

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Gustavo Schneider Borges**

**ESTUDO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO DO  
CAMPO DE VELOCIDADES NO TOPO DE UMA EDIFICAÇÃO  
PARA ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
EÓLICA**

Porto Alegre  
Janeiro de 2020

**GUSTAVO SCHNEIDER BORGES**

**ESTUDO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO DO  
CAMPO DE VELOCIDADES NO TOPO DE UMA EDIFICAÇÃO  
PARA ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
EÓLICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de  
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia  
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Acir Mércio Loredo-Souza**

Porto Alegre  
Janeiro de 2020

**GUSTAVO SCHNEIDER BORGES**

**ESTUDO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO DO  
CAMPO DE VELOCIDADES NO TOPO DE UMA EDIFICAÇÃO  
PARA ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
EÓLICA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo Professor Orientador e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, janeiro de 2020

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Acir Mércio Loredou-Souza (UFRGS)**  
Ph.D. pela University of Western Ontario, Canadá  
Orientador

**Prof. Gustavo Javier Zani Núñez (UFRGS)**  
D. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Eng. Mário Gustavo Klaus Oliveira**  
**(Vento-S Consultoria em Engenharia do Vento Ltda.)**  
D. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais e professores que me apoiaram ao longo desta jornada e permitiram a concretização de minha graduação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Acir Mércio Loredou-Souza, orientador deste trabalho, pelo auxílio e conhecimentos compartilhados para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a toda equipe do Laboratório de Aerodinâmica das Construções e da empresa Vento-S Consultoria em Engenharia do Vento, por contribuírem com o meu desenvolvimento profissional, com a realização deste trabalho e pela amizade construída.

Agradeço ao Governo Federal do Brasil por possibilitar a minha graduação na Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ter a honra de conhecer excelentes professores.

Agradeço à minha família, pelo carinho, apoio, confiança e suporte dados durante toda a minha Graduação.

Agradeço aos meus amigos, os antigos e os feitos durante o Curso de Graduação, pelos bons momentos e apoio durante toda a minha jornada.

Quando os ventos de mudança sopram, umas pessoas  
levantam barreiras, outras constroem moinhos de vento.

*Érico Veríssimo*

## RESUMO

**BORGES, G. S. Estudo experimental em túnel de vento do campo de velocidades no topo de uma edificação para análise do potencial de geração de energia eólica.**

Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

A energia elétrica tem cada vez mais importância na sociedade e o seu consumo cresce anualmente no Brasil e em diversos países, impulsionado pelas indústrias, comércio e mudança de hábitos, como a substituição de carros com motores a combustão por motores elétricos. O aumento do consumo demanda novas fontes de geração de energia que sejam sustentáveis e evitem a poluição atmosférica. A energia eólica apresenta grandes vantagens em relação às outras fontes, com pouco impacto ambiental e grande potencial de exploração, no entanto as soluções atuais demandam grandes áreas para a instalação dos aerogeradores, com os rotores em alturas aproximadas de 100 metros. Este trabalho visa explorar a geração de energia eólica em grandes centros urbanos, aproveitando a altura e/ou largura de prédios, medindo o campo de velocidade do vento na região próxima da fachada a barlavento e a cobertura de edificações, em diversos pontos longitudinais e alturas. Os valores de velocidade média do vento foram medidos através de ensaios no túnel de vento Professor Joaquim Blessmann utilizando uma edificação modelo, já construída, com vizinhança e topografia.

Palavras-chave: Geração eólica. Velocidade do vento. Perfil de velocidade do vento. Cobertura.

## **ABSTRACT**

**BORGES, G. S. Wind tunnel experimental study of the velocity field on top of a building for analysis of wind power generation potential.** Final term paper (Civil Engineering Graduation) – Civil Engineering department. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Electricity is increasingly important in society and its consumption grows annually in Brazil and several other countries, driven by industries, commerce and changing habits, such as the replacement of combustion engine cars by electric motors cars. The consumption increase demands new energy generation sources that are sustainable and avoid atmospheric pollution. Wind energy has great advantages over other sources, with little environmental impact and great exploitation potential, however current solutions require large areas for the installation of wind turbines, with rotors at heights of approximately 100 meters. The present work aims to explore wind energy generation in large urban areas, taking advantage of height and or width of buildings, measuring the wind velocity field next to the windward facade and the rooftop of buildings, at various longitudinal points and heights. Wind speed mean values were measured through tests at Joaquim Blessmann wind tunnel using a building model with vicinity buildings and topography.

Keywords: Wind energy generation. Wind speed. Wind speed profile. Rooftop.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Turbinas eólicas do Bahrain World Trade Center .....	22
Figura 2 - Turbinas instaladas no Aeroporto Internacional de Boston.....	23
Figura 3 - Rotor Savonius de eixo vertical .....	24
Figura 4 – escoamento do vento e rotor Savonius de eixo horizontal .....	24
Figura 5- Perfil de velocidades médias do vento.....	26
Figura 6- perfil vertical de velocidade média do vento de acordo com a rugosidade superficial .....	27
Figura 7- Planta baixa do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann .....	32
Figura 8 - Dispositivos de geração de perfil de velocidade para o expoente .....	34
Figura 9- Dispositivos de geração de perfil de velocidade para o expoente .....	35
Figura 10- Dispositivos de geração de perfil de velocidade para o expoente .....	35
Figura 11- Perfil de velocidade média, intensidade e escala da componente longitudinal da turbulência de duas seções de ensaio do túnel Prof. Joaquim Blessmann .....	36
Figura 12- escoamento de ar bidimensional sobre uma edificação com arestas vivas .....	37
Figura 13- Descrição qualitativa da velocidade do vento em escoamento bidimensional no topo de uma edificação com arestas vivas.....	38
Figura 14 - Modelo da edificação em escala reduzida .....	40
Figura 15 - Incidência do vento em relação à fachada .....	41
Figura 16 - Representação dos eixos e cotas em vista superior e de perfil .....	42
Figura 17 - Detalhe do fio-aquecido, medidas em mm .....	42
Figura 18 - suporte e sensor de fio aquecido .....	43
Figura 19- Posicionamento da sonda de fio aquecido .....	43

Figura 20 - Posicionamento dos pontos de medição .....	46
Figura 21 - Áreas de influência para 180° em 7 Hz e 10 Hz.....	49
Figura 22 - Áreas de influência para 180° em 13 Hz .....	50
Figura 23 - Áreas de influência para 225° em 7 Hz e 10 Hz.....	54
Figura 24 - Área de influência para 225° em 13 Hz.....	54
Figura 25 - Áreas de influência para 270° em 7 Hz e 10 Hz.....	58
Figura 26 - Áreas de influência para 270° em 13 Hz .....	59
Figura 27 - Áreas de influência para 315° em 7 Hz e 10 Hz.....	63
Figura 28 - Áreas de influência para 315° em 13 Hz .....	63
Figura 29- Vista superior da edificação com a definição dos eixos .....	69
Figura 30 - Vista lateral da edificação e representação dos pontos de medição .....	69
Figura 31 - Mesa na posição 180° e detalhes à barlavento.....	71
Figura 32 - Tubo de Pitot e mesa ao fundo na posição 180° .....	71
Figura 33 - Mesa na posição 225° .....	72
Figura 34 - Mesa na posição 270° .....	72
Figura 35 - Mesa na posição 315° .....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados obtidos no ensaio de 180° .....	47
Tabela 2 - Dados obtidos no ensaio de 180° .....	47
Tabela 3 - Dados obtidos no ensaio de 180° .....	48
Tabela 4 - Valores normalizados para o ensaio de 180° .....	48
Tabela 5 - Valores da intensidade normalizada da turbulência para 180° .....	49
Tabela 6 - Valores médios da intensidade da turbulência para 180° .....	50
Tabela 7 - Dados obtidos no ensaio para 225° .....	51
Tabela 8 - Dados obtidos no ensaio para 225° .....	52
Tabela 9 - Dados obtidos no ensaio para 225° .....	52
Tabela 10 - Valores normalizados para o ensaio de 225° .....	53
Tabela 11 - Valores da intensidade normalizada da turbulência para 225° .....	53
Tabela 12 - Valores médios da intensidade da turbulência para 225° .....	55
Tabela 13 - Dados obtidos no ensaio para 270° .....	56
Tabela 14 - Dados obtidos no ensaio para 270° .....	56
Tabela 15 - Dados obtidos no ensaio para 270° .....	57
Tabela 16 - Valores normalizados para o ensaio de 270° .....	57
Tabela 17 - Valores da intensidade normalizada da turbulência para 270° .....	58
Tabela 18 - Valores médios da intensidade da turbulência para 270° .....	59
Tabela 19 - Dados obtidos no ensaio para 315° .....	60
Tabela 20 - Dados obtidos no ensaio para 315° .....	61
Tabela 21 - Dados obtidos no ensaio para 315° .....	61

Tabela 22 - Valores normalizados para o ensaio de 315° .....	62
Tabela 23 - Valores da intensidade normalizada da turbulência para 315° .....	62
Tabela 24 - Valores médios da intensidade da turbulência para 315° .....	64

## **LISTA DE SIGLAS**

NBR – Norma Brasileira

LAC – Laboratório de Aerodinâmica das Construções

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

HP – *Horsepower*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

## LISTA DE SÍMBOLOS

TWh – Terawatt-hora

a.a. – ao ano

U – velocidade do vento

$U_{ref}$  – velocidade do vento à altura referência

z – altura

$z_d$  – altura da subcamada sobre a superfície

$z_{ref}$  – altura de referência

$z_0$  – rugosidade aerodinâmica

$V(z)$  – velocidade do vento na altura z

$\bar{V}(z)$  = velocidade média do vento à altura desejada

$\bar{V}(z_{ref})$  = velocidade média do vento em uma altura de referência

p = expoente que representa o tipo de terreno

$V_{rms}$  = desvio padrão das flutuações da velocidade do vento em um ponto de cota z'

Iu – intensidade normalizada da turbulência [%]

Lu = escala da componente longitudinal da turbulência [mm]

$u_*$  = velocidade de corte [m/s]

$\kappa$  = constante de Von Kàrman

$p_0$  = pressão de estagnação no tubo de Pitot

p = pressão estática no tubo de Pitot

$\rho$  = densidade do ar

$p_{abs}$  = pressão absoluta

$R_{\text{específico}}$  = constante específica do gás para o ar seco

$T$  = temperatura ambiente em Kelvin

$\alpha$  = ângulo de incidência do vento em graus

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA.....</b>	<b>18</b>
2.1 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	18
<b>2.1.1 Objetivo principal.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.2 Objetivo secundário.....</b>	<b>18</b>
2.2 PRESSUPOSTO.....	18
2.3 PREMISSE.....	18
2.4 DELIMITAÇÕES.....	19
2.5 LIMITAÇÕES.....	19
2.6 DELINEAMENTO.....	19
<b>3 HISTÓRICO.....</b>	<b>21</b>
<b>4 CARACTERÍSTICAS DO VENTO NATURAL E ESCOAMENTO SOBRE EDIFICAÇÕES.....</b>	<b>25</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS DO VENTO NATURAL .....	25
<b>4.1.1 Perfil de velocidades médias do vento.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1.2 escoamento turbulento .....</b>	<b>29</b>
<b>4.1.3 Simulação do vento natural .....</b>	<b>29</b>
<b>4.1.4 Sobre o túnel de vento prof. Joaquim Blessmann .....</b>	<b>31</b>
4.2 ESCOAMENTO SOBRE EDIFICAÇÕES.....	36
<b>5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>39</b>
5.1 MODELO E CARACTERÍSTICAS DA VIZINHANÇA .....	39
5.2 VENTO SIMULADO E MEDIÇÃO .....	40
<b>6 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>45</b>
6.1 ÂNGULO DE INCIDÊNCIA 180° .....	46
6.2 ÂNGULO DE INCIDÊNCIA 225° .....	51
6.3 ÂNGULO DE INCIDÊNCIA 270° .....	55
6.4 ÂNGULO DE INCIDÊNCIA 315° .....	60
<b>7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXO A – Identificação dos pontos de medição no modelo.....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXO B – Fotografias do modelo reduzido no túnel de vento .....</b>	<b>70</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica tornou-se imprescindível para o desenvolvimento humano, tendo importância na produção de todos os setores da economia e aumentando a qualidade de vida da população. No entanto, o seu uso criou uma forte dependência de toda a sociedade, com o consumo global aumentando todos os anos e com interrupções no fornecimento de energia elétrica podendo causar grandes prejuízos, o que demandou novas fontes de geração de energia, preferivelmente sustentáveis e com pouco impacto ambiental.

No Brasil, segundo a ANEEL, em 2019 a energia eólica já representa 9 % do total da capacidade de geração de energia elétrica do país e possui tendência de aumentar a participação com os novos empreendimentos na área e potencial de geração do país. Essa energia é em maior parte, gerada em parques eólicos distantes dos centros urbanos.

Grandes centros urbanos ainda não apresentam uma solução de geração eólica com alto rendimento, mesmo com grandes edificações, seja pela altura e/ou extensão das mesmas. Com vistas a contribuir para o estudo da viabilidade do emprego de dispositivos de geração de energia eólica em centros urbanos, é realizado um estudo experimental em túnel de vento do campo de velocidades na região próxima de uma aresta do topo de uma edificação construída na cidade de São Paulo, SP.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para o desenvolvimento do trabalho são descritas nos itens a seguir.

### **2.1 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

#### **2.1.1 Objetivo principal**

O objetivo principal do trabalho é a medição do campo de velocidades em uma região em torno de uma aresta no topo de uma edificação para estudo da viabilidade da instalação de micro ou minigeradores eólicos.

#### **2.1.2 Objetivo secundário**

O objetivo secundário do trabalho é a análise qualitativa da viabilidade de geração eólica no topo de edificações, aproveitando a eventual aceleração da velocidade do vento na região investigada.

### **2.2 PRESSUPOSTO**

O trabalho tem por pressuposto que os dados obtidos em ensaios realizados em túnel de vento fornecem valores próximos da realidade.

### **2.3 PREMISSA**

O trabalho tem por premissa que as características do escoamento no topo de prédios altos apresentam potencial para geração de energia eólica através de micro ou minigeradores instalados em pontos estratégicos.

## 2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à utilização de resultados de ensaios de um modelo de edificação real, com formato paralelepípedo similar ao de diversas edificações, realizados no Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## 2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) os ensaios foram realizados em apenas um modelo em escala reduzida;
- b) para a obtenção de dados de ensaio, foi utilizada uma sonda de fio quente e um tubo de Pitot;
- c) os ângulos de incidência do vento sobre as edificações foram de  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$  e  $315^\circ$  para analisar o vento perpendicular, paralelo e com ângulo obtuso à fachada.

## 2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado seguindo as etapas apresentadas a seguir e descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) obtenção dos valores de velocidades de ensaios em túnel de vento para a edificação em estudo;
- c) normalização dos valores de velocidade nos pontos predefinidos utilizando como referência a velocidade medida na cota correspondente ao topo da edificação, no escoamento não perturbado pela vizinhança imediata.
- d) considerações finais.

Primeiramente, foi realizada a **pesquisa bibliográfica** para possibilitar embasamento e conhecimento no assunto a ser estudado. Para tal, foram utilizados artigos científicos, trabalhos de conclusão de curso, teses, dissertações, normas brasileiras vigentes e especialmente, obras de autoria do Prof. Joaquim Blessmann, as quais são referências técnicas na área de engenharia do vento e fundamentais para conhecimento do túnel de vento do LAC.

Em sequência, foram realizados ensaios no Laboratório de Aerodinâmica das Construções para **obtenção dos valores de velocidades de ensaios em túnel de vento para a edificação em estudo**, através de uma sonda de fio quente para medição da velocidade instantânea durante 60 segundos com frequência de 1024 Hz e cálculo posterior da média das velocidades nos pontos de interesse e um tubo de Pitot para medição das velocidades médias em um ponto referencial.

Com os valores das velocidades conhecidos, foi possível gerar gráficos e tabelas para melhor visualização do potencial de geração. Para facilitar a análise, foi realizada a **normalização dos valores de velocidade nos pontos predefinidos utilizando como referência a velocidade medida na cota correspondente ao topo da edificação, no escoamento não perturbado pela vizinhança imediata**.

Por fim, foram realizadas as **considerações finais**, com uma análise de todo o trabalho e suas contribuições para a geração de energia eólica.

### 3 HISTÓRICO

Antigamente a energia produzida pela sociedade era em sua quase totalidade oriunda de fontes tradicionais de biomassa (queima de madeira e matérias orgânicas). Em meados dos anos 1800, durante a Primeira Revolução Industrial, o carvão começou a ser utilizado na indústria e durante a Segunda Revolução Industrial, nos anos 1870, o petróleo começou a ser utilizado como fonte de energia, seguido pelo gás natural e hidrelétricas nos anos 1900. Na metade do Século XX, as fontes de energia eram bem diversificadas, mas apenas nos anos 1980 que as fontes renováveis (solar, eólica...) começaram a ser exploradas (SMIL, 2016).

Comparando os dados históricos fornecidos por Smil (2016) e a publicação do grupo BP P.L.C. (2019), em 2015 o mundo consumiu 146000 Terawatt-hora (TWh) de energia primária, valor esse 25 vezes maior do que no ano 1800. Também foi constatado na publicação do grupo BP P.L.C. (2019) que em 2018 a demanda por energia teve um aumento anual de 2,9%, sendo esse valor quase o dobro da média de aumento de consumo dos últimos 10 anos (1,5%), o que se estima ter acarretado em um aumento de 2% na emissão de dióxido de carbono.

O primeiro registro de consumo de energia eólica segundo o grupo BP P.L.C. (2019) foi no ano de 1985 e o primeiro TWh de consumo foi registrado no ano de 1989. No ano de 2017 foram consumidos 1122,75 TWh de energia proveniente de fontes eólicas, valor que representa 0,73% do total consumido no mundo. Embora a geração de energia através de fontes eólicas apresente o maior crescimento de geração anual, em média 13% a.a., a taxa de participação na geração global pouco tem mudado, uma vez que os valores brutos de consumo crescem mais e outras fontes são utilizadas para suprir essa demanda.

Segundo Wilson (2009), durante os anos 1980 surgiram as primeiras fazendas eólicas, agregando diversos aerogeradores em um mesmo local, o que diminuiu custos com manutenção e a distribuição para a rede foi facilitada. Ainda segundo o autor, existe uma nova tendência em andamento: a instalação de turbinas eólicas no topo de edificações ou a integração das turbinas com as edificações de outra maneira.

A instalação de turbinas no topo de edificações é coerente, uma vez que a velocidade do vento aumenta com altura, pois o vento sofre menos interferência dos obstáculos do terreno. Aproveitar edificações de grande altura pode ser uma vantagem, sem a necessidade de uma torre para apenas sustentar a turbina eólica.

Segundo Wilson (2009) existem algumas soluções adotadas para grandes edificações na fase de projeto, alterando a geometria da edificação de maneira a aproveitar melhor o escoamento do vento e aumentar a performance das turbinas, como espaços para afunilamento do vento em direção às turbinas. Ainda segundo o autor, alguns fabricantes de soluções de turbinas integradas com a edificação estão aproveitando a velocidade maior do vento próximo de parapeitos. Na Figura 1 consta um exemplo de solução adotada para integrar as turbinas com a edificação.

Figura 1 - Turbinas eólicas do Bahrain World Trade Center



(fonte: <https://www.buildinggreen.com/feature/folly-building-integrated-wind>)

Wilson (2009) também destaca a possibilidade da utilização de turbinas como elemento arquitetônico, demonstrando comprometimento com o meio ambiente e ainda possibilitando economia para a edificação, como foi realizado no Aeroporto Internacional de Boston, como consta na Figura 2.

Figura 2 - Turbinas instaladas no Aeroporto Internacional de Boston



(fonte: <https://ecofriend.com/greenest-airports-world.html>)

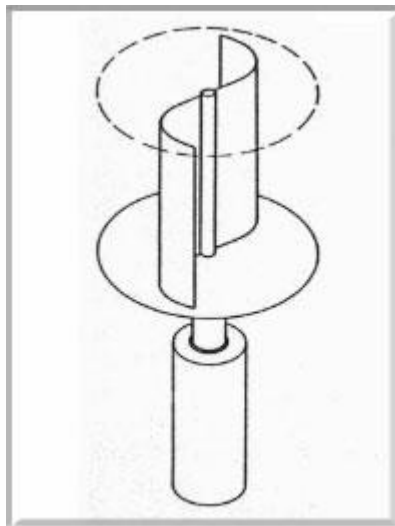
Segundo Stathopoulos e Alrawashdeh (2019) nos últimos anos aumentou o interesse em utilizar turbinas de vento de pequena escala em ambientes urbanos, uma vez que a energia produzida pode ser utilizada pelos próprios prédios. Algumas estratégias para a utilização dessas turbinas são: (1) adequação de turbinas de vento em edificações existentes; (2) integração das turbinas de vento com o formato arquitetônico durante o projeto; e (3) posicionando turbinas de vento independentes em locais públicos.

Ainda segundo Stathopoulos e Alrawashdeh (2019) a energia gerada por um sistema eólico é principalmente afetada por três características do vento: turbulência, velocidade e direção do vento. Devido à natureza estocástica do vento, essas características variam com o tempo e localização. Por isso é essencial entender as potenciais influências dessas características para implementar os sistemas eólicos e sugerir melhorias práticas para: (1) o projeto mecânico e aerodinâmico dos componentes das turbinas; e (2) a característica do vento a barlavento para melhorar o desempenho dos sistemas de energia em potencial. Este trabalho tem como foco entender e sugerir melhorias para o item (2) deste parágrafo.

Segundo Saha, Thotla e Maity (2008) os rotores do tipo Savonius de eixo vertical apresentam baixa conversão de energia elétrica, baixo torque de partida e atingem eficiência máxima de conversão de 31 %, ideais para pequenas unidades consumidoras, pois são baratos e possibilitam a difusão de seu uso. O rotor está representado pela Figura 3.

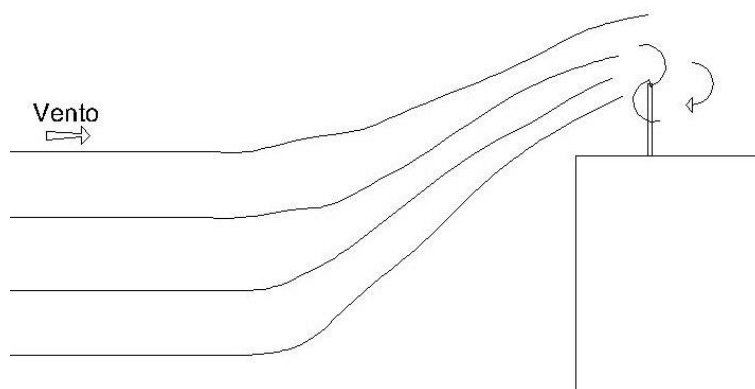
Existem poucos dados para rotores Savonius de eixo horizontal para geração eólica, o qual foi pensado para utilização logo acima da fachada, aproveitando o escoamento sobre a cobertura de uma edificação, conforme Figura 4.

Figura 3 - Rotor Savonius de eixo vertical



(fonte: <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/savonius-wind-turbines/>)

Figura 4 – Escoamento do vento e rotor Savonius de eixo horizontal



(fonte: própria do autor)



## **4 CARACTERÍSTICAS DO VENTO NATURAL E ESCOAMENTO SOBRE EDIFICAÇÕES**

O ar que flui sobre a superfície terrestre tem a sua velocidade média reduzida e turbulência aumentada pela rugosidade da superfície. Com o aumento da altura em relação ao terreno, o efeito do atrito causado pela rugosidade é reduzido até uma altura onde a influência é nula. Essa altura é definida como altura gradiente e a camada de ar abaixo dela é referida como camada limite atmosférica.

### **4.1 CARACTERÍSTICAS DO VENTO NATURAL**

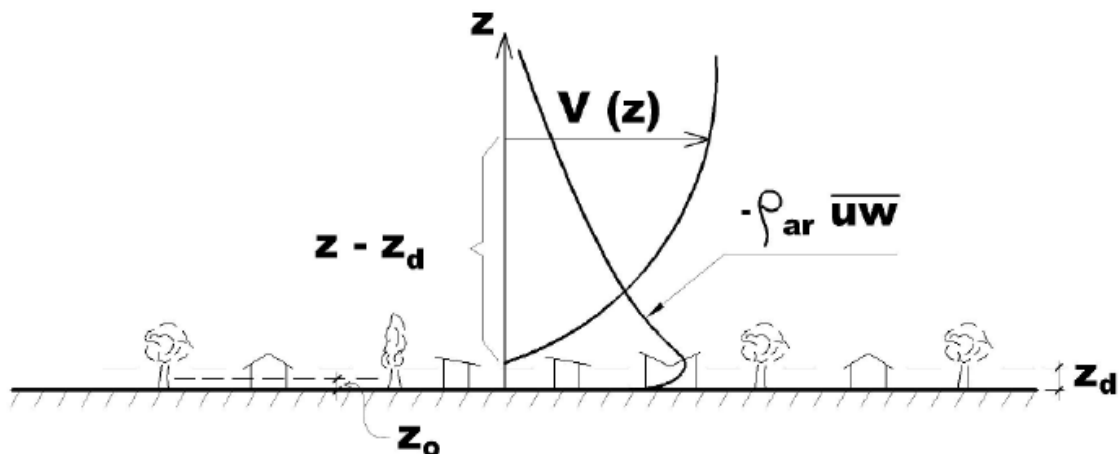
#### **4.1.1 Perfil de velocidades médias do vento**

O perfil de velocidades médias é explicado por Blessmann (2013, p. 52):

Na camada limite atmosférica velocidade média do vento varia desde zero, junto à superfície terrestre, até a velocidade gradiente, na altura gradiente. Quando maior a rugosidade do solo e mais importantes em número e dimensões os grandes obstáculos (árvores, morros, edifícios, torres, etc.), maiores serão a agitação do ar, o intercâmbio turbulento de quantidade de movimento e a altura interessada neste processo. Consequentemente, a altura gradiente será maior em uma cidade do que em campo aberto, por exemplo.

Segundo Loredou-souza et al. (2004, p. 137), o perfil de velocidades médias do vento é representado pela variação da velocidade do ar em função da altura, conforme representado pela Figura 5.

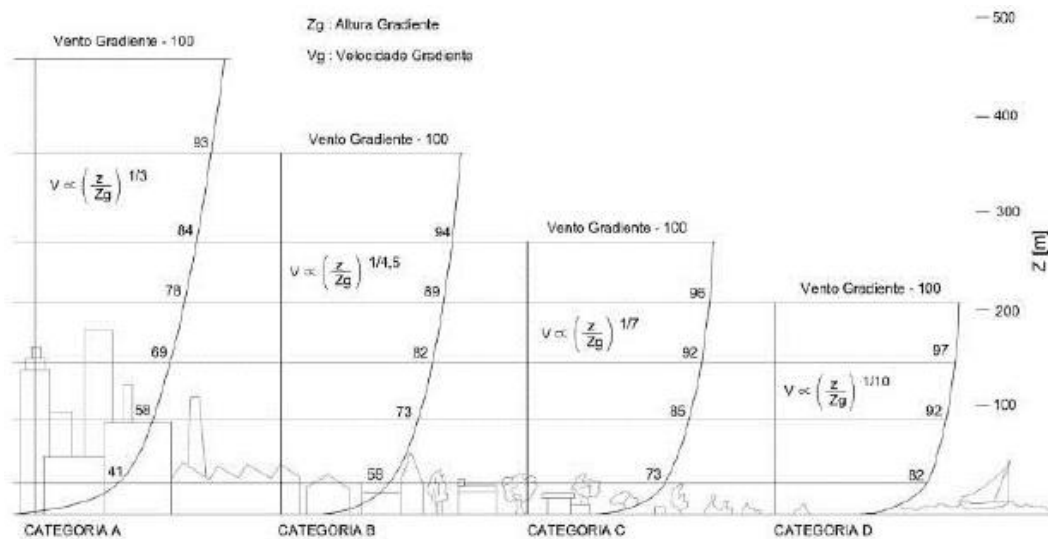
Figura 5- Perfil de velocidades médias do vento



(fonte: LOREDO-SOUZA et al., 2004, p.138)

Ainda segundo Loredo-souza et al. (2004, p. 138) pode-se identificar uma fina subcamada junto à superfície terrestre dentro da camada limite atmosférica, que corresponde à altura média dos obstáculos, chamada de “deslocamento do plano-zero” e notada por  $z_d$  (Figura 5). Para locais com baixa rugosidade superficial, como campos abertos e mar, o valor de  $z_d$  não é significativo. Em locais de alta rugosidade superficial, como cidades e subúrbios, o vento tende a passar por cima dos edifícios e vegetação, estabelecendo regiões de estagnação entre eles. O perfil vertical de velocidade média de acordo com a rugosidade superficial é representado na Figura 6.

Figura 6- perfil vertical de velocidade média do vento de acordo com a rugosidade superficial



(fonte: NÚÑEZ; LOREDO-SOUZA; ROCHA, 2012, p. 14)

De acordo com Loredo-souza et al. (2004, p. 139) “existem basicamente duas formas de perfis de velocidades médias utilizados na área de engenharia de Vento: o perfil em lei de potência e o perfil logarítmico.”

#### 4.1.1.1 Perfil de velocidades médias em Lei de Potência

A forma geral do perfil de velocidades médias do vento em lei de potência é dada pela fórmula 1 a seguir (LOREDO-SOUZA et al., 2004, p. 139):

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}(z_{ref})} = \left(\frac{z - z_d}{z_{ref}}\right)^p \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

$\bar{V}(z)$  = velocidade do vento à altura desejada [m/s];

$\bar{V}(z_{ref})$  = velocidade média do vento em uma altura de referência [m/s];

$z$  = altura desejada [m];

$z_d$  = altura da subcamada sobre a superfície [m];

$z_{ref}$  = altura de referência [m];

$p$  = expoente que representa o tipo de terreno [adim.].

Segundo Loredo-souza et al. (2004) o expoente  $p$  é caracterizado pelo tipo de terreno, o qual varia entre 0,11, para superfícies lisas como mar e lagos, e 0,34, para cidades com grande densidade de edificações altas.

Ainda segundo Loredo-souza et al. (2004) essa lei é amplamente utilizada visto que representa bem o perfil médio de velocidades, no entanto não apresenta justificativa teórica e por ser válida para quaisquer valores de  $(z - z_d)$  positivos ou nulos, essa equação não reconhece a altura gradiente, aumentando a velocidade do vento indefinidamente com a altura. A fórmula também apresenta um bom ajuste na camada de Ekman, exceto próximo à superfície onde esse ajuste é impreciso. Todavia esse problema pode ser facilmente resolvido com técnicas adequadas em túneis de vento de camada limite.

#### 4.1.1.2 Perfil de velocidades médias em Lei Logarítmica

O perfil de velocidades médias em Lei Logarítmica é dado pela fórmula 2 a seguir (LOREDO-SOUZA et al., 2004, p. 139):

$$\frac{\bar{V}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z - z_d}{z_o} \right) \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

$\bar{V}(z)$  = velocidade média do vento na altura de interesse [m/s];

$u_*$  = velocidade de corte [m/s];

$\kappa$  = constante de Von Kàrman,  $\kappa \cong 0,4$  [adim];

$z$  = altura de interesse [m];

$z_d$  = altura da subcamada sobre a superfície [m];

$z_0$  = rugosidade aerodinâmica [m].

Por apresentar parâmetros que dependem das características físicas do terreno e do vento, essa lei apresenta um bom ajuste na camada próxima ao solo, mas o ajuste é ruim na região superior à camada limite atmosférica. A lei logarítmica apresenta algumas vantagens em relação à lei potencial, sendo a primeira a utilização de um fator de escala, representado por  $z_0$ , a segunda é que a lei é derivada da teoria. Porém, também não é possível representar a transição do perfil de velocidades entre duas rugosidades.

#### 4.1.2 Escoamento turbulento

O escoamento turbulento apresenta flutuações de velocidade e segundo Petry (2002) os escoamentos turbulentos são caracterizados usualmente por elevados número de Reynolds e apresentam um comportamento coerente nas grandes escalas e aleatório nas menores escalas, sendo ainda tridimensional e transiente.

Uma medida adimensional da energia cinética contida nas componentes das flutuações da velocidade é a intensidade normalizada da turbulência, definida pelo quociente entre o desvio padrão das flutuações e uma velocidade de referência, conforme a fórmula 3.

$$I_u = \frac{V_{rms}}{V_m} \quad (\text{fórmula 3})$$

De acordo com a IEC (2013) o valor máximo aceitável da intensidade de turbulência é de 18 % para a instalação de pequenos rotores, pois valores mais altos de turbulência diminuem a performance de conversão de energia e a vida útil do rotor.

#### 4.1.3 Simulação do vento natural

Segundo Blessmann (2011) as primeiras tentativas de simulação do vento ocorreram no final do século XIX em pequenas câmaras de ensaios estudando modelos de formas geométricas simples. Entretanto, com o avanço da engenharia aeronáutica, foram

desenvolvidos os túneis aerodinâmicos, os quais buscam simular uma atmosfera calma e sem turbulência, com relação comprimento/altura geralmente em torno de dois.

Por serem os únicos túneis disponíveis durante grande período do século XX, muitos ensaios com modelos de construções civis foram realizados nestes túneis, embora em alguns casos esses resultados afastam-se bastante dos reais, visto que a turbulência não era representada.

Segundo Jensen e Frank (apud BLESSMANN, 2011, p. 110) para se obter uma simulação do vento natural precisa, deve-se cobrir um comprimento considerável do piso do túnel de vento com um material de rugosidade adequada, o qual simula a fonte de turbulência na atmosfera a baixa altitude. Além disso, Blessmann (2011) complementa que os túneis devem apresentar uma grande relação comprimento/altura para permitir a geração da turbulência e a correta formação do perfil de velocidades do vento.

Outra maneira de simular uma ou mais características do vento natural consiste na utilização de obstáculos colocados bem a barlavento do modelo a ser ensaiado, geralmente no início da câmara de ensaios. Blessmann (2011) cita alguns dos dispositivos utilizados e a característica natural do vento resultante:

- a) telas curvas ou telas planas de malha variável: perfil de velocidades médias e turbulência fina;
- b) grelhas de barras horizontais de seção retangular ou circular, variando o espaçamento e/ou espessura: perfil de velocidades médias e turbulência média;
- c) grelhas de malha quadrada ou retangular, constituídas de barras de se seção retangular: turbulência superposta a uma corrente de ar aproximadamente uniforme;
- d) grelha única de malha variável ou diversas grelhas superpostas: perfil de velocidades médias e turbulência;
- e) tela uniforme: turbulência fina superposta a uma corrente de ar uniforme;
- f) barras finas metálicas de seção circular, variando o diâmetro e/ou o espaçamento: perfil de velocidades médias e turbulência fina;
- g) triângulos de diversas dimensões e proporções, cheios ou vazados, de lados retos ou curvos: perfil de velocidades médias e turbulência.

Blessmann (2011) também explica uma terceira técnica puramente aerodinâmica, sem a utilização de obstáculos sólidos, que consiste em jatos de ar lançados perpendicularmente

ao vento gerado no túnel, a partir de seu piso. Essa técnica apresenta a vantagem de não diminuir a velocidade média da corrente de ar e de facilitar o controle das características do vento através da vazão de ar nos jatos.

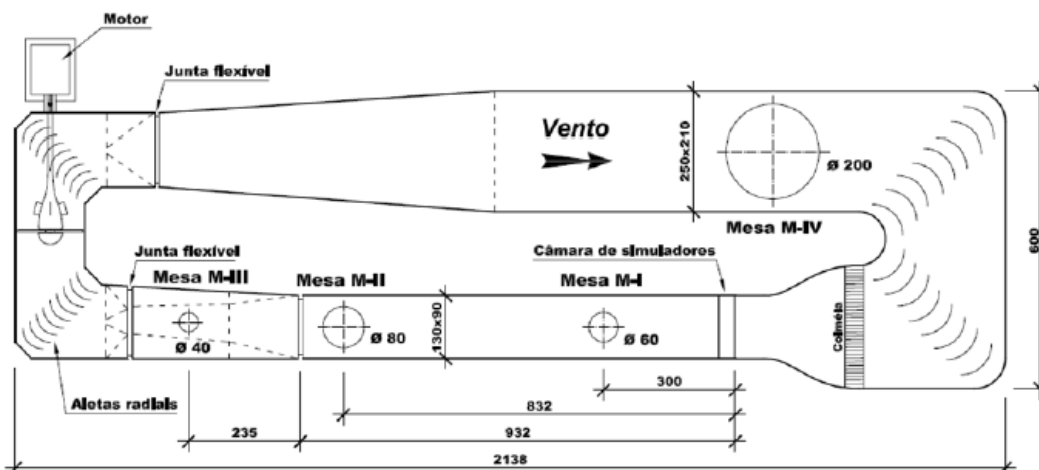
#### **4.1.4 Sobre o túnel de vento prof. Joaquim Blessmann**

O túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da UFRGS é pioneiro na América Latina, estando em operação desde 1977, pois se trata de um túnel de vento de circuito fechado projetado especificamente para ensaios de modelos de construções civis. Este túnel permite simular as principais características de ventos naturais, simulando a camada limite atmosférica e reproduzindo a turbulência através de dispositivos instalados ao longo do túnel de vento, como por exemplo, para a simulação de ventos de média turbulência, instalam-se pequenos blocos de madeira no piso do túnel a barlavento do modelo ensaiado, para simular a interferência de edificações e vegetações no escoamento.

O túnel apresenta uma seção de altas velocidades com relação comprimento/altura da câmara principal de ensaios de 10,3, e dimensões de 1,30 m x 0,90 m x 9,32 m (largura x altura x comprimento). A velocidade do escoamento de ar nessa câmara, com vento uniforme e suave, sem modelos e dispositivos, ultrapassa os 46 m/s. O vento é gerado através de hélices acionadas por um motor elétrico de 100 HP, o qual é controlado por um inversor de frequência.

O túnel de vento dispõe de quatro câmaras de ensaio, destas, três com mesas giratórias para fixação dos modelos e ensaios com diferentes ângulos de incidência do vento. Cada câmara possui suas aplicações específicas, de acordo com a edificação em estudo e tipo de escoamento desejado. A Figura 7 apresenta a planta baixa do túnel de vento, identificando as quatro câmaras de ensaio, nomeadas M-I, M-II, M-III e M-IV, o motor, a colmeia, e as dimensões em centímetros.

Figura 7- Planta baixa do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann



(fonte: NÚÑEZ; LOREDO-SOUZA; ROCHA, 2012, p. 14)

A mesa M-I é utilizada para ensaios do tipo aeronáutico com modelos próximos ao piso do túnel, pois a camada limite apresenta pequena espessura e escoamento de baixa turbulência. Também são realizados ensaios de modelos de formas geométricas simples em modelos bi ou tridimensionais (BLESSMANN, 2011).

A mesa M-II é utilizada para ensaios de tipo aeronáutico no eixo do túnel e ensaios para a construção civil, podendo ser utilizados dispositivos, já descritos, para a geração de turbulência, posicionados no piso do túnel e/ou na câmara de simuladores. É a câmara mais utilizada para o ensaio de modelos da construção civil, visto que nessa posição, a velocidade de escoamento chega no seu valor máximo e com a camada limite bem definida (BLESSMANN, 2011).

Situada no primeiro divergente do túnel, a mesa M-III apresenta grande rigidez. Essa mesa foi especificamente construída para estudos dinâmicos em estruturas de grande alteamento, como chaminés, pilares de viadutos, torres de televisão, etc. Por apresentar uma seção maior em relação à M-I e M-II, a velocidade máxima do vento é de aproximadamente 29 m/s (BLESSMANN, 2011).

A mesa M-IV se encontra no retorno do túnel, onde a seção transversal mede 250 cm de largura e 210 cm de altura e a velocidade do vento atinge 9 m/s. Essa seção é utilizada para ensaios de dissipação de fumaça e gases industriais, influência da topografia sobre os ventos, efeito de interação, modelos de pontes, etc. (BLESSMANN, 2011)



As atividades que podem ser realizadas no túnel de vento da UFRGS foram enunciadas por Blessmann (2011, p. 117-118):

Entre as pesquisas puras e aplicadas que podem ser desenvolvidas no túnel de vento TV-2, citamos:

- a) simulação de ventos naturais;
- b) efeitos estáticos e dinâmicos do vento em estruturas, paredes, telhados, esquadrias, vidros e painéis de revestimento em geral;
- c) efeitos sobre transeuntes, veículos e plantas (velocidade excessiva e turbulência);
- d) efeitos sobre usuários das edificações (vibrações, ruídos, infiltração de água e pó);
- e) poluição.

Ou, mais detalhadamente:

- a) simulação de ventos naturais: estudo de suas características, tais como: perfil de velocidades médias, intensidade, micro e macroescala da turbulência, espectros de potência, auto correlação e correlação cruzada;
- b) estudo de características de camadas limites em geral: perfil de velocidades médias, espessuras, tensões de Reynolds, características da turbulência, etc.;
- c) ensaios estáticos e dinâmicos de modelos reduzidos de edificações, tais como: pavilhões industriais, igrejas, salões, hangares, residências isoladas ou em conjuntos, edifícios, marquises, pontes, pilares de viadutos, torres de refrigeração;
- d) torres de linha de transmissão de energia elétrica, torres e antenas para radar e micro-ondas, chaminés, guindastes, pórticos de manobras de barragens, etc.;
- e) estudo das alterações causadas por edificações sobre os ventos próximo à superfície (conforto de pedestres, esforço em veículos, etc.);
- f) estudos de visualização do fluxo em torno de edificações;
- g) estudos de ventilação interna;
- h) estudos de dispersão de gases e resíduos sólidos na atmosfera: localização de indústrias, dissipação de descargas de chaminés residenciais e industriais, etc.;
- i) estudo de quebra-ventos para evitar os efeitos nocivos de ventos sobre pessoas, veículos, mercadorias em depósitos abertos, etc.;
- j) ensaios estáticos e dinâmicos em placas de sinalização de estradas, postes e luminárias, quadros de propaganda, etc.;
- h) ensaios em modelos de veículo, tanto para verificar os esforços causados pelo vento como para determinação da resistência ao avanço;

- l) estudos hidráulicos por via aerodinâmicos;
- m) pesquisa básica sobre formas geométricas simples: instabilidade aerodinâmica, pressões flutuantes, características de esteiras, pontos de deslocamento, etc.

Nas simulações no túnel de vento do LAC, usualmente somente a parte mais baixa da camada limite atmosférica é simulada. Até o momento, já foram simulados ventos com perfis de velocidade média com expoente  $p$  da lei de potência (fórmula 1) variando entre 0,11 e 0,36 (LOREDO-SOUZA; SCHETTINI; PALUCH, 2004).

Os expoentes mais utilizados no túnel de vento em relação com as categorias de rugosidade do terreno segundo a NBR 6123/1988 são descritos a seguir:

- a) expoente  $p = 0,11$  corresponde a terrenos com rugosidade da categoria I da NBR 6123/1988;
- b) expoente  $p = 0,23$  corresponde a terrenos com rugosidade da categoria III e IV da NBR 6123/1988;
- c) expoente  $p = 0,34$  corresponde a terrenos com rugosidade da categoria V da NBR 6123/1988.

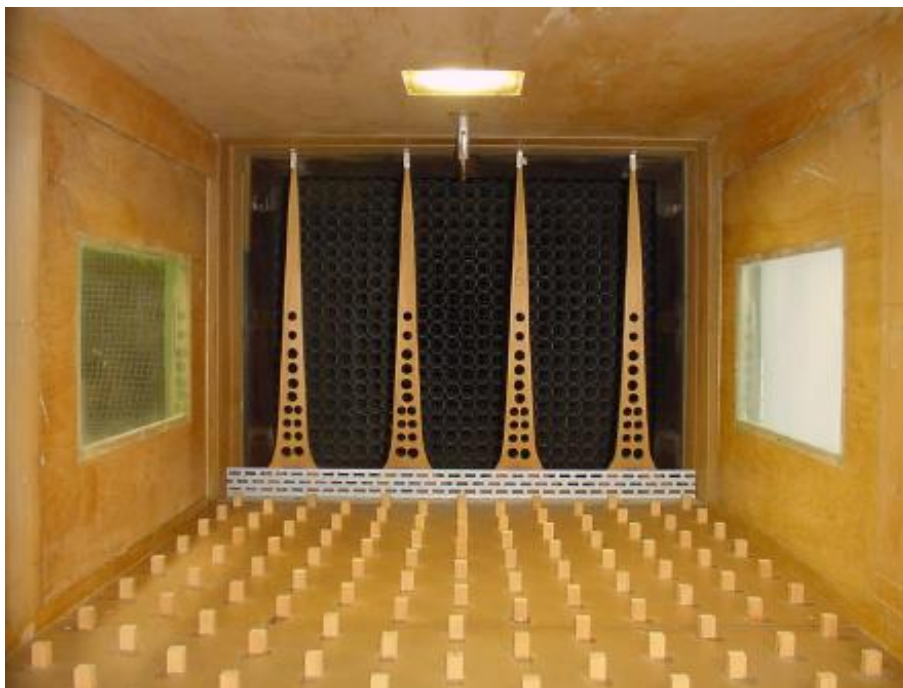
Os dispositivos para a simulação dos perfis de velocidades médias do vento em relação ao expoente  $p$  da fórmula 1 são apresentados nas Figura 8, Figura 9 e Figura 10.

Figura 8 - Dispositivos de geração de perfil de velocidade para o expoente  $p = 0,11$



(fonte: LOREDO-SOUZA; SCHETTINI; PALUCH, 2004)

Figura 9- Dispositivos de geração de perfil de velocidade para o expoente  
 $p = 0,23$



(fonte: LOREDO-SOUZA; SCHETTINI; PALUCH, 2004)

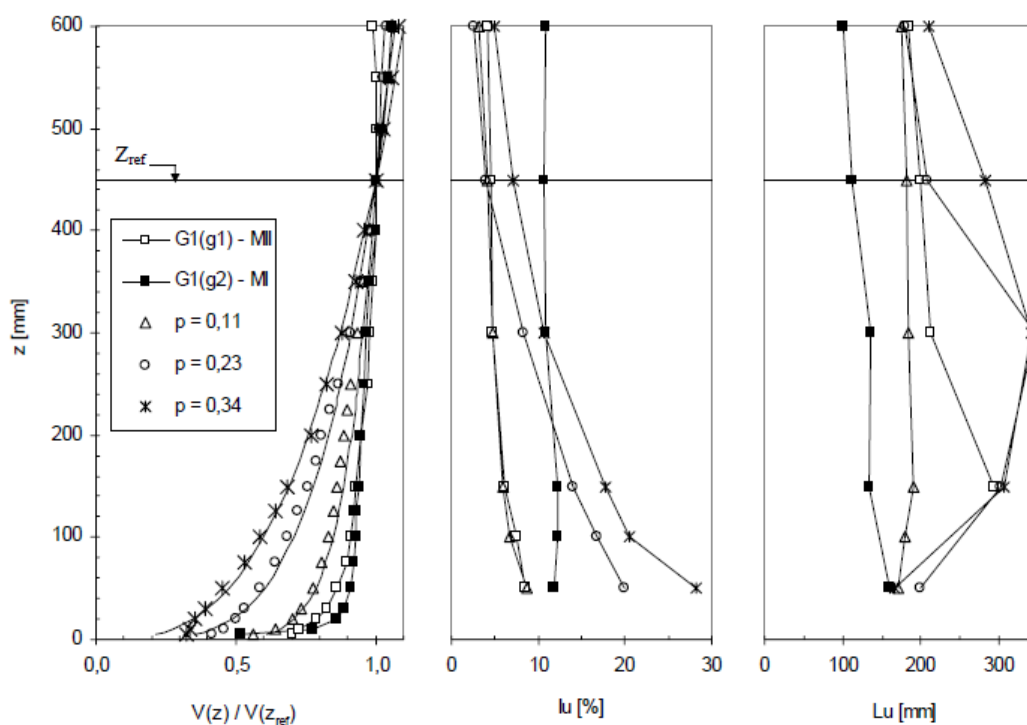
Figura 10- Dispositivos de geração de perfil de velocidade para o expoente  
 $p = 0,34$



(fonte: LOREDO-SOUZA; SCHETTINI; PALUCH, 2004)

Na Figura 11 são apresentados os perfis de velocidade média do vento, intensidade e escala da componente longitudinal da turbulência obtidos com os dispositivos para cada valor de  $p$  referente à lei potencial para as mesas M-I e M-II (LOREDO-SOUZA; SCHETTINI; PALUCH, 2004, p. 151).

Figura 11- Perfil de velocidade média, intensidade e escala da componente longitudinal da turbulência de duas seções de ensaio do túnel Prof. Joaquim Blessmann



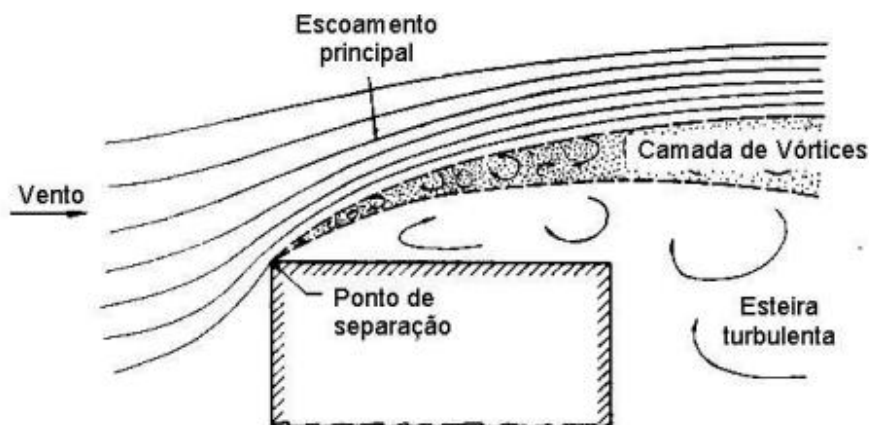
(fonte: LOREDO-SOUZA; SCHETTINI; PALUCH, 2004, p.151)

## 4.2 ESCOAMENTO SOBRE EDIFICAÇÕES

Pode-se descrever qualitativamente o escoamento do ar de forma bidimensional, em um plano vertical sobre uma edificação rombuda e com arestas vivas, como apresentado na Figura 12. O escoamento é caracterizado por padrões de turbulência bem definidos, representado por três regiões: a primeira região definida como escoamento principal, afastada do prédio e com turbulência de intensidade relativamente mais baixa; a segunda região definida como esteira turbulenta, localizada imediatamente sobre a edificação e correspondente com ao descolamento do escoamento quando este encontra a aresta viva,

com intensidades de turbulências mais altas em relação ao escoamento principal, onde se desenvolvem vórtices contra rotativos de eixo paralelo ao prédio; e a terceira região definida como camada de vórtices, localizada entre as duas camadas anteriores e com turbulência de grande intensidade.

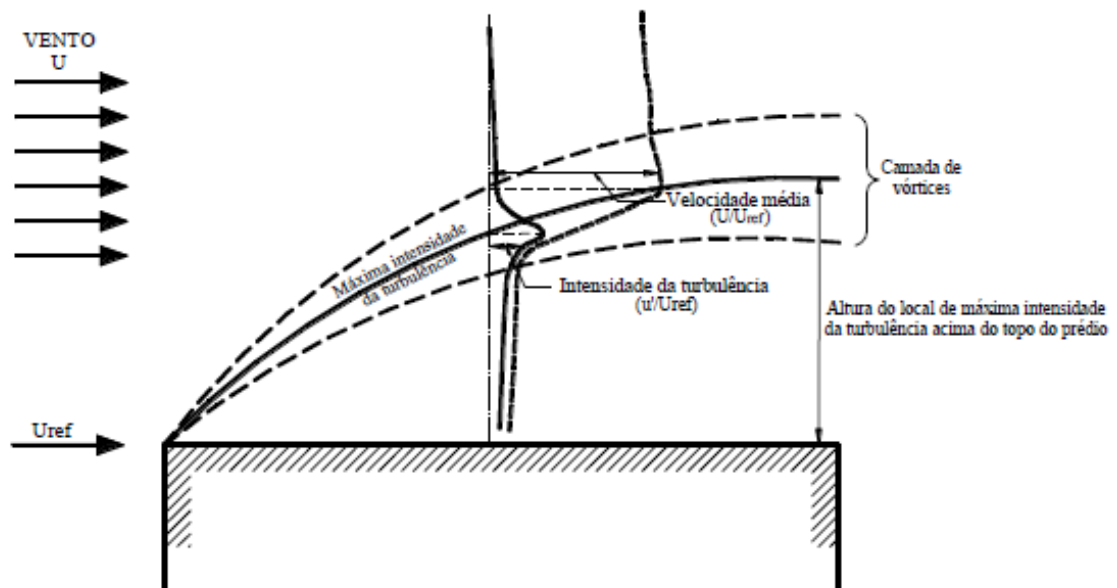
Figura 12- Escoamento de ar bidimensional sobre uma edificação com arestas vivas



(fonte: DAVENPORT, A. G.; ISYUMOV, N.; FIELD, J.D., 1968)

A camada de vórtices é caracterizada por: (1) escoamento altamente turbulento contendo considerável energia em uma frequência dominante associada ao desprendimento de vórtices, e (2) um acentuado gradiente de velocidades entre o escoamento principal e a velocidade mais baixa da esteira. Uma representação da variação vertical da velocidade do vento nesta região é representada na Figura 13. As flutuações da velocidade do vento são pequenas na região da esteira, tornam-se mais acentuadas na região de vórtices e voltam a diminuir no escoamento principal.

Figura 13- Descrição qualitativa da velocidade do vento em escoamento bidimensional no topo de uma edificação com arestas vivas



(fonte: LOREDO-SOUZA; OLIVEIRA, 2014)

## 5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann da UFRGS. Trata-se de um túnel de vento de camada limite de retorno fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis.

### 5.1 MODELO E CARACTERÍSTICAS DA VIZINHANÇA

Visto que este trabalho tem a finalidade de aproveitar a energia eólica de grandes centros urbanos, foi considerada uma rugosidade do terreno no entorno da edificação em análise na categoria IV da NBR 6123/1988, resultando para a lei de potência um coeficiente  $p = 0,23$ . Segundo a NBR 6123/1988 as características das rugosidades do terreno são as seguintes:

**Categoria IV** – terreno coberto por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada.

Exemplos:

- zonas de parques e bosques com muitas árvores;
- cidades pequenas e seus arredores;
- subúrbios densamente construídos de grandes cidades;
- áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.

A cota média do topo dos obstáculos é considerada igual a 10 m. Esta categoria inclui também zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser consideradas na Categoria V.

Para a execução do experimento foi selecionado um modelo reduzido, de um edifício de 27 andares com 87,06 metros, na escala 1:300 com um formato e dimensões similares à maioria das construções brasileiras, para analisar a viabilidade da modernização com o sistema de energia eólica. Em torno do modelo do empreendimento foram reproduzidas as edificações mais próximas, na mesma escala do modelo, para que as condições de escoamento correspondam o mais fielmente possível às condições reais. Fotografias do modelo instalado no túnel de vento com a vizinhança são mostradas na Figura 14 e no Anexo B.

Figura 14 - Modelo da edificação em escala reduzida



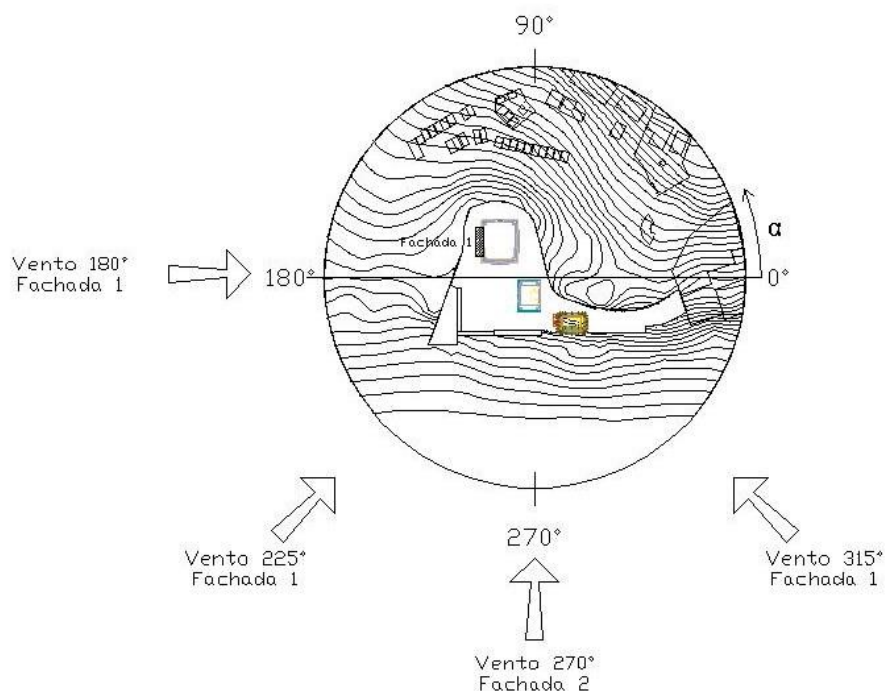
(fonte: própria do autor)

## 5.2 VENTO SIMULADO E MEDIÇÃO

O vento foi simulado com incidência por quatro ângulos, representados na Figura 15 dos quais o ângulo de  $180^\circ$  apresenta incidência perpendicular do vento na fachada e pouca interferência da vizinhança, o ângulo de  $225^\circ$  tem incidência de  $45^\circ$  em relação à fachada, o ângulo de  $270^\circ$  apresenta incidência paralela do vento em relação à fachada e o ângulo  $315^\circ$  apresenta uma incidência do vento de  $135^\circ$  em relação à fachada analisada.



Figura 15 - Incidência do vento em relação à fachada

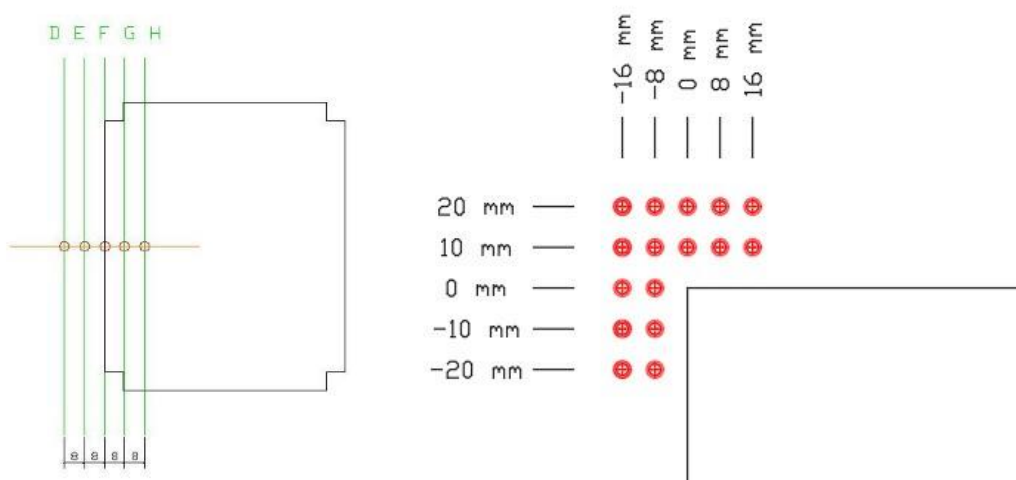


(fonte: própria do autor)

Para o estudo foram medidas as velocidades do vento para três frequências do inversor do túnel de vento, sendo as frequências 7, 10 e 13 Hz, as quais correspondem aproximadamente às velocidades de 7, 10 e 13 m/s quando o túnel está livre de obstáculos e rugosidade. Foram escolhidos esses valores pois compreendem velocidades mais baixas, similares às de operação de pequenos geradores eólicos como rotores de Savonius, o qual segundo Saha, Thotla e Maity (2008) apresenta velocidade ótima de conversão de energia em 8 m/s para a maioria das configurações dos rotores. O ensaio foi realizado com frequências acima de 5 Hz devido à precisão ruim da medição do Tubo de Pitot para baixas velocidades do vento.

O campo das velocidades médias normalizadas será representado nos eixos identificados de “D” até “H”, distanciados entre si por 8 mm e alturas  $z'$  distanciadas por 10 mm entre cada ponto. As cotas  $z'$  indicadas nos gráficos têm origem o topo da torre, na altura da platibanda ( $z = 290,2$  mm e  $z' = 0,00$  mm) e estão representadas por medidas do modelo reduzido em milímetros. Os eixos e cotas estão representados na Figura 16.

Figura 16 - Representação dos eixos e cotas em vista superior e de perfil



(fonte: própria do autor)

As características do escoamento foram determinadas através das medições das velocidades em pontos de interesse selecionados no topo do modelo, com a medição realizada por um sistema de anemometria com sensores de fio-aquecido da Dantec Dynamics através do software Streamware Pro. O sensor de fio-aquecido está detalhado na Figura 17 e foi montado em um sistema de posicionamento manual, com direção perpendicular à fachada para simular medições em um rotor Savonius de eixo horizontal, podendo regular a inclinação vertical do sensor, para obter as velocidades do vento nos pontos desejados. Valores medidos para a incidência do vento de  $270^\circ$  podem ter interferência da haste da sonda. O sensor e suporte instalados no modelo estão identificados na Figura 18 e Figura 19.

Figura 17 - Detalhe do fio-aquecido, medidas em mm

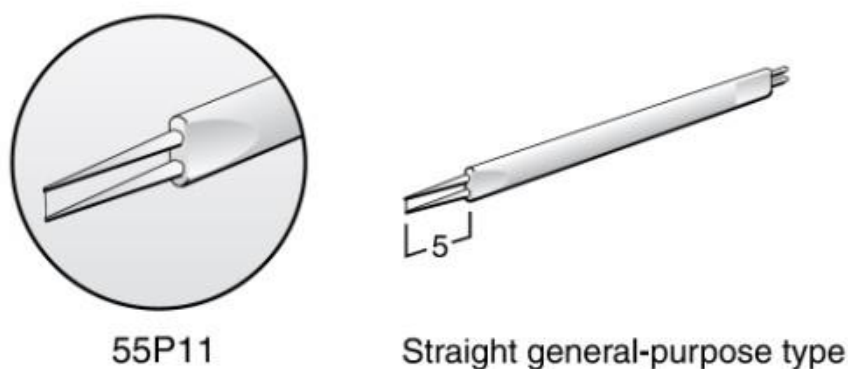
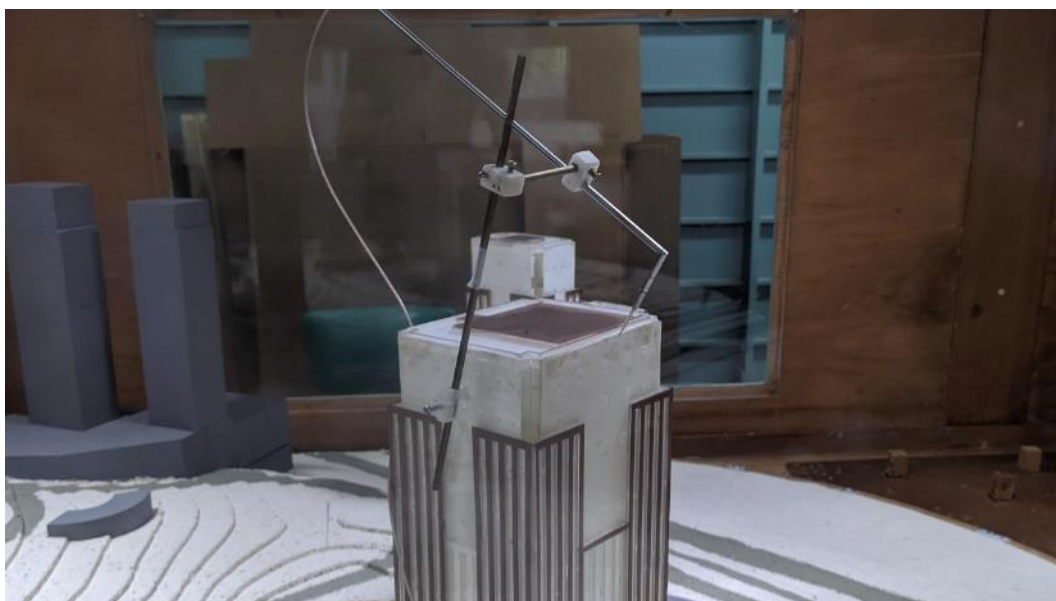
(fonte: <https://www.dantecdynamics.com/product/miniature-wire-probe-straight/>)

Figura 18 - suporte e sensor de fio aquecido



(fonte: própria do autor)

Figura 19- Posicionamento da sonda de fio aquecido



(fonte: própria do autor)

A velocidade referência foi medida na mesma cota do ponto mais alto do modelo, através de um tubo de Pitot instalado a barlavento da mesa M-II, em uma região com menos interferência da vizinhança e escoamento menos turbulento. A velocidade foi calculada através das fórmulas a seguir, como constatado por Schneider (2011, p.5).

$$\bar{V}_{(Z_{ref})} = \sqrt{\frac{2 * (p_0 - p)}{\rho}} \quad (\text{fórmula 4})$$

$$\rho = \frac{p_{abs}}{R_{especifico} * T} \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

$\bar{V}_{(Z_{ref})}$  = velocidade média do vento em uma altura de referência

$p_0$  = pressão de estagnação no tubo de Pitot

$p$  = pressão estática no tubo de Pitot

$\rho$  = densidade do ar

$p_{abs}$  = pressão absoluta

$R_{especifico}$  = constante específica do gás para o ar seco

$T$  = temperatura ambiente em Kelvin

A constante específica dos gases para o ar seco utilizada foi de 287,058 J(kg\*K), a temperatura ambiente foi medida por um termômetro instalado dentro do túnel de vento, a pressão absoluta foi obtida por um manômetro de pressão absoluta digital e as pressões de estagnação e estática do tubo de Pitot foram medidas através de um transdutor de pressões.

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a determinação da velocidade média e turbulência nos pontos em análise, foi utilizada a sonda de fio aquecido e o software Streamware Pro. Para a determinação da velocidade média na altura referência, foi utilizado um tubo de Pitot conectado a um transdutor de pressões da marca Scanivalve para medir a diferença entre a pressão estática e dinâmica e uma rotina do programa computacional Matlab r2013b para a obtenção dos valores médios de pressão.

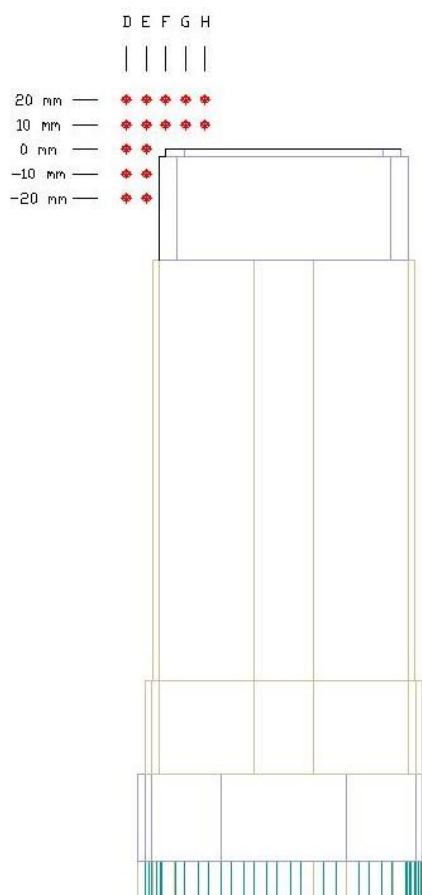
Os valores das velocidades obtidas foram inseridos em uma planilha do software Microsoft Excel para a criação de tabelas e gráficos.

Para uma orientação por vistas superiores e laterais e definição dos pontos, foi utilizado o software Autodesk AutoCAD.

Os ângulos de incidência do vento para a edificação, constam na Figura 15 onde  $\alpha$  é o ângulo de incidência do vento em graus.

O posicionamento dos pontos de medição em torno da malha estão alinhados com o centro da largura da fachada e distribuído conforme a Figura 20.

Figura 20 - Posicionamento dos pontos de medição



(fonte: própria do autor)

### 6.1 ÂNGULO DE INCIDÊNCIA 180°

Para o ângulo de incidência de 180° foram obtidos os valores de velocidade, pressão, temperatura e turbulência que constam na Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3. O valor das alturas está representado na escala de 1:300 com valores em milímetros.

Tabela 1 - Dados obtidos no ensaio de 180°

Medição		Dados locais			7Hz					
Ponto	Altura	Temp (°C)	P(kPa)	P (mmHg)	Vm (m/s)	Vrms	Iu (%)	dP (mmH2O)	Pitot (mmH2O)	Vref (m/s)
D	-20	25.0	99.59	746.98	3.58	0.42	11.84	1.52	1.176	4.45
D	-10	25.0	99.61	747.13	4.42	0.41	9.36	1.52	1.156	4.41
D	0	25.0	99.52	746.46	5.32	0.42	7.82	1.53	1.327	4.73
D	10	20.4	100.17	751.34	6.44	0.48	7.38	1.64	1.657	5.23
D	20	25.1	99.93	749.53	6.22	0.44	7.11	1.60	1.673	5.30
E	-20	25.1	99.56	746.76	3.30	0.48	14.00	1.52	1.203	4.50
E	-10	25.1	99.55	746.68	4.25	0.44	14.53	1.53	1.259	4.61
E	0	24.9	99.50	746.31	5.94	0.46	7.68	1.52	1.600	5.19
E	10	24.7	99.62	747.21	6.55	0.46	7.00	1.52	1.166	4.43
E	20	24.9	99.91	749.38	6.72	0.44	6.61	1.67	1.435	4.91
F	10	24.9	99.62	747.21	7.58	0.53	6.95	1.52	1.213	4.52
F	20	26.9	100.03	750.29	7.00	0.46	6.61	1.60	1.334	4.74
G	10	21.4	100.13	751.04	7.76	1.25	16.09	1.63	1.682	5.28
G	20	22.6	100.11	750.89	7.78	0.51	6.51	1.64	1.579	5.12
H	10	26.3	100.04	750.36	3.35	1.83	54.63	1.61	1.376	4.81
H	20	26.7	100.01	750.14	7.48	0.62	8.32	1.59	1.324	4.73

(fonte: própria do autor)

Tabela 2 - Dados obtidos no ensaio de 180°

Medição		10Hz					
Ponto	Altura	Vm (m/s)	Vrms	Iu (%)	dP (mmH2O)	Pitot (mmH2O)	Vref (m/s)
D	-20	5.06	0.62	12.21	3.26	2.979	7.08
D	-10	6.29	0.58	9.27	3.26	2.942	7.04
D	0	7.55	0.61	8.09	3.27	3.182	7.32
D	10	9.15	0.69	7.55	3.40	3.496	7.59
D	20	8.89	0.67	7.48	3.34	3.538	7.71
E	-20	4.62	0.70	15.09	3.25	3.032	7.15
E	-10	5.99	0.63	10.58	3.27	3.033	7.15
E	0	8.49	0.66	7.72	3.26	3.372	7.54
E	10	9.35	0.68	7.29	3.27	3.038	7.15
E	20	9.62	0.67	7.01	3.41	3.295	7.44
F	10	10.83	0.76	7.01	3.28	2.995	7.10
F	20	10.04	0.67	6.71	3.32	3.108	7.24
G	10	10.99	1.80	16.35	3.40	3.573	7.69
G	20	11.10	0.74	6.64	3.40	3.400	7.52
H	10	4.64	2.55	54.91	3.32	3.124	7.25
H	20	10.72	0.92	8.57	3.33	3.170	7.31

(fonte: própria do autor)

Tabela 3 - Dados obtidos no ensaio de 180°

Medição		13Hz					
Ponto	Altura	Vm (m/s)	Vrms	Iu (%)	dP (mmH2O)	Pitot (mmH2O)	Vref (m/s)
D	-20	6.57	0.80	12.12	5.53	5.321	9.47
D	-10	8.07	0.79	9.79	5.54	5.338	9.48
D	0	9.70	0.82	8.45	5.54	5.483	9.61
D	10	11.78	0.90	7.61	5.69	5.906	9.87
D	20	11.52	0.87	7.51	5.67	5.846	9.91
E	-20	5.94	0.91	15.39	5.53	5.334	9.48
E	-10	7.70	0.86	11.14	5.53	5.375	9.52
E	0	11.03	0.85	7.72	5.52	5.730	9.83
E	10	12.09	0.87	7.19	5.54	5.292	9.43
E	20	12.41	0.89	7.20	5.65	5.696	9.78
F	10	14.00	0.99	7.05	5.54	5.296	9.44
F	20	13.02	0.90	6.94	5.59	5.454	9.59
G	10	14.05	2.40	17.08	5.68	5.937	9.91
G	20	14.38	0.97	6.72	5.67	5.595	9.64
H	10	6.01	3.27	54.44	5.59	5.358	9.50
H	20	13.98	1.19	8.50	5.58	5.418	9.56

(fonte: própria do autor)

Com os dados acima foi calculado o valor normalizado da velocidade, dividindo a velocidade medida no ponto pela velocidade na altura referência, os valores obtidos constam na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores normalizados para o ensaio de 180°

180°		Vm/Vref		
Eixo Y	Eixo Z	7 Hz	10 Hz	13 Hz
D	-20	0.80	0.71	0.69
D	-10	1.00	0.89	0.85
D	0	1.12	1.03	1.01
D	10	1.23	1.21	1.19
D	20	1.17	1.15	1.16
E	-20	0.73	0.65	0.63
E	-10	0.92	0.84	0.81
E	0	1.14	1.13	1.12
E	10	1.48	1.31	1.28
E	20	1.37	1.29	1.27
F	10	1.68	1.53	1.48
F	20	1.48	1.39	1.36
G	10	1.47	1.43	1.42
G	20	1.52	1.48	1.49
H	10	0.70	0.64	0.63
H	20	1.58	1.47	1.46

Legenda de cores:

$x \leq 0,5$
$0,5 < x \leq 0,7$
$0,7 < x \leq 0,9$
$0,9 < x \leq 1,1$
$1,1 < x \leq 1,5$
$1,5 < x \leq 2,0$
$x > 2,0$

(fonte: própria do autor)



Tabela 5 - Valores da intensidade normalizada da turbulência para 180°

180°		Iu (%)		
Eixo Y	Eixo Z	7 Hz	10 Hz	13 Hz
D	-20	11.84	12.21	12.12
D	-10	9.36	9.27	9.79
D	0	7.82	8.09	8.45
D	10	7.38	7.55	7.61
D	20	7.11	7.48	7.51
E	-20	14.00	15.09	15.39
E	-10	14.53	10.58	11.14
E	0	7.68	7.72	7.72
E	10	7.00	7.29	7.19
E	20	6.61	7.01	7.20
F	10	6.95	7.01	7.05
F	20	6.61	6.71	6.94
G	10	16.09	16.35	17.08
G	20	6.51	6.64	6.72
H	10	54.63	54.91	54.44
H	20	8.32	8.57	8.50

**Legenda de cores:**

- lu < 10 %
- 10 ≤ lu < 15
- 15 ≤ lu < 20
- 20 ≤ lu < 30
- 30 ≤ lu < 40
- 40 ≤ lu

(fonte: própria do autor)

Após, para uma melhor visualização, os valores foram inseridos em áreas de influência, cada área com dimensão de 8 x 10 mm (d x h).

Figura 21 - Áreas de influência para 180° em 7 Hz e 10 Hz

Vento 180° - Vm/Vref - 7Hz						Vento 180° - Vm/Vref - 10Hz					
h (mm)	Eixo					h (mm)	Eixo				
	D	E	F	G	H		D	E	F	G	H
20	1.17	1.37	1.48	1.52	1.58	20	1.15	1.29	1.39	1.48	1.47
10	1.23	1.48	1.68	1.47	0.70	10	1.21	1.31	1.53	1.43	0.64
0	1.12	1.14	Edificação			0	1.03	1.13	Edificação		
-10	1.00	0.92				-10	0.89	0.84			
-20	0.80	0.73				-20	0.71	0.65			

(fonte: própria do autor)

Figura 22 - Áreas de influência para 180° em 13 Hz

Vento 180° - $V_m/V_{ref}$ - 13Hz					
h (mm)	Eixo				
	D	E	F	G	H
20	1.16	1.27	1.36	1.49	1.46
10	1.19	1.28	1.48	1.42	0.63
0	1.01	1.12	Edificação		
-10	0.85	0.81			
-20	0.69	0.63			

(fonte: própria do autor)

Tabela 6 - Valores médios da intensidade da turbulência para 180°

Vento 180° - Média das intensidades de turbulência					
h (mm)	Eixo				
	D	E	F	G	H
20	7.37	6.94	6.75	6.62	8.46
10	7.51	7.16	7.00	16.51	54.66
0	8.12	7.71	Edificação		
-10	9.47	12.08			
-20	12.06	14.83			

**Legenda de cores:**

- $I_u < 10\%$
- $10 \leq I_u < 15$
- $15 \leq I_u < 20$
- $20 \leq I_u < 30$
- $30 \leq I_u < 40$
- $40 \leq I_u$

(fonte: própria do autor)

Com os dados das figuras acima, percebe-se que os pontos com maior valor normalizado da velocidade se situam entre os eixos F e G (0 e 8 mm). Após o eixo H na altura abaixo de 3 metros, foi constatada uma queda brusca na velocidade medida e um aumento significativo na turbulência, representando a esteira turbulenta ou a camada de vórtices.

## 6.2 ÂNGULO DE INCIDÊNCIA 225°

Para o ângulo de incidência de 225° foram obtidos os valores de velocidade, pressão, temperatura e turbulência que constam na Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9. O valor das alturas está representado na escala de 1:300 com valores em milímetros.

Tabela 7 - Dados obtidos no ensaio para 225°

Ponto		Dados locais			7Hz					
Eixo Y	Eixo Z	Temp (°C)	P(kPa)	P (mmHg)	Vm (m/s)	Vrms	Iu (%)	dP (mmH2O)	Pitot (mmH2O)	Vref (m/s)
D	-20	25.1	99.59	746.98	4.31	0.36	8.38	1.40	1.075	4.26
D	-10	25.0	99.62	747.21	4.65	0.36	7.77	1.41	1.036	4.18
D	0	25.1	99.53	746.53	5.18	0.38	7.37	1.41	1.160	4.42
D	10	20.9	100.15	751.19	6.13	0.43	7.08	1.53	1.434	4.87
D	20	25.1	99.92	749.46	5.95	0.43	7.18	1.57	1.468	4.96
E	-20	25.1	99.58	746.91	3.76	0.46	12.14	1.40	1.098	4.30
E	-10	25.2	99.56	746.76	4.72	0.42	8.85	1.40	1.117	4.34
E	0	25.0	99.50	746.31	5.98	0.43	7.14	1.40	1.366	4.80
E	10	24.8	99.65	747.43	6.52	0.44	6.81	1.41	1.058	4.22
E	20	24.9	99.89	749.23	6.48	0.43	6.68	1.57	1.295	4.66
F	10	24.9	99.64	747.36	7.78	0.52	6.65	1.40	1.059	4.22
F	20	26.7	100.02	750.21	6.93	0.45	6.47	1.48	1.207	4.51
G	10	21.7	100.11	750.89	8.28	0.95	11.48	1.53	1.529	5.03
G	20	23.0	100.11	750.89	8.20	0.50	6.11	1.53	1.411	4.85
H	10	26.3	100.05	750.44	6.12	1.88	30.65	1.50	1.207	4.51
H	20	26.5	99.98	749.91	7.46	0.48	6.39	1.48	1.203	4.50

(fonte: própria do autor)

Tabela 8 - Dados obtidos no ensaio para 225°

Ponto		10Hz					
Eixo Y	Eixo Z	Vm (m/s)	Vrms	Iu (%)	dP (mmH2O)	Pitot (mmH2O)	Vref (m/s)
D	-20	6.08	0.55	8.98	3.02	2.705	6.75
D	-10	6.61	0.53	8.07	3.02	2.713	6.76
D	0	7.36	0.56	7.58	3.01	2.854	6.94
D	10	8.67	0.64	7.32	3.16	3.187	7.26
D	20	8.44	0.62	7.29	3.18	3.204	7.33
E	-20	5.27	0.68	12.84	3.02	2.730	6.78
E	-10	6.67	0.62	9.21	3.01	2.789	6.86
E	0	8.51	0.60	7.10	3.03	3.021	7.14
E	10	9.26	0.65	7.05	3.03	2.732	6.78
E	20	9.23	0.64	6.89	3.17	3.030	7.13
F	10	11.11	0.76	6.85	3.03	2.713	6.76
F	20	9.91	0.68	6.87	3.07	2.888	6.98
G	10	11.75	1.37	11.62	3.15	3.253	7.34
G	20	11.81	0.70	5.93	3.13	3.091	7.17
H	10	8.71	2.70	31.00	3.08	2.861	6.94
H	20	10.70	0.69	6.49	3.09	2.855	6.94

(fonte: própria do autor)

Tabela 9 - Dados obtidos no ensaio para 225°

Ponto		13Hz					
Eixo Y	Eixo Z	Vm (m/s)	Vrms	Iu (%)	dP (mmH2O)	Pitot (mmH2O)	Vref (m/s)
D	-20	7.80	0.68	8.74	5.12	4.892	9.08
D	-10	8.45	0.68	8.07	5.12	4.917	9.10
D	0	9.45	0.72	7.57	5.13	5.022	9.20
D	10	11.18	0.84	7.50	5.29	5.422	9.46
D	20	10.89	0.82	7.49	5.28	5.422	9.54
E	-20	6.76	0.88	12.98	5.12	4.890	9.08
E	-10	8.59	0.80	9.32	5.11	4.934	9.12
E	0	10.93	0.81	7.40	5.12	5.116	9.29
E	10	11.97	0.84	7.01	5.12	4.963	9.14
E	20	11.91	0.83	6.96	5.26	5.173	9.32
F	10	14.48	0.99	6.86	5.13	4.930	9.11
F	20	12.93	0.83	6.44	5.18	4.971	9.16
G	10	15.29	1.73	11.33	5.27	5.546	9.59
G	20	15.21	0.95	6.24	5.25	5.233	9.33
H	10	11.48	3.49	30.41	5.18	5.058	9.23
H	20	13.90	0.92	6.59	5.19	5.059	9.24

(fonte: própria do autor)

Com os dados acima foi calculado o valor normalizado da velocidade, dividindo a velocidade medida no ponto pela velocidade na altura referência, os valores obtidos constam na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores normalizados para o ensaio de 225°

Eixo	Eixo	Vm/Vref (%)				
		3 Hz	5 Hz	7 Hz	10 Hz	13 Hz
D	-20	1.69	1.53	1.01	0.90	0.86
D	-10	1.57	1.69	1.11	0.98	0.93
D	0	1.60	1.51	1.17	1.06	1.03
D	10	2.18	1.46	1.26	1.20	1.18
D	20	1.90	1.32	1.20	1.15	1.14
E	-20	1.31	1.31	0.87	0.78	0.74
E	-10	1.44	1.51	1.09	0.97	0.94
E	0	1.84	1.41	1.25	1.19	1.18
E	10	1.85	1.98	1.55	1.37	1.31
E	20	1.62	1.68	1.39	1.29	1.28
F	10	2.18	2.38	1.84	1.64	1.59
F	20	2.09	1.88	1.54	1.42	1.41
G	10	2.57	1.75	1.64	1.60	1.59
G	20	2.32	1.86	1.69	1.65	1.63
H	10	1.89	1.62	1.36	1.25	1.24
H	20	2.52	2.03	1.66	1.54	1.50

**Legenda de cores:**

- x ≤ 0,5
- 0,5 < x ≤ 0,7
- 0,7 < x ≤ 0,9
- 0,9 < x ≤ 1,1
- 1,1 < x ≤ 1,5
- 1,5 < x ≤ 2,0
- x > 2,0

(fonte: própria do autor)

Tabela 11 - Valores da intensidade normalizada da turbulência para 225°

225°		Iu (%)		
Eixo Y	Eixo Z	7 Hz	10 Hz	13 Hz
D	-20	8.38	8.98	8.74
D	-10	7.77	8.07	8.07
D	0	7.37	7.58	7.57
D	10	7.08	7.32	7.50
D	20	7.18	7.29	7.49
E	-20	12.14	12.84	12.98
E	-10	8.85	9.21	9.32
E	0	7.14	7.10	7.40
E	10	6.81	7.05	7.01
E	20	6.68	6.89	6.96
F	10	6.65	6.85	6.86
F	20	6.47	6.87	6.44
G	10	11.48	11.62	11.33
G	20	6.11	5.93	6.24
H	10	30.65	31.00	30.41
H	20	6.39	6.49	6.59

**Legenda de cores:**

- Iu < 10 %
- 10 ≤ Iu < 15
- 15 ≤ Iu < 20
- 20 ≤ Iu < 30
- 30 ≤ Iu < 40
- 40 ≤ Iu

(fonte: própria do autor)

Após, para uma melhor visualização, os valores foram inseridos em áreas de influência, cada área com dimensão de 8 x 10 mm (d x h).

Figura 23 - Áreas de influência para 225° em 7 Hz e 10 Hz

Vento 225° - $V_m/V_{ref}$ - 7Hz						Vento 225° - $V_m/V_{ref}$ - 10Hz					
h (mm)	Eixo					h (mm)	Eixo				
	D	E	F	G	H		D	E	F	G	H
20	1.20	1.39	1.54	1.69	1.66	20	1.15	1.29	1.42	1.65	1.54
10	1.26	1.55	1.84	1.64	1.36	10	1.20	1.37	1.64	1.60	1.25
0	1.17	1.25	Edificação			0	1.06	1.19	Edificação		
-10	1.11	1.09				-10	0.98	0.97			
-20	1.01	0.87				-20	0.90	0.78			

(fonte: própria do autor)

Figura 24 - Área de influência para 225° em 13 Hz

Vento 225° - $V_m/V_{ref}$ - 13Hz					
h (mm)	Eixo				
	D	E	F	G	H
20	1.14	1.28	1.41	1.63	1.50
10	1.18	1.31	1.59	1.59	1.24
0	1.03	1.18	Edificação		
-10	0.93	0.94			
-20	0.86	0.74			

(fonte: própria do autor)

Tabela 12 - Valores médios da intensidade da turbulência para 225°

Vento 225° - Média das intensidades de turbulência					
Eixo					
h (mm)	D	E	F	G	H
20	7.32	6.84	6.59	6.09	6.49
10	7.30	6.96	6.79	11.48	30.68
0	7.50	7.21	Edificação		
-10	7.97	9.13			
-20	8.70	12.66			

**Legenda de cores:**

- $lu < 10\%$
- $10 \leq lu < 15$
- $15 \leq lu < 20$
- $20 \leq lu < 30$
- $30 \leq lu < 40$
- $40 \leq lu$

(fonte: própria do autor)

Com os dados das figuras acima, se consta que os valores normalizados são próximos aos medidos no ângulo de incidência de 180°, com os maiores valores entre os eixos F e G (0 e 8 mm). No entanto a queda na velocidade medida próximo ao eixo H (16 mm) foi menor.

### 6.3 ÂNGULO DE INCIDÊNCIA 270°

Para o ângulo de incidência de 270° foram obtidos os valores de velocidade, pressão, temperatura e turbulência que constam na Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15. O valor das alturas está representado na escala de 1:300 com valores em milímetros.

Tabela 13 - Dados obtidos no ensaio para 270°

Ponto		Dados locais			7Hz					
Eixo Y	Eixo Z	Temp (°C)	P (kPa)	P (mmHg)	Vm (m/s)	Vrms	Iu (%)	dP (mmH2O)	Pitot (mmH2O)	Vref (m/s)
D	-20									
D	-10									
D	0	27.7	99.13	743.53	2.68	1.12	41.66	1.50	0.863	3.84
D	10	27.6	99.14	743.61	2.86	0.40	14.01	1.50	0.851	3.81
D	20	25.0	99.91	749.38	2.85	0.56	19.68	1.55	1.388	4.83
E	-20	25.7	99.58	746.91	1.38	0.69	50.09	1.48	1.001	4.11
E	-10	22.7	99.69	747.73	1.75	0.86	49.11	1.51	1.182	4.44
E	0	25.0	99.50	746.31	2.02	0.99	49.19	1.39	1.276	4.64
E	10	24.7	99.90	749.31	2.66	1.17	44.03	1.54	1.223	4.53
E	20	27.3	99.45	745.93	3.05	0.89	29.03	1.44	0.886	3.88
F	10	24.7	99.91	749.38	2.32	1.14	48.90	1.55	1.161	4.41
F	20	28.1	99.36	745.26	2.97	1.23	41.19	1.44	0.901	3.92
G	10	21.1	99.81	748.63	2.25	1.17	51.91	1.52	1.542	5.06
G	20	28.1	99.35	745.18	2.97	1.35	45.52	1.45	0.841	3.79
H	10	22.1	99.72	747.96	2.07	1.16	56.15	1.51	1.231	4.53
H	20	27.8	99.28	744.66	3.21	1.56	48.48	1.44	0.873	3.86

(fonte: própria do autor)

Tabela 14 - Dados obtidos no ensaio para 270°

Ponto		10Hz					
Eixo Y	Eixo Z	Vm (m/s)	Vrms	Iu (%)	dP (mmH2O)	Pitot (mmH2O)	Vref (m/s)
D	-20						
D	-10						
D	0	3.98	1.61	42.40	3.07	2.419	6.43
D	10	3.96	0.60	15.10	3.06	2.459	6.48
D	20	3.87	0.86	22.26	3.14	3.069	7.18
E	-20	1.93	0.97	50.37	3.06	2.574	6.59
E	-10	2.49	1.23	49.41	3.11	2.796	6.83
E	0	2.86	1.41	49.35	2.99	2.933	7.03
E	10	3.75	1.70	45.26	3.13	2.891	6.96
E	20	4.24	1.33	31.22	3.02	2.486	6.50
F	10	3.30	1.63	49.50	3.13	2.849	6.91
F	20	4.31	1.76	40.79	3.01	2.501	6.53
G	10	3.21	1.70	53.08	3.11	3.212	7.30
G	20	4.32	1.95	45.24	3.01	2.498	6.53
H	10	2.97	1.66	56.08	3.11	2.954	7.01
H	20	4.52	2.23	49.38	3.02	2.505	6.54

(fonte: própria do autor)



Tabela 15 - Dados obtidos no ensaio para 270°

Ponto		13Hz					
Eixo Y	Eixo Z	Vm (m/s)	Vrms	Iu (%)	dP (mmH2O)	Pitot (mmH2O)	Vref (m/s)
D	-20						
D	-10						
D	0	4.89	2.07	42.36	5.12	4.552	8.82
D	10	4.97	0.81	16.30	5.14	4.571	8.83
D	20	4.82	1.16	24.05	5.20	5.183	9.33
E	-20	2.52	1.31	52.08	5.12	4.813	9.01
E	-10	3.20	1.58	49.30	5.19	4.996	9.13
E	0	3.73	1.84	49.45	5.07	5.037	9.21
E	10	4.83	2.18	45.12	5.20	5.010	9.17
E	20	5.38	1.72	31.87	5.06	4.638	8.88
F	10	4.21	2.11	50.20	5.21	5.122	9.27
F	20	5.56	2.30	41.39	5.06	4.608	8.87
G	10	4.12	2.19	53.28	5.20	5.397	9.46
G	20	5.55	2.56	46.15	5.05	4.610	8.87
H	10	3.90	2.18	55.77	5.20	5.074	9.19
H	20	5.91	2.88	48.79	5.08	4.508	8.77

(fonte: própria do autor)

Com os dados acima foi calculado o valor normalizado da velocidade, dividindo a velocidade medida no ponto pela velocidade na altura referência, os valores obtidos constam na Tabela 16.

Tabela 16 - Valores normalizados para o ensaio de 270°

270°		Vm/Vref		
Eixo Y	Eixo Z	7 Hz	10 Hz	13 Hz
D	-20			
D	-10			
D	0	0.70	0.62	0.55
D	10	0.75	0.61	0.56
D	20	0.59	0.54	0.52
E	-20	0.34	0.29	0.28
E	-10	0.39	0.36	0.35
E	0	0.43	0.41	0.40
E	10	0.59	0.54	0.53
E	20	0.79	0.65	0.61
F	10	0.53	0.48	0.45
F	20	0.76	0.66	0.63
G	10	0.44	0.44	0.44
G	20	0.78	0.66	0.63
H	10	0.46	0.42	0.42
H	20	0.83	0.69	0.67

Legenda de cores:

$x \leq 0,5$
$0,5 < x \leq 0,7$
$0,7 < x \leq 0,9$
$0,9 < x \leq 1,1$
$1,1 < x \leq 1,5$
$1,5 < x \leq 2,0$
$x > 2,0$

(fonte: própria do autor)

Tabela 17 - Valores da intensidade normalizada da turbulência para 270°

270°		Iu (%)		
Eixo Y	Eixo Z	7 Hz	10 Hz	13 Hz
D	0	41.66	42.40	42.36
D	10	14.01	15.10	16.30
D	20	19.68	22.26	24.05
E	-20	50.09	50.37	52.08
E	-10	49.11	49.41	49.30
E	0	49.19	49.35	49.45
E	10	44.03	45.26	45.12
E	20	29.03	31.22	31.87
F	10	48.90	49.50	50.20
F	20	41.19	40.79	41.39
G	10	51.91	53.08	53.28
G	20	45.52	45.24	46.15
H	10	56.15	56.08	55.77
H	20	48.48	49.38	48.79

**Legenda de cores:**

- lu < 10 %
- 10 ≤ lu < 15
- 15 ≤ lu < 20
- 20 ≤ lu < 30
- 30 ≤ lu < 40
- 40 ≤ lu

(fonte: própria do autor)

Após, para uma melhor visualização, os valores foram inseridos em áreas de influência, cada área com dimensão de 8 x 10 mm (d x h).

Figura 25 - Áreas de influência para 270° em 7 Hz e 10 Hz

Vento 270° - Vm/Vref - 7Hz						Vento 270° - Vm/Vref - 10Hz					
h (mm)	Eixo					h (mm)	Eixo				
	D	E	F	G	H		D	E	F	G	H
20	0.59	0.79	0.76	0.78	0.83	20	0.54	0.65	0.66	0.66	0.69
10	0.75	0.59	0.53	0.44	0.46	10	0.61	0.54	0.48	0.44	0.42
0	0.70	0.43	Edificação			0	0.62	0.41	Edificação		
-10		0.39				-10		0.36			
-20		0.34				-20		0.29			

(fonte: própria do autor)

Figura 26 - Áreas de influência para 270° em 13 Hz

Vento 270° - $V_m/V_{ref}$ - 13Hz					
h (mm)	Eixo				
	D	E	F	G	H
20	0.52	0.61	0.63	0.63	0.67
10	0.56	0.53	0.45	0.44	0.42
0	0.55	0.40	Edificação		
-10		0.35			
-20		0.28			

(fonte: própria do autor)

Tabela 18 - Valores médios da intensidade da turbulência para 270°

Vento 270° - Média das intensidades de turbulência					
h (m)	Eixo				
	D	E	F	G	H
20	22.00	30.71	41.12	45.64	48.88
10	15.14	44.80	49.53	52.76	56.00
0	42.14	49.33	Edificação		
-10		49.27			
-20		50.85			

Legenda de cores:

- $I_u < 10\%$
- $10 \leq I_u < 15$
- $15 \leq I_u < 20$
- $20 \leq I_u < 30$
- $30 \leq I_u < 40$
- $40 \leq I_u$

(fonte: própria do autor)

Com os dados das figuras acima, se consta que os valores normalizados da velocidade são bem reduzidos com a incidência do vento paralela à fachada analisada. Outro ponto de influência nos valores menores da velocidade normalizada e maior turbulência é o efeito da vizinhança no escoamento do vento e a direção da sonda de fio aquecido, a qual está paralela ao escoamento e sofre interferência das hastes.

#### 6.4 ÂNGULO DE INCIDÊNCIA 315°

Para o ângulo de incidência de 315° foram obtidos os valores de velocidade, pressão, temperatura e turbulência que constam na Tabela 19, Tabela 20 e Tabela 21. O valor das alturas está representado na escala de 1:300 com valores em milímetros.

Tabela 19 - Dados obtidos no ensaio para 315°

Ponto		Dados locais			7Hz					
Eixo Y	Eixo Z	Temp (°C)	P(kPa)	P (mmHg)	Vm (m/s)	Vrms	Iu (%)	dP (mmH2O)	Pitot (mmH2O)	Vref (m/s)
D	-20									
D	-10									
D	0	27.8	99.12	743.46	4.22	1.35	31.87	1.63	0.996	4.12
D	10	27.5	99.19	743.98	4.49	1.17	26.14	1.57	1.032	4.19
D	20	27.7	99.24	744.36	4.16	1.14	27.32	1.59	1.036	4.20
E	-20	25.4	99.61	747.13	0.82	0.34	41.89	1.63	1.190	4.48
E	-10	23.3	99.67	747.58	1.10	0.63	57.07	1.65	1.248	4.57
E	0	24.4	99.64	747.36	3.89	1.38	35.51	1.63	1.246	4.57
E	10	24.8	99.91	749.38	4.97	1.21	24.40	1.69	1.370	4.79
E	20	27.6	99.45	745.93	4.42	1.14	25.88	1.60	1.056	4.24
F	10	24.7	99.92	749.46	5.10	1.17	22.92	1.70	1.344	4.75
F	20	28.0	99.41	745.63	4.62	1.10	23.73	1.59	1.043	4.22
G	10	21.4	99.78	748.41	5.73	1.17	20.34	1.66	1.597	5.15
G	20	28.0	99.31	744.88	4.25	1.07	25.21	1.58	1.023	4.18
H	10	21.7	99.75	748.18	5.44	1.15	21.15	1.66	1.478	4.96
H	20	27.9	99.28	744.66	3.57	0.96	26.85	1.58	1.007	4.14

(fonte: própria do autor)

Tabela 20 - Dados obtidos no ensaio para 315°

Ponto		10Hz					
Eixo Y	Eixo Z	Vm (m/s)	Vrms	Iu (%)	dP (mmH2O)	Pitot (mmH2O)	Vref (m/s)
D	-20						
D	-10						
D	0	6.00	1.94	32.36	3.39	2.767	6.88
D	10	6.44	1.71	26.59	3.32	2.753	6.85
D	20	5.84	1.61	27.56	3.33	2.805	6.92
E	-20	1.15	0.53	46.21	3.38	2.952	7.05
E	-10	1.54	0.91	59.20	3.42	3.117	7.22
E	0	5.67	1.97	34.83	3.40	3.056	7.17
E	10	6.99	1.75	25.00	3.47	3.253	7.39
E	20	6.33	1.59	25.19	3.35	2.824	6.93
F	10	7.24	1.68	23.24	3.47	3.231	7.36
F	20	6.54	1.58	24.10	3.33	2.857	6.98
G	10	8.10	1.71	21.08	3.44	3.505	7.63
G	20	6.14	1.49	24.34	3.33	2.841	6.96
H	10	7.74	1.64	21.13	3.44	3.331	7.44
H	20	5.12	1.38	26.83	3.32	2.860	6.99

(fonte: própria do autor)

Tabela 21 - Dados obtidos no ensaio para 315°

Ponto		13Hz					
Eixo Y	Eixo Z	Vm (m/s)	Vrms	Iu (%)	dP (mmH2O)	Pitot (mmH2O)	Vref (m/s)
D	-20						
D	-10						
D	0	7.73	2.50	32.37	5.67	5.153	9.38
D	10	8.28	2.22	26.86	5.62	5.148	9.37
D	20	7.52	2.07	27.39	5.61	5.117	9.34
E	-20	1.50	0.70	47.00	5.68	5.317	9.47
E	-10	1.98	1.20	60.46	5.74	5.434	9.54
E	0	7.35	2.53	34.43	5.70	5.453	9.57
E	10	9.04	2.22	24.61	5.77	5.632	9.72
E	20	8.11	2.10	25.92	5.64	5.244	9.44
F	10	9.29	2.19	23.61	5.77	5.546	9.64
F	20	8.33	2.05	24.56	5.61	5.244	9.45
G	10	10.49	2.22	21.19	5.77	5.857	9.86
G	20	8.03	1.97	24.59	5.62	5.209	9.43
H	10	9.82	2.17	22.12	5.76	5.748	9.78
H	20	6.55	1.79	27.36	5.61	5.149	9.37

(fonte: própria do autor)

Com os dados acima foi calculado o valor normalizado da velocidade, dividindo a velocidade medida no ponto pela velocidade na altura referência, os valores obtidos constam na Tabela 22.

Tabela 22 - Valores normalizados para o ensaio de 315°

315°		Vm/Vref		
Eixo Y	Eixo Z	7 Hz	10 Hz	13 Hz
D	0	1.02	0.87	0.82
D	10	1.07	0.94	0.88
D	20	0.99	0.84	0.81
E	-20	0.18	0.16	0.16
E	-10	0.24	0.21	0.21
E	0	0.85	0.79	0.77
E	10	1.04	0.95	0.93
E	20	1.04	0.91	0.86
F	10	1.07	0.98	0.96
F	20	1.10	0.94	0.88
G	10	1.11	1.06	1.06
G	20	1.02	0.88	0.85
H	10	1.10	1.04	1.00
H	20	0.86	0.73	0.70

**Legenda de cores:**

- x ≤ 0,5
- 0,5 < x ≤ 0,7
- 0,7 < x ≤ 0,9
- 0,9 < x ≤ 1,1
- 1,1 < x ≤ 1,5
- 1,5 < x ≤ 2,0
- x > 2,0

(fonte: própria do autor)

Tabela 23 - Valores da intensidade normalizada da turbulência para 315°

315°		Iu (%)		
Eixo Y	Eixo Z	7 Hz	10 Hz	13 Hz
D	0	31.87	32.36	32.37
D	10	26.14	26.59	26.86
D	20	27.32	27.56	27.39
E	-20	41.89	46.21	47.00
E	-10	57.07	59.20	60.46
E	0	35.51	34.83	34.43
E	10	24.40	25.00	24.61
E	20	25.88	25.19	25.92
F	10	22.92	23.24	23.61
F	20	23.73	24.10	24.56
G	10	20.34	21.08	21.19
G	20	25.21	24.34	24.59
H	10	21.15	21.13	22.12
H	20	26.85	26.83	27.36

**Legenda de cores:**

- Iu < 10 %
- 10 ≤ Iu < 15
- 15 ≤ Iu < 20
- 20 ≤ Iu < 30
- 30 ≤ Iu < 40
- 40 ≤ Iu

(fonte: própria do autor)

Após, para uma melhor visualização, os valores foram inseridos em áreas de influência, cada área com dimensão de 8 x 10 mm (d x h).

Figura 27 - Áreas de influência para 315° em 7 Hz e 10 Hz

Vento 315° - $V_m/V_{ref}$ - 7Hz						Vento 315° - $V_m/V_{ref}$ - 10Hz					
h (mm)	Eixo					h (mm)	Eixo				
	D	E	F	G	H		D	E	F	G	H
20	0.99	1.04	1.10	1.02	0.86	20	0.84	0.91	0.94	0.88	0.73
10	1.07	1.04	1.07	1.11	1.10	10	0.94	0.95	0.98	1.06	1.04
0	1.02	0.85	Edificação			0	0.87	0.79	Edificação		
-10		0.24				-10		0.21			
-20		0.18				-20		0.16			

(fonte: própria do autor)

Figura 28 - Áreas de influência para 315° em 13 Hz

Vento 315° - $V_m/V_{ref}$ - 13Hz					
h (mm)	Eixo				
	D	E	F	G	H
20	0.81	0.86	0.88	0.85	0.70
10	0.88	0.93	0.96	1.06	1.00
0	0.82	0.77	Edificação		
-10		0.21			
-20		0.16			

(fonte: própria do autor)

Tabela 24 - Valores médios da intensidade da turbulência para 315°

Vento 315° - Média das intensidades de turbulência					
h (m)	Eixo				
	D	E	F	G	H
20	27.42	25.66	24.13	24.71	27.01
10	26.53	24.67	23.25	20.87	21.47
0	32.20	34.93	Edificação		
-10		58.91			
-20		45.03			

**Legenda de cores:**

- $I_u < 10\%$
- $10 \leq I_u < 15$
- $15 \leq I_u < 20$
- $20 \leq I_u < 30$
- $30 \leq I_u < 40$
- $40 \leq I_u$

(fonte: própria do autor)

Com os dados das figuras acima, se consta que os valores normalizados de velocidade voltam a apresentar valores próximos de 1 e valor normalizado da turbulência mais próximo do valor recomendado pela IEC (2013), onde o efeito de esteira e vórtices apresentam menor intensidade.



## 7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A geração de energia eólica no topo de edificações apresenta potencial, embora com algumas ressalvas. Para uma geração de energia constante e eficiente, deve ser observada a orientação de maior incidência do vento, assim como a média anual de velocidade do vento, altura da edificação que visa o aproveitamento eólico e vizinhança.

Ventos com incidência de 45° e perpendiculares à fachada apresentaram um aumento de aproximadamente 40% da velocidade do vento em relação à velocidade referencial no centro da fachada, em todos os pontos acima da cota  $z' = 0$  m, além de apresentarem baixos valores de intensidade de turbulência. O ponto ótimo para geração está entre 0 e 3 m de altura em relação à aresta superior e entre 0 e 2,4 m da aresta para laje da cobertura para a maioria das velocidades incidentes do vento. Esses valores são favoráveis para pequenos aerogeradores de baixo custo, os quais trabalham em faixas de velocidades mais baixas.

No entanto ventos com incidência paralela à fachada confirmaram a grande turbulência nos pontos em análise e a grande perda de velocidade, de aproximadamente 50%, para os pontos acima da laje da cobertura da edificação.

Os dados contidos nesse trabalho permitem uma futura análise em relação ao melhor tipo de rotor a ser utilizado, assim como prever a potência gerada através de velocidades médias anuais e orientações com maior incidência de vento anual.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. [s. l.], 2017.
- ANEEL. **BIG - Banco de Informações de Geração do Brasil**. 2019. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 15 dez. 2019.
- BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das Construções**. 1. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2011.
- BLESSMANN, J. **O vento na engenharia estrutural**. 2. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2013.
- BP P.L.C. **BP Statistical Review of World Energy**The Editor **BP Statistical Review of World Energy**. London SW1Y 4PD. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>>.
- IEC. **IEC 61400-2:2013 - Wind turbines - Part 2: Small wind turbines**, International Electrotechnical Commission, 2013. Disponível em: <<https://webstore.iec.ch/publication/5433>>
- LOREDO-SOUZA, A. M.; OLIVEIRA, M. G. K. **Estudo Aerodinâmico das Características do Vento na Região do Heliponto do Empreendimento Odebrecht Henri Dunant** Estudo Aerodinâmico das Características do Vento na Região do Heliponto do Empreendimento Odebrecht Henri Dunant. Porto Alegre.
- LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. **IV Escola Primavera de Transição e Turbulência**, Porto Alegre, p. 137–163, 2004.
- NÚÑEZ, G. J. Z.; LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M. Uso do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico. **Design e Tecnologia**, [s. l.], v. 2, n. 04, p. 10–23, 2012.
- PETRY, A. P. **Análise Numérica de Escoamentos Turbulentos Tridimensionais Empregando o Método de Elementos Finitos e Simulação de Grandes Escalas**. 2002. UFRGS, [s. l.], 2002. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2479/000320326.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>
- SAHA, U. K.; THOTLA, S.; MAITY, D. Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [s. l.], v. 96, n. 8–9, p. 1359–1375, 2008.
- SCHNEIDER, P. S. **Medição de velocidade e vazão de fluidos**, UFRGS, 2011.

SMIL, V. **Energy Transitions: Global and National Perspectives**. 2nd. ed. [s.l.] : Praeger, 2016. Disponível em: <<http://vaclavsmil.com/2016/12/14/energy-transitions-global-and-national-perspectives-second-expanded-and-updated-edition/>>

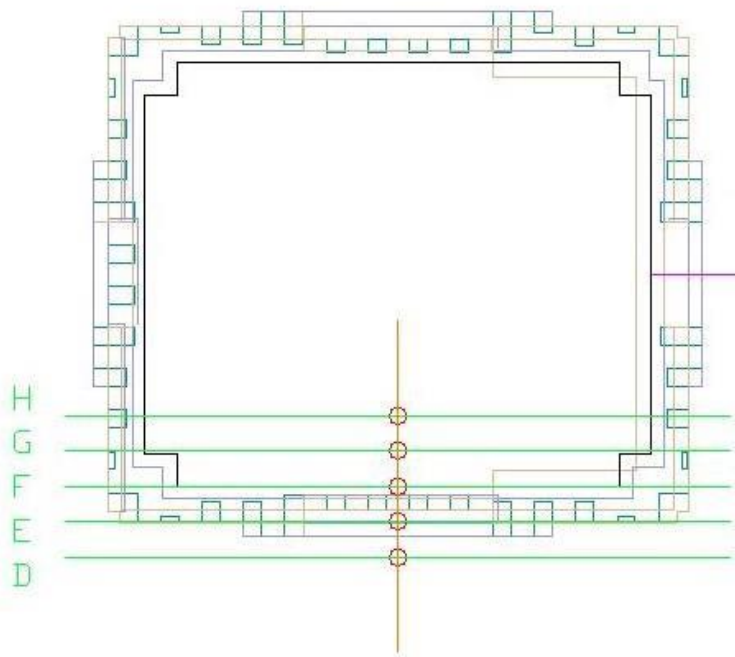
STATHOPOULOS, T.; ALRAWASHDEH, H. Urban Wind Energy: A Wind Engineering and Wind Energy Cross-Roads. In: **Lecture Notes in Civil Engineering**. [s.l.] : Springer, Cham, 2019. v. 27p. 3–16.

WILSON, A. The Folly of Building-Integrated Wind. **Environmental Building News**, [s.l.], v. 18, n. 5, p. 9–15, 2009. Disponível em: <<https://www.buildinggreen.com/feature/folly-building-integrated-wind>>

DAVENPORT, A. G.; IZYUMOV, N.; FIELD, J.D. **A wind tunnel evaluation of the U.S. Steel Building “heliport”**. 1968. Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory. The University of Western Ontario. Engineering Science Research Report. BLWT-1-68

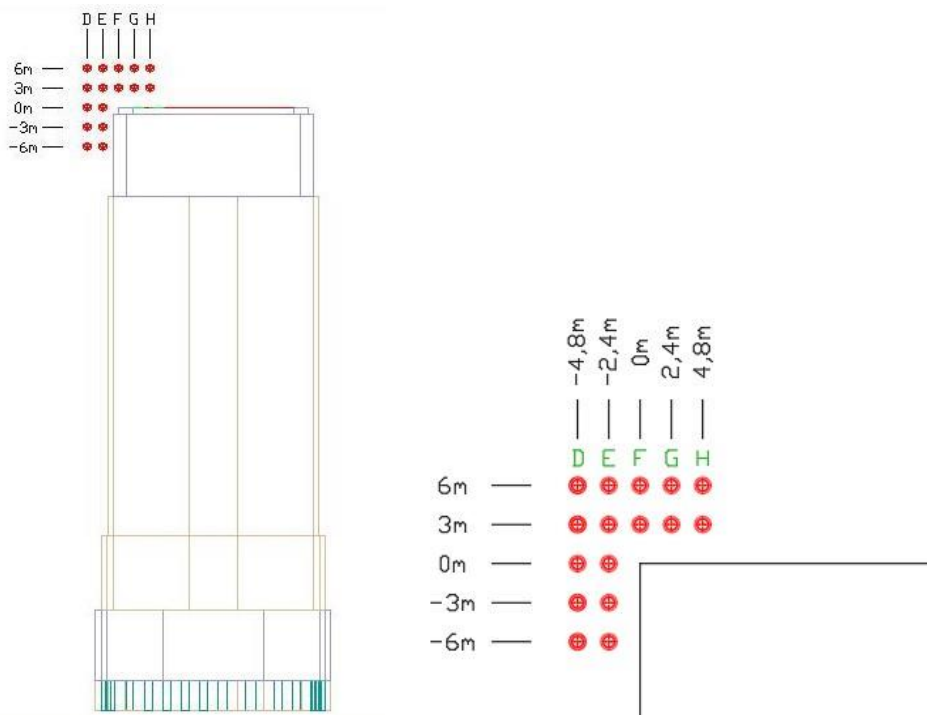
## **ANEXO A – Identificação dos pontos de medição no modelo**

Figura 29- Vista superior da edificação com a definição dos eixos



(fonte: própria do autor)

Figura 30 - Vista lateral da edificação e representação dos pontos de medição



(fonte: própria do autor)

## **ANEXO B – Fotografias do modelo reduzido no túnel de vento**

Figura 31 - Mesa na posição 180° e detalhes à barlavento



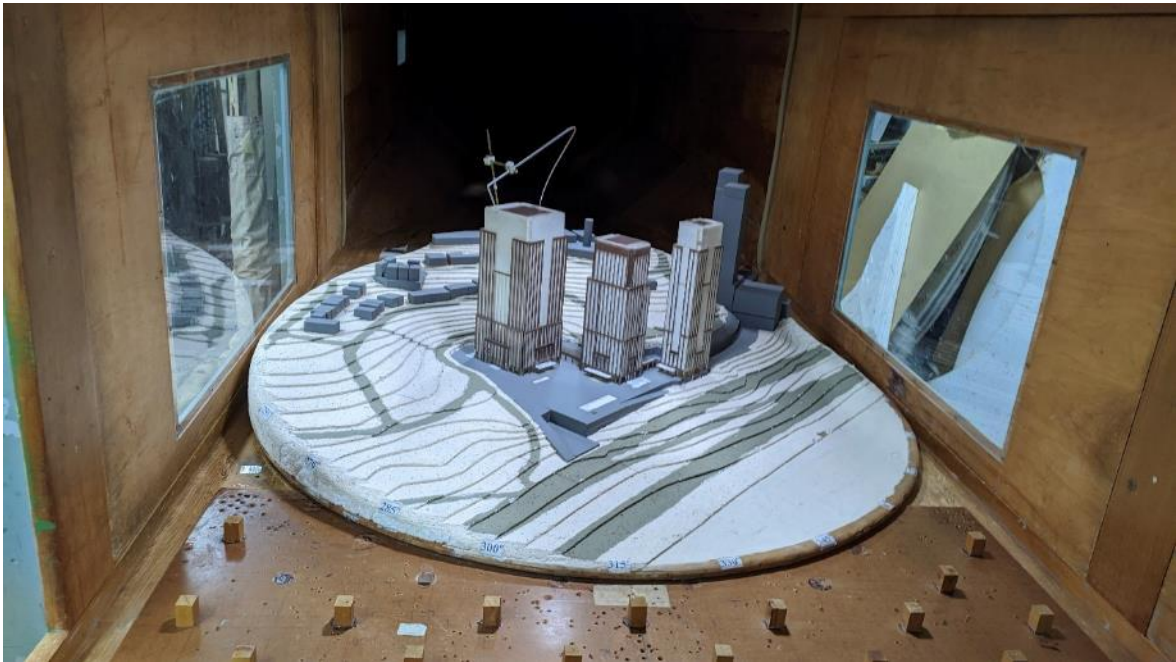
(fonte: própria do autor)

Figura 32 - Tubo de Pitot e mesa ao fundo na posição 180°



(fonte: própria do autor)

Figura 33 - Mesa na posição 225°



(fonte: própria do autor)

Figura 34 - Mesa na posição 270°



(fonte: própria do autor)



Figura 35 - Mesa na posição 315°



(fonte: própria do autor)