subsonic wind tunnel**. IOSR Journal of Engineering, v. 2, p. 83–92, 2012.
- 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**. NASA-CR-177488, Agosto, 1988.
- BLEIER, F. **FAN HANDBOOK, SELECTION APLICATION AND DESIGN**. Editora McGraw-Hill, 1 Ed., New York, 1997.
- BARBOSA, D. L. M. **Estudo do Comportamento Aerodinâmico de Difusores Cônicos Aplicados as Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará. Belém, 2013.
- BRADSHAW, P. **Experimental Fluid Mechanics**. Oxford, Pergamon Press. 2 Ed., New York: Macmillan, 1970.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. Editora Pearson Prentice Hall, 2 Ed, São Paulo, 2008.
- CATTAFESTA, L.; BAHR, C.; MATHEW, J. **Fundamentals of Wind-Tunnel Design**. Encyclopedia of Aerospace Engineering. Edited by Richard Blockley and Wei Shyy, John Wiley & Sons, Ltd., 2010.
- CHIESSI, J. L. B. **Desenvolvimento de um túnel de vento de baixa velocidade para aplicações acadêmicas**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Aeronáutica e Espaço). Universidade do Vale do Paraíba. São José dos Campos, 2006.
- COUTINHO, F. R. **Projeto de um túnel de vento subsônico do tipo soprador**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro (Escola politécnica). Rio de Janeiro, 2014.

ECKERT, W.T.; MORT, K.W.; JOPE, J. **Aerodynamic Design Guidelines and Computer Program for Estimation of Subsonic Wind Tunnel Performance**. NASA TN D-8243, 1976.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução a mecânica dos fluidos**. Editora LTC, 8 Ed., Rio de Janeiro, 2014.

HALL, N. **Wind tunnel index**. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/shortt.html>> Acesso em: 23 ago. 2018.

HEIDRICH, M. **Der Windkanal und ich: Von der Planung zum Prüfstand**. 2013. Disponível em: <<https://blog.daimler.com/2013/10/07/der-windkanal-und-ich-von-der-planung-zum-pruefstand/>> Acesso em: 06 ago. 2018.

HERNÁNDEZ, M. A. G.; LÓPEZ, A. I. M.; JARZABEK, A. A.; PERALES, J. M. P.; WU, Y.; XIAOXIAO, S. **Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel**. Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications. Dr. Noor Ahmed (Ed.), Capítulo 1, 2013.

HUI, H. **WIND TUNNELS AND WATER TUNNELS**. 2011. Disponível em: <<https://sciencedocbox.com/Physics/68040632-Lecture-3-wind-tunnels-and-water-tunnels.html>> Acesso em: 20 ago. 2018.

IDEL'CIK. I.E. **Memento des pertes de charge: Coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement**. Eyrolles Editeur, Paris, 1969.

INMETRO (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA). **Túnel de vento aerodinâmico – Especificações**. Laboratório de velocidade de fluidos, 2010.

IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS). **Conforto em bairros paulistanos**. 2009. Disponível em: <[http://www.ipt.br/noticias\\_interna.php?id\\_noticia=36](http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=36)> Acesso em: 06 ago. 2018.

LACERDA FILHO, A. F. L.; MELO, E. C. **Medição de vazão de ar**. Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, 2008.

LIMITECH. 2017. **ALUMINIUM HONEYCOMB CORE**. Disponível em: <<https://www.limitech.asia/aluminium-honeycomb-core/>> Acesso em: 23 ago. 2018.

MEHTA, R. D.; BRADSHAW, P. **Tecnical Notes: Design Rules for Small Low Speed Wind Tunnels**. The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society. Novembro, 1979.

MEHTA, R. D. **The Aerodynamic Design of Blower Tunnels with Wide-Angle Diffusers**. Vol. 18. Progress in Aerospace Sciences. p. 59-120, 1977.

NASA (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION). **What Are Wind Tunnels**. 2017. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-are-wind-tunnels-k4.html>> Acesso em: 20 ago. 2018.

NLR (NATIONAL AEROSPACE LABORATORY). **EMBRAER KC-390 - The Ultimate Wind Tunnel Test**. 2012. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=m-YXCC\\_9hEg](https://www.youtube.com/watch?v=m-YXCC_9hEg)> Acesso em: 06 ago. 2018.

NU.NL. 2018. Disponível em: <<https://www.nu.nl/weekend/5021201/red-bull-van-max-verstappen-in-2018-klaar-wereldtitel.html>> Acesso em: 20 ago. 2018.

OHYA, Y.; KARASUDANI, T. **A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-Lens Technology**. Journal Energies, v. 3, p. 634–649, 2010.

OLIVEIRA, R. P.; DALMOLIN, V.; HAUS, T. L. **Fabricação de um túnel de vento de circuito aberto para testes visuais em modelos geométricos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). FAE Centro universitário. Curitiba, 2015.

OTAM. **MANUAL TÉCNICO**. Soler & Palau, Ventilation Group. 2003.

PABÓN, N. Y. L. **Projeto e fabricação de um túnel de vento e caracterização térmica de um radiador automotivo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

PRANDI, J. 2013. **Maior túnel de vento do mundo**. Disponível em: <<https://gigantesdomundo.blogspot.com/2013/11/maior-tunel-de-vento-do-mundo.html>> Acesso em: 06 ago. 2018.

POLITERM. **Túnel aerodinâmico**. Disponível em: <<http://www.politerm.com.br/Produto-BANCADAS-DIDATICAS-Tunel-Aerodinamico-de-vento-Tunel-Aerodinamico-de-vento-marca-POLITERM-modelo-POL-1500TV-versao-188-205.aspx>> Acesso em: 20 ago. 2018.

PRANDTL, L. **Attaining a Steady Stream in Wind Tunnel**. NACA TM 726, Oct. 1933.

RISTIĆ, S. **Flow Visualisation Techniques in Wind Tunnels Part I – Non optical Methods**. Scientific Technical Review, Vol.LVII, No.1, 2007.

SANTOS JUNIOR, R. M. S. **Projeto e construção de um túnel de vento subsônico de circuito aberto**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Pará. Belém, 2015.

TANOUE, A. R. **ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM DIFUSOR CÔNICO APLICADO A UM MICROGERADOR EÓLICO**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Ciência e tecnologia com ênfase em tecnologia mecânica). Universidade Federal do Pará. Ananindeua, 2018.

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