



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**MATHEUS DE ARAÚJO SIQUEIRA**

**ANÁLISE DA PERFORMANCE AERODINÂMICA DE UM  
TÚNEL DE VENTO PORTÁTIL UTILIZADO PARA  
ESTIMATIVA DA TAXA DE EMISSÃO DE GASES EM  
SUPERFÍCIES LÍQUIDAS**

**VITÓRIA  
2017**

MATHEUS DE ARAÚJO SIQUEIRA

**ANÁLISE DA PERFORMANCE AERODINÂMICA DE UM  
TÚNEL DE VENTO PORTÁTIL UTILIZADO PARA  
ESTIMATIVA DA TAXA DE EMISSÃO DE GASES EM  
SUPERFÍCIES LÍQUIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Departamento de Engenharia Ambiental do  
Centro Tecnológico da Universidade Federal  
do Espírito Santo, como requisito parcial para  
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
Ambiental.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Jane Méri Santos

Coorientador: Dr Ramon Silva Martins

VITÓRIA  
2017

# Agradecimentos

Agradeço ao Deus, Pai, Filho e Espírito Santo, por me incluir em seus planos e me nutrir com fé para seguir em frente.

A minha mãe, Eliane de Araújo Siqueira, por dedicar sua vida a nós, seus filhos e ser um grande exemplo de garra, persistência e amor perante a vida.

As minhas irmãs, Mariana e Mônica, pela grande ajuda e companheirismo ao longo desses anos. Ao meu querido sobrinho Giovanni pela amizade e as boas risadas.

A Mariana, pelo amor, companheirismo incondicional e pela paciência e compreensão ao longo desses anos de engenharia.

À minha orientadora Jane, pela oportunidade, ensinamentos e guiar o trabalho.

Ao meu coorientador Ramon, por todos os ensinamentos e ajuda sempre presente ao longo deste trabalho.

A todos os colegas do NQualiar, pessoas com quem aprendi e tornaram a minha estadia no laboratório mais agradável.

Ao professor do Instituto Federal do Espírito Santo, José Eduardo Rigo, pelo apoio técnico.

A todos os professores da Universidade Federal do Espírito Santo com quem tive o prazer de ter aulas.

A Universidade Federal do Espírito Santo, pela minha formação.

A todos os meus grandes amigos, pelo companheirismo e boas risadas.

A todos os que ajudam e me ajudaram nessa caminhada.

## Resumo

As emissões de gases para a atmosfera provenientes de fontes de área, ou seja, extensas superfícies sólidas ou líquidas, nas quais ocorre emissão de um determinado composto químico, como aterros sanitários, tanques e lagoas em estações de tratamento de esgotos (ETE) são fontes significativas de compostos odorantes e compostos orgânicos voláteis (COV). Os efeitos deletérios desses odorantes são diversos, tais como: depleção do ozônio estratosférico, contribuições para o aquecimento global e danos diretos a pessoa exposta, como desconforto, dores de cabeça e até problemas respiratórios, como ocorre para os COV. Atualmente, para realizar a medição desses gases em fontes de área são utilizados diferentes aparatos, que estimam diferentes taxas de emissão. Diante da diferença nos resultados, engenheiros se deparam com o seguinte questionamento: “*Qual destes equipamentos provem o resultado correto?*”. Para responder a esta questão é necessário saber que a capacidade do método de fornecer os resultados mais próximos a realidade está diretamente relacionado a sua capacidade de reproduzir de forma mais acurada e precisa o possível o escoamento atmosférico. Dessa forma, o bom desempenho aerodinâmico do aparato de medição se torna um parâmetro crítico para o seu bom funcionamento. Assim, o objetivo deste trabalho consiste em analisar a performance aerodinâmica do túnel de vento portátil desenvolvido pela University of New South Wales (UNSW) para quantificação da emissão de poluentes em superfícies sólidas ou líquidas quiescentes, por meio da solução numérica das equações fundamentais de transporte que regem o escoamento no interior do aparato. Os efeitos turbulentos foram incorporados utilizando o modelo  $k - \omega$  SST. O método de volumes finitos por meio do software ANSYS Fluent foi utilizado para a solução numérica das equações envolvidas. A partir do resultado obtido, mudanças na geometria do aparato foram propostas. A análise das linhas de corrente, perfis, vetores e contorno de velocidade no interior do equipamento mostraram que a presença da curva no duto de entrada e placa retificadora de fluxo promovem escoamento complexo. Dessa forma, foi testada a substituição da curva no duto de entrada por um duto reto e a adição de um condicionador de fluxo extra depois da curva a  $180^\circ$  no duto de entrada. Os resultados mostraram que tais mudanças promoveram certa melhoria na uniformidade do escoamento, porém, a placa retificadora de fluxo permanecendo nas configurações propostas continua afetando, de forma negativa, a uniformidade do escoamento na seção central do túnel de vento.

# Lista de Figuras

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | Representação esquemática da transferência de massa entre as fases líquida e gasosa. . . . .  | 12 |
| 2  | Ilustração do funcionamento de um equipamento de medição direta de emissão de compostos odorantes em uma superfície líquida quiescente. . . .   | 14 |
| 3  | Câmara de Fluxo Dinâmica recomendada pela US EPA: (a) equipamento em uso; e (b) desenho esquemático contendo os seus principais componentes.  | 15 |
| 4  | Desenhos técnicos do Túnel de Vento projetado por Jiang et al. (1995) [mm]: (a) visão isométrica; e (b) vista superior e lateral. . . . .   | 17 |
| 5  | Túnel de vento projetado pela UNSW em funcionamento. . . . .  | 17 |
| 6  | Decomposição da velocidade em sua média e sua flutuação em escoamento turbulento. . . . .   | 22 |
| 7  | Malha e geometria construídas no ANSYS DesignModeler e ANSYS Meshing: (a) Desenho 3D do túnel de vento projetado pela UNSW e (b) Malha utilizada no túnel de vento. . . . .                   | 26 |
| 8  | Linhas de corrente para o case base. . . . .  | 27 |
| 9  | Imagem detalhada das linhas de corrente para a região próxima a entrada do túnel de vento (caso base) . . . . .   | 27 |
| 10 | Imagem detalhada das linhas de corrente para a região do túnel de vento com a placa retificadora de fluxo (caso base). . . . .  | 28 |
| 11 | Imagem detalhada das linhas de corrente para a seção central do túnel de vento (caso base). . . . .   | 28 |
| 12 | Pontos de coleta dos perfis de velocidade. . . . .  | 29 |
| 13 | Perfis de velocidade para os pontos $P_1$ , $P_2$ e $P_3$ , localizados entrada da seção central do túnel de vento: (a) Componente $u$ ; (b) Componente $v$ ; e (c) Componente $w$ . . . . .  | 30 |
| 14 | Perfis de velocidade para os pontos $P_4$ , $P_5$ e $P_6$ , localizados no meio da seção central do túnel de vento: (a) Componente $u$ ; (b) Componente $v$ ; e (c) Componente $w$ . . . . .  | 30 |
| 15 | Perfis de velocidade para os pontos $P_7$ , $P_8$ e $P_9$ , localizados na saída da seção central do túnel de vento: (a) Componente $u$ ; (b) Componente $v$ ; e (c) Componente $w$ . . . . . | 30 |
| 16 | Proposta de geometria alternativa para o caso real. . . . .   | 31 |
| 17 | Malha construída para o caso alternativo. . . . .   | 31 |
| 18 | Segunda proposta de geometria alternativa, contendo um retificador de fluxo extra. . . . .  | 32 |
| 19 | Imagem em detalhe do retificador de fluxo extra proposto para geometria alternativa 2. . . . .  | 32 |
| 20 | Malha construída para a segunda proposta de geometria alternativa. . . .  | 33 |
| 21 | Linhas de corrente caso 1. . . . .  | 34 |
| 22 | Detalhes das linhas de corrente junto a placa retificadora de fluxo (caso 1).   | 34 |
| 23 | Detalhes das linhas de corrente para a seção central (caso 1). . . . .  | 35 |
| 24 | Linhas de corrente (caso 2) . . . . .   | 35 |
| 25 | Detalhe das linhas de corrente para a segunda proposta de geometria alternativa: (a) Novo retificador de fluxo; (b) Retificador de fluxo já constante no caso base. . . . .                   | 36 |
| 26 | Visão superior das linhas de corrente (caso 2). . . . .   | 36 |

|    |  |    |
|----|--|----|
| 27 | Perfis de velocidade (componente $u$ ), localizados na região próxima a entrada da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto $P_1$ ; (b) Ponto $P_2$ ; e (c) Ponto $P_3$ . . . . . | 36 |
| 28 | Perfis de velocidade (componente $u$ ), localizados no meio da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto $P_4$ ; (b) Ponto $P_5$ ; e (c) Ponto $P_6$ . . . . .                     | 37 |
| 29 | Perfis de velocidade (componente $u$ ), localizados na região próxima a saída da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto $P_7$ ; (b) Ponto $P_8$ ; e (c) Ponto $P_9$ . . . . .   | 37 |
| 30 | Vetores velocidade plotados nos planos $x = 10\text{ cm}$ , $x = 40\text{ cm}$ e $x = 70\text{ cm}$ : (a) Caso base; (b) Caso 1; e (c) Caso 2 . . . . .  | 38 |
| 31 | Vista lateral dos vetores velocidade plotados nos planos $x = 10\text{ cm}$ , $x = 40\text{ cm}$ e $x = 70\text{ cm}$ : (a) Caso base; (b) Caso 1; e (c) Caso 2 . . . . .  | 38 |
| 32 | Localização dos contornos de velocidade analisados neste trabalho, após o duto de entrada. . . . .   | 39 |
| 33 | Contornos de velocidade na saída do duto de entrada para os 3 casos: (a) Caso base; (b) Caso 1; e (c) Caso 2 . . . . .   | 39 |
| 34 | Localização dos perfis de velocidade utilizados para executar o teste de malhas . . . . .  | 45 |
| 35 | Perfis de velocidade no ponto $P_4$ para as malhas $Me_3$ (azul), $Me_2$ (verde) e $Me_1$ (vermelha), divididos em suas componentes $u$ , $v$ e $w$ . . . . .  | 45 |
| 36 | Perfis de velocidade no ponto $P_5$ para as malhas $Me_3$ (azul), $Me_2$ (verde) e $Me_1$ (vermelha), divididos em suas componentes $u,v$ e $w$ . . . . .  | 46 |
| 37 | Perfis de velocidade no ponto $P_6$ para as malhas $Me_3$ (azul), $Me_2$ (verde) e $Me_1$ (vermelha), divididos em suas componentes $u,v$ e $w$ . . . . .  | 46 |
| 38 | Perfis de velocidade, componente $v$ , localizados na região próxima a entrada da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto $P_1$ ; (b) Ponto $P_2$ ; e (c) Ponto $P_3$ . . . . .  | 47 |
| 39 | Perfis de velocidade, componente $v$ , localizados no meio da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto $P_4$ ; (b) Ponto $P_5$ ; e (c) Ponto $P_6$ . . . . .                      | 47 |
| 40 | Perfis de velocidade, componente $v$ , localizados na região próxima a saída da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto $P_7$ ; (b) Ponto $P_8$ ; e (c) Ponto $P_9$ . . . . .    | 48 |
| 41 | Perfis de velocidade, componente $w$ , localizados na região próxima a entrada da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto $P_1$ ; (b) Ponto $P_2$ ; e (c) Ponto $P_3$ . . . . .  | 48 |
| 42 | Perfis de velocidade, componente $w$ , localizados no meio da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto $P_4$ ; (b) Ponto $P_5$ ; e (c) Ponto $P_6$ . . . . .                      | 48 |
| 43 | Perfis de velocidade, componente $w$ , localizados na região próxima a saída da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto $P_7$ ; (b) Ponto $P_8$ ; e (c) Ponto $P_9$ . . . . .    | 49 |
| 44 | Localização dos três conjuntos de pontos utilizados para calcular as três distribuições de velocidade, localizadas em $x = 200\text{ mm}$ , $x = 400\text{ mm}$ , $x = 600\text{ mm}$ , respectivamente. . . . .                     | 50 |
| 45 | Gráficos de distribuições de velocidade horizontal para a seção central do túnel de vento, localizados em: (a) $x=200$ ; (b) $x=400$ e (c) $x=600$ . . . . .   | 50 |
| 46 | Gráficos de distribuições de velocidade vertical para a seção central do túnel de vento, localizados em: (a) $x=200$ ; (b) $x=400$ e (c) $x=600$ . . . . .   | 51 |

## Lista de Tabelas

|   |   |    |
|---|---|----|
| 1 | Critérios adotados para regulamentar a emissão de compostos odorantes de acordo com o país. . . . . | 9  |
| 2 | Utilizações em diferentes contextos da câmara de fluxo recomendada pela epa. . . . .                | 16 |
| 3 | Utilizações em diferentes contextos do túnel de vento projetado pela UNSW. . . . .                  | 19 |
| 4 | Condições de contorno aplicadas. . . . .  | 25 |
| 5 | Métodos de solução . . . . .  | 25 |
| 6 | Números de pontos nodais das malhas utilizadas no teste de malhas. . . . .                          | 45 |

# Lista de Símbolos

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| $A$                               | Área de superfície emissora coberta pelo equipamento                                       |
| $C$                               | Concentração do composto no ar amostrado [massa/volume]                                    |
| $C$                               | Concentração do composto no meio [massa/volume]  |
| $C_G$                             | Concentração do composto na fase gasosa [massa/volume]                                     |
| $C_L$                             | Concentração do composto na fase líquida [massa/volume]                                    |
| $C_{G,i}$                         | Concentração do composto na fase líquida, adjacente à interface gás-líquido [massa/volume] |
| $C_{L,i}$                         | Concentração do composto na fase líquida, adjacente à interface gás-líquido [massa/volume] |
| $C_\mu$                           | Constante empírica do modelo $k - \varepsilon$   |
| $D$                               | Difusividade molecular do composto no meio [área/tempo]                                    |
| $D_G$                             | Difusividade molecular do composto na fase gasosa [área/tempo]                             |
| $D_L$                             | Difusividade molecular do composto na fase líquida [área/tempo]                            |
| $E$                               | Taxa de emissão [massa/área-tempo]   |
| $J$                               | Fluxo de massa do composto por unidade de área [massa/área-tempo]                          |
| $J_G$                             | Fluxo de massa do composto que atravessa o filme gasoso [massa/área-tempo]                 |
| $J_L$                             | Fluxo de massa do composto que atravessa o filme líquido [massa/área-tempo]                |
| $K_H$                             | Constante da lei de Henry em sua forma adimensional  |
| $K_L$                             | Coefficiente global de transferência de massa da fase líquida [comprimento/tempo]          |
| $P$                               | Pressão [força/área]   |
| $Q$                               | Vazão de ar que passa pelo equipamento [volume/tempo]                                      |
| $d_G$                             | Espessura do filme gasoso [comprimento]  |
| $d_L$                             | Espessura do filme líquido [comprimento]   |
| $g_i$                             | Aceleração da gravidade na direção $i$ [comprimento/tempo <sup>2</sup> ]                   |
| $k$                               | Energia cinética turbulenta [área/tempo <sup>2</sup> ]                                     |
| $k_G$                             | Coefficiente de transferência de massa da fase gasosa [comprimento/tempo]                  |
| $k_L$                             | Coefficiente de transferência de massa da fase líquida [comprimento/tempo]                 |
| $u_i$                             | Componente da velocidade na direção $i$ [comprimento/tempo]                                |
| $\bar{u}$                         | Velocidade média [comprimento/tempo]   |
| $u'(t)$                           | Variação da velocidade em torno da média [comprimento/tempo]                               |
| $\beta_1, \beta_2, \beta^*$       | Constantes empíricas do modelo $k - \omega SST$  |
| $\gamma_1, \gamma_2$              | Constantes empíricas do modelo $k - \omega SST$  |
| $\delta_{i,j}$                    | Operador delta de Kronecker  |
| $\varepsilon$                     | Transporte da dissipação da energia cinética turbulenta [área/tempo <sup>3</sup> ]         |
| $\eta$                            | Fração mássica do composto no meio [massa/massa]   |
| $\mu$                             | Viscosidade dinâmica do fluido [força/área-tempo]  |
| $\mu_T$                           | Viscosidade turbulenta [força/área-tempo]  |
| $\rho$                            | Massa específica do meio [massa/volume]  |
| $\sigma_{k,1}, \sigma_{\omega,1}$ | Constantes empíricas do modelo $k - \omega SST$  |
| $\sigma_{k,2}, \sigma_{\omega,2}$ | Constantes empíricas do modelo $k - \omega SST$  |
| $\tau_{ij}$                       | Tensor das tensões [força/área]  |
| $\nu_t$                           | Viscosidade cinemática turbulenta [área/tempo]   |
| $\omega$                          | Transporte da dissipação específica [área/tempo <sup>3</sup> ]                             |



# Sumário

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Sumário</b>  | <b>7</b>  |
| <b>1 Introdução</b>   | <b>8</b>  |
| <b>2 Objetivo</b>   | <b>11</b> |
| <b>3 Revisão da Literatura</b>  | <b>12</b> |
| 3.1 Volatilização . . . . .   | 12        |
| 3.1.1 Teoria dos dois filmes . . . . .                                      | 12        |
| 3.2 Estratégias de Medição de Compostos Odorantes em Fontes de Área . . . . | 14        |
| 3.2.1 Câmara de Fluxo Dinâmica . . . . .                                    | 15        |
| 3.2.2 Túnel de Vento . . . . .  | 16        |
| <b>4 Metodologia</b>  | <b>21</b> |
| 4.1 O Problema de Fechamento . . . . .                                      | 22        |
| 4.2 Modelagem da Viscosidade Turbulenta . . . . .                           | 23        |
| 4.3 Condições de Contorno . . . . .   | 25        |
| 4.4 Métodos de Solução . . . . .  | 25        |
| 4.5 Método Numérico . . . . .   | 25        |
| 4.6 Domínio Computacional e Malha . . . . .                                 | 26        |
| 4.6.1 Teste de Malha . . . . .  | 26        |
| <b>5 Resultados</b>   | <b>27</b> |
| 5.1 Caso Base . . . . .   | 27        |
| 5.2 Propostas de Geometrias Alternativas . . . . .                          | 31        |
| 5.2.1 Geometria Alternativa 1 . . . . .                                     | 31        |
| 5.2.2 Geometria Alternativa 2 . . . . .                                     | 32        |
| 5.3 Análise dos Resultados das Propostas Alternativas . . . . .             | 33        |
| <b>6 Conclusão</b>  | <b>40</b> |
| <b>7 Sugestões para Trabalho Futuros</b>                                    | <b>41</b> |
| <b>Referências Bibliográficas</b>   | <b>42</b> |
| <b>Apêndice A</b>   | <b>45</b> |
| <b>Apêndice B</b>   | <b>47</b> |
| <b>Apêndice C</b>   | <b>50</b> |

# 1 Introdução

O termo odor faz referência a experiência de percepção, quando um ou mais compostos químicos vem ao contato dos receptores, através do estímulo dos nervos olfativos (Loriato et al., 2012). A medida que a sua concentração aumenta, a pessoa exposta pode: detectar, reconhecer, para, depois então se sentir desconfortável.

As emissões de gases para a atmosfera provenientes de fontes de área como aterros sanitários, tanques e lagoas em estações de tratamento de esgotos (ETE) são fontes significativas de compostos odorantes e compostos orgânicos voláteis (COV) (Latos et al., 2011). Tais compostos causam, desde mau odor até depleção do ozônio estratosférico e contribuições para o aquecimento global, como destacam Durmusoglu et al. (2005), para o COV. Os compostos odorantes podem causar diversas reações adversas à pessoa exposta, tais como desconforto, dores de cabeça, irritações sensoriais, até problemas respiratórios, náuseas e vômitos, como aponta o National Research Council (1979).

De acordo com o Conselho Nacional de Meio Ambiente (1990), poluentes atmosféricos são definidos como qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração tempo ou características em desacordo com níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

- Impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;
- Inconveniente ao bem-estar público;
- Danoso aos materiais, à fauna e à flora;
- Prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

Apesar da legislação federal não abordar especificamente o assunto, os estados, de forma independente, adotam legislações específicas. Por exemplo, especificamente no município de Vitória/ES, é vedada a emissão de odores que possam causar incômodo a população exposta, a partir do artigo 91, inciso IV, do Código Municipal de Meio Ambiente (Lei no 4438, de 28 de maio de 1997). A Tabela 1 exemplifica os critérios adotados para regulamentar a emissão de compostos odorantes de acordo com diversos países.

Tabela 1: Critérios adotados para regulamentar a emissão de compostos odorantes de acordo com o país.

| <b>Países/Regiões</b>          | <b>Critérios</b>   |
|--------------------------------|--|
| Alemanha                       | Distância mínima, duração e frequência, intensidade do odor, prevenção do incômodo, quantitativo de emissões e melhor tecnologia |
| Austrália                      | Concentração de odor, concentração do composto, distância mínima, reclamações e melhor tecnologia                                |
| Brasil                         | Concentração do composto, distância mínima, prevenção do incômodo e quantitativo de emissões                                     |
| Califórnia                     | Concentração de odor, concentração do composto, quantitativo de emissões e reclamações   |
| Comitê Europeu de Normalização | Concentração de odor   |
| Dinamarca                      | Quantitativo de emissões   |
| Escócia                        | Melhor tecnologia  |
| Estados Unidos (42 estados)    | Prevenção do incômodo  |
| França                         | Quantitativo de emissões   |
| Holanda                        | Intensidade do odor, prevenção do incômodo, quantitativo de emissões   |
| Japão                          | Concentração de odor, índice de odor, quantitativo de emissões   |
| Minnesota                      | Concentração do composto   |
| Nova Zelândia                  | Distância mínima, duração e frequência, intensidade do odor, prevenção do incômodo, quantitativo de emissões e reclamações       |
| Ontário                        | Distância mínima   |
| Suíça                          | Quantitativo de emissões e reclamações   |
| Washington                     | Concentração de odor e melhor tecnologia   |

Para estimar as taxas de emissão de poluentes em fontes de área, além dos modelos de emissão semi-empíricos (Melo de Sá, 2011), são utilizados principalmente, dois métodos: os indiretos e os diretos. Nos métodos indiretos, a taxa de emissão é obtida a partir da análise das condições meteorológicas e das concentrações do poluente a jusante da fonte emissora (Hudson and Ayoko, 2008a), por meio da utilização inversa de modelos de dispersão atmosférica. Já nos métodos diretos, são utilizados equipamentos que confinam as emissões e a taxa de emissão é calculada por meio das concentrações medidas em sucessivas amostras dos gases (Hudson and Ayoko, 2008a). Em comparação com os métodos indiretos, os diretos apresentam menor custo e permitem quantificar taxas de emissões para localizações específicas na superfície emissora (Fernandes, 2016).

Dentre os equipamentos utilizados no método direto para medir taxas de emissão, os túneis de vento portáteis vem sendo empregados em diversos estudos científicos, tais como: Capelli et al. (2009), Hudson et al. (2009), Hudson (2009), Blanes-Vidal et al. (2012), Parker et al. (2013) e Prata Jr et al. (2014). Dessa maneira, Jiang et al. (1995) desenvolveu um túnel de vento, projetado aerodinamicamente com o objetivo de criar um ambiente com camada limite bem desenvolvida, simulando condições de escoamento

paralelo a superfície emissora.

A capacidade do equipamento em representar o escoamento atmosférico na superfície líquida ou sólida é de suma importância para a acurada medição das taxas de emissão, como apontam Hudson and Ayoko (2008b). Ainda, de acordo com Jiang et al. (1995), o desempenho aerodinâmico de um túnel de vento é um parâmetro crítico para o seu bom funcionamento. Dessa forma, se faz necessário conhecer o comportamento aerodinâmico no interior do túnel de vento, para que o mesmo possa ser avaliado de forma precisa e possíveis mudanças em sua geometria possam ser propostas.

A fim de se realizar simulações numéricas de fluidodinâmica em diversos empreendimentos de engenharia são utilizadas técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (*computational fluid dynamics* - CFD), que são baseadas na resolução numérica das equações de transporte (massa, quantidade de movimento, energia e concentração da substância), já que não apresentam solução analítica (Versteeg and Malalasekera, 2007).

## 2 Objetivo

O presente estudo tem por objetivo simular numericamente o escoamento no interior do túnel de vento projetado pela *University of New South Wales* (UNSW) a fim de propor alterações dos parâmetros construtivos para melhoria da representação do escoamento de camada limite atmosférica no interior do aparato.

## 3 Revisão da Literatura

### 3.1 Volatilização

De acordo com a lei de Henry, em condições ideais de equilíbrio, a distribuição de um composto entre as fases gás-líquido obedece a uma determinada proporção, dependente de diversos fatores, tais como a temperatura, de acordo com a equação abaixo:

$$K_H = \frac{C_G}{C_L} \quad (1)$$

Onde  $K_H$  é a constante da lei de Henry em sua forma adimensional,  $C_G$  a concentração do composto em questão na fase gasosa e  $C_L$  é a concentração na fase líquida.

A situação em que a relação existente na equação (1) é obedecida é chamada de equilíbrio dinâmico, ou seja, o transporte através da fase gás-líquido é compensado pelo transporte entre a fase líquido-gás, de modo que a relação é mantida constante. Porém, existem situações em que tal equilíbrio não é obtido, ou seja, ocorre um transporte efetivo entre as fases líquida e gasosa. Mesmo em situações que ocorrem tal transporte, considera-se que na interface gás-líquido o equilíbrio ocorre de maneira instantânea (Chao et al., 2005). A Lei de Henry nessas situações toma a seguinte forma:

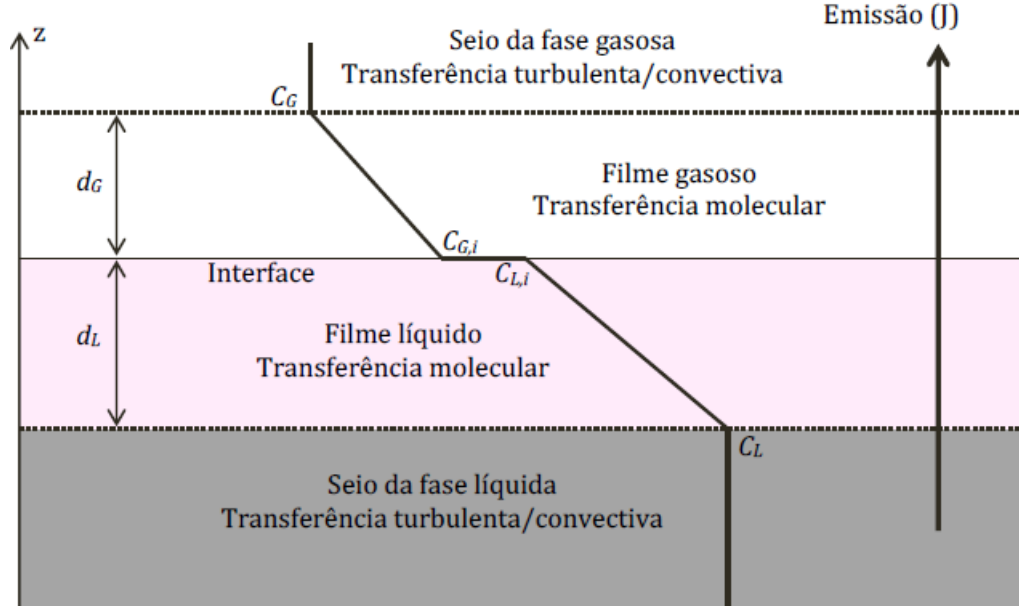
$$K_H = \frac{C_{G,i}}{C_{L,i}} \quad (2)$$

Onde  $C_{G,i}$  e  $C_{L,i}$  são as concentrações nas fases gasosa e líquida, respectivamente, adjacentes à interface gás-líquido.

#### 3.1.1 Teoria dos dois filmes

O modelo da teoria dos dois filmes, originalmente apresentado por Lewis and Whitman (1924), está baseado na concepção de que, adjacentes à interface gás-líquido, se formam duas finas camadas, uma na fase líquida e outra na fase gasosa, como mostrado na Figura 1. O transporte de massa através dessas camadas ocorre por meio da difusão molecular, havendo um gradiente de concentração ao longo de cada um deles. Tal situação é válida para superfícies líquidas quiescentes.

Figura 1: Representação esquemática da transferência de massa entre as fases líquida e gasosa.



Fonte: Santos et al. (2012)

É considerado que, no seio da fase gasosa e no seio da fase líquida, a turbulência e/ou a transferência de massa convectiva são intensos o suficiente para fazer com que não exista gradiente de concentração significativo, de maneira que a resistência associada aos filmes é o fator limitante da transferência de massa entre eles.

Por meio da Lei de Fick, equaciona-se a difusão molecular de um composto no interior de um meio. Para o caso em questão, o equacionamento fica na forma da equação 3.

$$J = -\rho D \frac{\partial \eta}{\partial z} = -D \frac{\partial C}{\partial z} \quad (3)$$

Onde  $J$  é o fluxo de massa do composto em questão;  $\rho$  é a massa específica do meio;  $D$  é a difusividade molecular do composto no meio;  $\eta$  é a fração mássica do composto no meio e  $C$  é a concentração do composto no meio.

Considerando que a espessura do filme seja pequena o suficiente para que possa ser aproximada por um perfil linear de concentração, a equação (3) ao longo do filme gasoso toma a forma da equação (4).

$$J_G = D_G \frac{(C_G - C_{G,i})}{d_G} = k_G (C_{G,i} - C_G) \quad (4)$$

Onde  $J_G$  é o fluxo de massa do composto em questão que atravessa a fase gasosa;  $D_G$  é a difusividade molecular do composto na fase gasosa;  $d_G$  é a espessura do filme gasoso;  $k_G = D_G/d_G$  é a espessura do filme gasoso e  $k_G$  é o coeficiente de transferência de massa da fase gasosa.

Da mesma maneira, a equação (3) ao longo do filme líquido se tornará:

$$J_L = -D_L \frac{(C_L - C_{L,i})}{d_L} = k_L (C_{L,i} - C_L) \quad (5)$$

Onde  $J_L$  é o fluxo de massa do composto em questão, que atravessa a fase líquida;  $D_L$  é a difusividade do composto na fase líquida;  $d_L$  é a espessura do filme líquido e  $k_L = \frac{D_L}{d_L}$  é o coeficiente de transferência de massa da fase líquida.

Uma vez que não há consumo nem produção do composto na região dos filmes, o fluxo de massa que atravessa o filme gasoso ( $J_G$ ) é igual ao fluxo de massa que atravessa o filme líquido ( $J_L$ ). Portanto, igualando as equações (4) e (5), tem-se que:

$$J = k_G(C_{G,i} - C_G) = k_L(C_{L,i} - C_L) \quad (6)$$

A partir da Lei de Henry (Equação (2)), tem-se:  $C_{G,i} = K_H C_{L,i}$ . Fazendo a substituição dessa expressão na Equação (5), tem-se:

$$C_{L,i} = \frac{k_L C_L + k_G C_G}{k_G K_H + k_L} \quad (7)$$

Substituindo a expressão acima, novamente na equação (6), chega-se a:

$$J = \frac{k_L k_G}{k_G + \frac{k_L}{K_H}} (C_L - \frac{C_G}{K_H}) \quad (8)$$

Onde  $K_L$  é o coeficiente global de transferência de massa da fase líquida, sendo:

$$K_L = \frac{k_L k_G}{k_G \frac{k_L}{K_H}} \quad (9)$$

ou ainda:

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{k_G K_H} \quad (10)$$

Os termos  $\frac{1}{k_L}$  e  $\frac{1}{K_L}$  na equação acima representam as resistências dos filmes gasoso e líquido, respectivamente. Portanto, o termo  $\frac{1}{k_G K_H}$  representa a resistência global à transferência de massa entre as fases.

Vale ainda ressaltar que a direção na qual ocorrerá a transferência de massa, ou seja, volatilização no sentido líquido-gás e solubilização no sentido gás-líquido, é determinada pelo sinal de  $J$ , de tal forma que se este for positivo ocorre a volatilização, ao passo que sendo negativo, ocorre a solubilização.

### 3.2 Estratégias de Medição de Compostos Odorantes em Fontes de Área

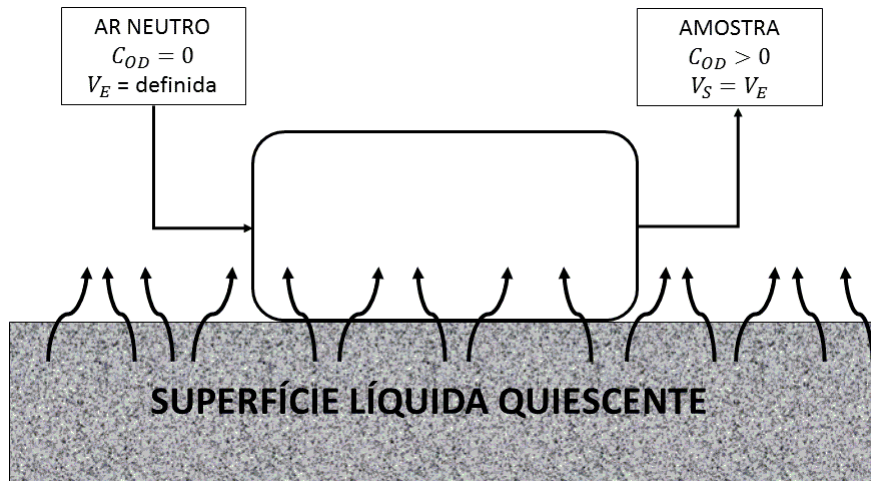
De acordo com a norma alemã VDI 3880 (2011), as fontes de área são definidas como extensas superfícies sólidas ou líquidas, nas quais ocorre emissão de um determinado composto químico. Devido ao fato da emissão se dar em toda a região considerada, existe a dificuldade de cobrir toda a superfície emissora, se fazendo necessário adotar uma cobertura parcial (Bockreis and Steinberg, 2005). Alguns fatores influenciam a escolha da porção coberta, dentre eles se destacam a precisão desejada, tamanho total da área, recursos financeiros e relevância dos resultados (Frechen, 2004).

Como discutido anterior na seção 1, são utilizadas basicamente duas abordagens para estimativa da taxa de emissão em fontes de área: as medições diretas e indiretas. Na primeira, é utilizado um equipamento de medição (normalmente um túnel de vento ou uma câmara de fluxo) que enclausura uma determinada porção da área de interesse e a medição é feita direta na fonte. Na segunda abordagem, são utilizados métodos micro-meteorológicos e a taxa de emissão é encontrada por meio do uso reverso do modelo de dispersão a partir das medições dos perfis de concentração a jusante da fonte emissora (Hudson and Ayoko, 2008a).



A Figura 2 ilustra o funcionamento de um equipamento de medição direta, tomando como exemplo a emissão a partir de uma superfície líquida quiescente. O ar neutro com concentração de odorantes  $C_{OD}$  nula e velocidade conhecida adentra a região enclausurada, onde ocorre a emissão de compostos odorantes e a amostragem dos gás contaminado no interior do arapato é realizada (Capelli et al., 2013).

Figura 2: Ilustração do funcionamento de um equipamento de medição direta de emissão de compostos odorantes em uma superfície líquida quiescente.



Fonte: Capelli et al. (2013).

O cálculo da taxa de emissão é realizado de acordo com a seguinte equação:

$$E = \frac{C \cdot Q}{A} \quad (11)$$

Apesar da aparente facilidade no cálculo e descomplicada aplicação dos equipamentos de medição direta, o uso em campo destes diferentes equipamentos mostra problemas. De acordo com as medições realizadas por Jiang et al. (1995) e Wang et al. (2001), em áreas de confinamento de animais, lagoas de retenção de resíduos provenientes da alimentação de animais e lagoas anaeróbias para tratamento de dejetos suínos, os resultados obtidos variaram em um fator de 1:100 (Hudson and Ayoko, 2008a). Tais variações ocorrem principalmente devido aos diferentes formas e tamanhos que os equipamentos de medição possuem. O ideal é que no interior do equipamento, o escoamento seja o mais próximo ao que ocorre na natureza, com intuito de que a emissão seja também a mais próxima à real (Hudson and Ayoko, 2008b; Eklund, 1992).

Em relação ao uso de técnicas indiretas, tal como a micrometeorológica, estas não causam perturbação no processo de emissão, uma vez que não são utilizados dispositivos que enclausuram a área de estudo. No entanto, o grande número de amostras necessárias para caracterizar a pluma emitida (perfis verticais e horizontais ao longo da direção do vento) e o seu custo/tempo associados tornam esta técnica inviável, principalmente para aplicações em que a medição da taxa de emissão é feita de forma recorrente, tais como as medições realizadas por agências de controle ambiental. Desta forma, as técnicas diretas para medição de taxas de emissão em fontes de área ainda são mais utilizadas (Sohn et al., 2005).

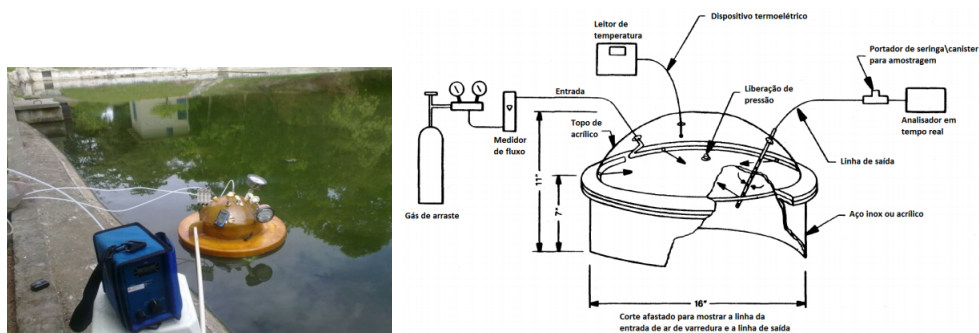
### 3.2.1 Câmara de Fluxo Dinâmica

A técnica da câmara de fluxo foi inicialmente desenvolvida com o intuito de medir emissões biogênicas de gases inorgânicos em superfícies sólidas (Eklund, 1992). Na década de 80, a

Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana (*United States Environmental Protection Agency – US EPA*) se interessou pela metodologia para medir taxas de emissão de COVs pelo solo, financiando uma série de projetos para desenvolver e avaliar a metodologia. Então, em 1986, a US EPA desenvolveu um manual com orientações de construção e operação da câmara de fluxo (Eklund, 1992; Klenbusch, 1986). Mais tarde, o equipamento foi testado para medir taxas de emissão de COVs em superfícies líquidas quiescentes (Eklund, 1992).

O procedimento para utilização da câmara de fluxo consiste em instalar o aparato sobre a superfície líquida quiescente que flutuará com o auxílio de boias. Posteriormente, é injetado ar limpo e neutro na parte superior da câmara (gás de arraste). O gás de arraste escoa no interior da câmara e mistura-se ao gas volatilizado na superfície. Essa mistura é, então amostrada, por meio de uma mangueira, e conduzida para análise. O funcionamento desta câmara de fluxo segue um princípio naturalmente dinâmico, havendo vazões de entrada e saída de ar em seu interior. O início da amostragem, de fato, se dá somente após a homogeneização da mistura no interior da câmara, a fim de que se evitem erros (Andreão, 2016).

Figura 3: Câmara de Fluxo Dinâmica recomendada pela US EPA: (a) equipamento em uso; e (b) desenho esquemático contendo os seus principais componentes.



Fonte: (a) Rodrigues, 2011; Klenbusch, 1986 (adaptado).

Fernandes (2016) traz em seu trabalho uma tabela com aplicações em diferentes contextos da câmara de fluxo recomendada pela US EPA.

Tabela 2: Utilizações em diferentes contextos da câmara de fluxo recomendada pela epa.

| Fontes   | Compostos Analisados                       | Vazão (L/min)                   | Referência           |
|--|--|---------------------------------|----------------------|
| Lagoas anaeróbias de tratamento de dejetos suínos (amostras de campo)                | Compostos odorantes                        | 0,050 (saída)                   | Hudson et al. (2009) |
| Solução contendo produtos químicos odorantes selecionados (Condições de laboratório) | Compostos odorantes                        | 0,050 (saída)                   | Hudson (2009)        |
| Leiras de compostagem (cadáveres de animais)   | Compostos odorantes                        | 5(entrada)-2 à 4(saída)         | Hudson et al. (2009) |
| Área de confinamento de gados (campo e laboratório)                                  | COV, NH <sub>3</sub> e Compostos odorantes | 5(entrada)                      | Parker et al. (2009) |
| Reatores UASB para tratamento de esgoto doméstico                                    | CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> S         | 5(entrada)                      | Souza et al. (2012)  |
| Operações de alimentação de animais  | COV, NH <sub>3</sub>                       | 2, 5 e 10 (vazão de varrimento) | Parker et al. (2013) |

Fonte:

Fernandes (2016)

Os fatores construtivos mais importantes para a câmara de fluxo recomendada pela US EPA são: volume, geometria, materiais de construção, extensão das linhas de amostragem, sistema de fornecimento de ar e sistema de mistura (Klenbusch, 1986). Em relação à vazão, Eklund (1992) recomenda na entrada  $0,005m^3/min$  e Jiang et al. (1995) afirmam que a vazão no interior do equipamento deve estar entre  $0,005m^3/min$  e  $0,024m^3/min$ .

Apesar dos diversos testes que foram conduzidos durante o desenvolvimento do equipamento, a sua utilização ainda é contestada. Hudson and Ayoko (2008b) estudaram os princípios físico-químicos relacionados a utilização do túnel de vento e da câmara de fluxo recomendada pela US EPA, em particular a divisão das substâncias voláteis em duas fases a partir da Lei de Henry e a relação entre velocidade do vento e emissão. Os resultados mostraram que equipamentos diferentes fornecem resultados significativamente diferentes. Os autores encontraram alguns problemas com relação ao uso da câmara de fluxo que pareciam não ocorrer com túnel de vento. De forma geral, a capacidade de relacionar dados provenientes de métodos indiretos com aqueles obtidos a partir do túnel de vento, dá suporte à utilização do mesmo.

### 3.2.2 Túnel de Vento

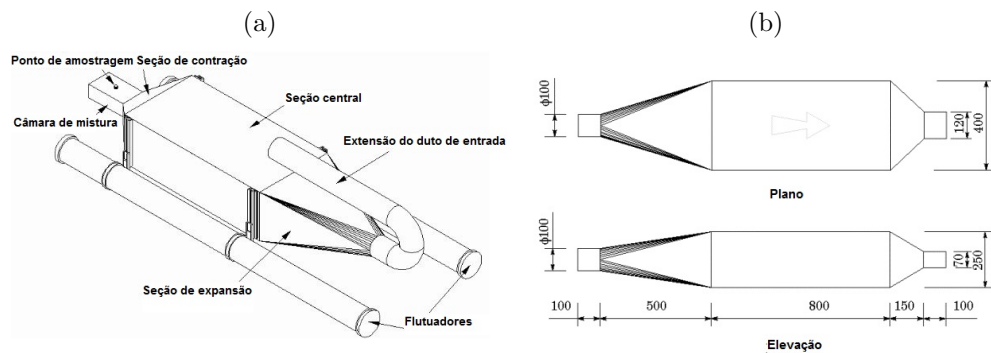
Com o crescimento do número de reclamações em relação a odor na Austrália, crescia também a necessidade de um equipamento testado e confiável para realizar medições diretas da taxa de emissão dos mesmos na região, uma vez que os métodos micrometeorológicos apresentavam algumas limitações já discutidas anteriormente (Jiang et al., 1995). Então, Jiang et al. (1995) projetaram um túnel de vento com o intuito de preencher tal lacuna. O sistema foi desenvolvido com o objetivo de proporcionar um desempenho aerodinâmico consistente e uma camada limite bem desenvolvida (Hudson, 2009). A Figura 4 mostra o desenho isométrico, visão lateral e superior do túnel de vento projetado

por Jiang et al. (1995) e contendo suas medidas. Desde a criação do equipamento, o seu funcionamento vem sendo estudado (Hudson, 2009).

O sistema geral de amostragem contém:

- Ventilador, para suprir a vazão de ar;
- Filtro de carvão ativado, a fim de retirar possíveis contaminantes do ar;
- Túnel de vento em si, o qual captura as espécies químicas escapando de uma determinada superfície e;
- Bomba de vácuo, o qual cria uma pressão negativa para preencher o saco de amostragem (Jiang et al., 1995).

Figura 4: Desenhos técnicos do Túnel de Vento projetado por Jiang et al. (1995) [mm]: (a) visão isométrica; e (b) vista superior e lateral.



Fonte: Jiang et al. (1995).

Entre a seção de expansão e a seção central, existe uma placa retificadora de fluxo, cujo objetivo, juntamente com a extensão do duto de entrada e a seção de expansão, é estabelecer um escoamento estável e reproduzível. A seção de contração, tem o intuito de aprimorar a mistura entre os compostos odorantes e o ar limpo. A câmara de mistura, em função de sua pequena área transversal e altas velocidades do ar, evita interferências de compostos advindos de fora do túnel de vento. Do mesmo modo que a câmara de fluxo, são utilizadas boias para flutuação do túnel de vento nas superfícies líquidas (Jiang et al., 1995).

Figura 5: Túnel de vento projetado pela UNSW em funcionamento.



Fonte: [www.environodour.com.au](http://www.environodour.com.au).

Com o equipamento instalado sobre a superfície líquida, pode-se, então proceder a medição. O ar fornecido através do ventilador passa pelo filtro de carvão, adentra o equipamento e segue para a placa retificadora de fluxo, para então entrar na seção central do túnel de forma turbulenta e contínua, onde as espécies químicas volatilizadas são carregadas pelo escoamento. Na seção central do túnel, acima da superfície, predomina a transferência de massa convectiva. Uma porção da mistura contendo o ar fornecido pelo ventilador e o odor emitido pela superfície é retirada por meio de um saco de amostragem (usualmente Tedlar), através de uma tubulação de Teflon Jiang et al. (1995). A Figura 5 mostra um exemplo de funcionamento do túnel de vento em uma superfície líquida quiescente. Ainda de acordo com (Jiang et al., 1995), a velocidade recomendada para a utilização do sistema é de  $0,33m/s$ , sendo esta a velocidade média na seção principal do túnel. Assim como foi apresentado para câmara de fluxo, a Tabela 4 contém aplicações em diferentes contextos do túnel de vento projetado pela UNSW, a partir de Jiang et al. (1995) e Wang et al. (2001).

Tabela 3: Utilizações em diferentes contextos do túnel de vento projetado pela UNSW.

| Fontes   | Tipo                                 | Dimensão*<br>(mm)               | Compostos<br>medidos                                    | Velocidade<br>(m/s) | Referência                        |
|--|--------------------------------------|---------------------------------|---|---------------------|-----------------------------------|
| ETE  | Baseado<br>no<br>Túnel<br>da<br>UNSW | Retangular<br>(500,250,<br>80)  | Compostos<br>odorantes                                  | 0,035               | Capelli<br>et al.<br>(2008)       |
| ETE  | Baseado<br>no<br>Túnel<br>da<br>UNSW | Retangular<br>(500,250,<br>80)  | Compostos<br>odorantes                                  | 2,48; 3,77;<br>4,54 | Capelli<br>et al.<br>(2009)       |
| Lagoas<br>anaeróbias para<br>tratamento de<br>dejetos suínos;<br>Solução<br>contendo<br>compostos<br>químicos<br>odorantes<br>(laboratório).                               | UNSW                                 | Retangular<br>(800,400,<br>250) | Compostos<br>odorantes                                  | 0,3                 | Hudson<br>et al.<br>(2009)        |
| Leiras de<br>compostagem<br>(cadáveres de<br>animais);<br>Lagoas<br>anaeróbias para<br>tratamento de<br>dejetos suínos;<br>Superfície de<br>esterco; Bacias<br>de detenção | UNSW                                 | Retangular<br>(800,400,<br>250) | Compostos<br>odorantes                                  | 0,3                 | Hudson<br>(2009)                  |
| Águas<br>Residuais<br>Suínas   | UNSW                                 | Retangular<br>(800,400,<br>250) | NH <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> ,<br>H <sub>2</sub> S | 0,02; 0,03;<br>0,05 | Blanes-<br>Vidal et al.<br>(2012) |

Fonte: Fernandes (2016)

De acordo com Sohn et al. (2005), a partir de medições do perfil de velocidades na seção central do túnel, se percebe que muitos fatores afetam o escoamento no seu interior, dentre eles se destacam: tipo da superfície emissora, velocidade do vento no interior, características de entrada, formato do túnel de vento e modificações na geometria do túnel, como a placa retificadora de fluxo (apud BALDO, 2000).

Devido às diferenças encontradas entre as medições realizadas pelos equipamentos citados acima, se faz necessário um estudo detalhado dos parâmetros construtivos e operacionais dos mesmos. Neste sentido, Prata et al. (2016) investigaram o escoamento interno e o transporte de  $H_2S$  dentro da câmara de fluxo dinâmica recomendada pela US EPA, a fim de avaliar a influência do escoamento no interior do equipamento nas medições de taxas de emissão. A conclusão foi que existe, em seu interior, um escoamento

com alto nível de complexidade; a tensão de cisalhamento e a concentração variaram na superfície da água; e os valores da velocidade de fricção na superfície não coincidem com valores típicos para o escoamento atmosférico. Em relação ao túnel de vento projetado pela UNSW, o único estudo encontrado na literatura utilizando CFD é de Prata Jr et al. (2014). Ele objetivou discutir questões relacionadas à aplicação e à validação dos resultados de uma análise CFD a partir da análise de uma condição simplificada do túnel de vento no plano central do mesmo e concluiu que o uso de técnicas de CFD é uma importante ferramenta para tais avaliações.

## 4 Metodologia

Para execução deste trabalho, serão utilizadas e solucionadas de forma numérica as equações tridimensionais de conservação da massa e conservação da quantidade de movimento para um fluido incompressível, como é apresentado nas equações 12 e 13, respectivamente.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (12)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (13)$$

Onde  $u$  é o vetor velocidade e  $i, j$  os seus índices, sendo  $(i, j) = (1, 2, 3)$  e  $(u_1, u_2, u_3) = (u, v, w)$  e  $(x_1, x_2, x_3) = (x, y, z)$ , respectivamente;  $\rho$  é a massa específica;  $\tau$  é o tensor das tensões;  $g_i$  é a aceleração da gravidade na direção  $i$  e  $P$  é a pressão.

Na equação 112, o termo  $\rho \partial u_i / \partial t$  representa a taxa de variação local da velocidade. Já na equação 13, o termo  $\rho u_j \partial u_i / \partial x_j$  é o termo advectivo,  $\partial \tau_{ij} / \partial x_j$  é a influência do tensor viscoso e por ultimo  $\partial P / \partial x_i$  é a influência das forças de pressão.

Ambas as equações (12) e (13), são válidas para um volume de controle  $VC$ . A primeira equação estabelece que a massa no interior de  $VC$  permanece constante. Já a segunda equação estabelece que para o mesmo volume de controle  $VC$ , a força total agindo sobre  $VC$  leva a uma taxa de variação da quantidade de movimento dentro do volume de controle e/ou a taxa líquida a qual a quantidade de movimento está retirando-se ou entrando no volume de controle através das superfícies de controle (Fox et al., 2000).

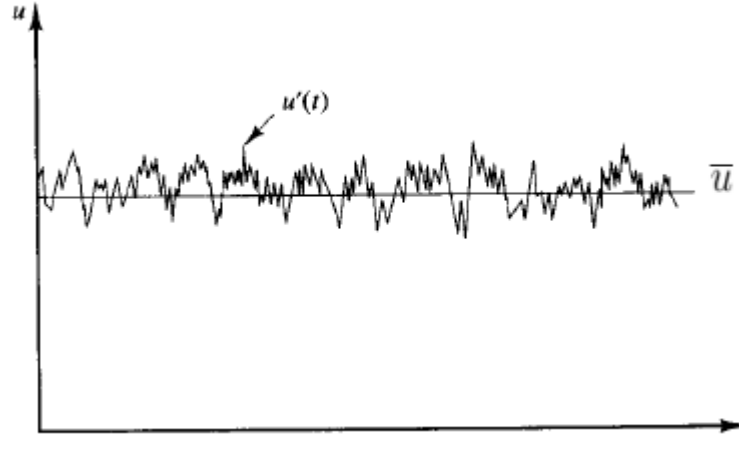
Para escoamentos turbulentos, é preciso considerar todo o amplo espectro de frequências envolvido no problema, tornando a simulação extremamente custosa em termos computacionais para boa parte dos problemas práticos de engenharia. Dessa forma, para solução numérica das mesmas, o presente trabalho irá recorrer ao modelo das médias de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier Stokes* - RANS), que resolve apenas as equações para o escoamento médio e imputa a influência dos efeitos turbulentos em um único termo da equação a ser modelado. Para tal, é utilizado os postulados de Reynolds, os quais consideram que as propriedades envolvidas podem ser decompostas em uma média e a sua flutuação, como mostra a Equação 14 (Versteeg and Malalasekera, 2007). Tal situação é exposta para a velocidade por meio da equação e da Figura 6.

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (14)$$

Onde  $\bar{u}$  é a velocidade média e  $u'$  é a variação da velocidade em torno da média.



Figura 6: Decomposição da velocidade em sua média e sua flutuação em escoamento turbulento.



Fonte: Versteeg and Malalasekera (2007) (modificada).

A partir do conceito exposto no postulado de Reynolds, podemos expressar as Equações (12) e (13) em função da média e flutuação de suas propriedades. Após fazer tais substituições e aplicar a média temporal em cada um de seus termos, obtêm-se as Equações (15) e (16) (Versteeg and Malalasekera, 2007).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (15)$$

$$\bar{\rho} \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \bar{\rho u'_i u'_j}) \quad (16)$$

As equações apresentadas acima expressam o comportamento médio das Equações 12 e 13. O termo  $\bar{\rho u'_i u'_j}$ , que aparece na equação (16), é chamado de tensor das tensões de Reynolds e está relacionado com a influência das flutuações no escoamento médio (Versteeg and Malalasekera, 2007).

## 4.1 O Problema de Fechamento

Os novo termo que aparece na Equação 16, o tensor das tensões de Reynolds ( $\bar{\rho u'_i u'_j}$ ), insere variáveis novas no problema, para as quais não há solução, pois só se conhece as propriedades do escoamento médio ( $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$  e  $\bar{P}$ ). Logo é preciso utilizar novas equações para modelar os componentes do tensor das tensões de Reynolds. Para isto, existem duas abordagens: derivar e resolver equações de transporte para os componentes do tensor das tensões de Reynolds, que é o que o modelo RSM propõe, porém esta é uma alternativa mais cara computacionalmente, pois acarreta na solução de mais 6 equações de transporte; ou usar a hipótese de Boussinesq (Versteeg and Malalasekera, 2007).

O modelo RSM (*Reynolds Stress Model*), o qual utiliza 6 equações para modelar o tensor das tensões de Reynolds. Pois, como se observa na Equação 17, o tensor das tensões de Reynolds é uma matriz simétrica. O modelo RSM cria seis equações de transporte para cada um dos 6 componentes do tensor das tensões de Reynolds, função disto os tensores são modelados sem a necessidade de se utilizar a hipótese de Boussinesq, a qual será explicada no parágrafo a seguir (Versteeg and Malalasekera, 2007).

$$\bar{u'_i u'_j} \equiv \begin{bmatrix} \bar{u' u'} & \bar{u' v'} & \bar{u' w'} \\ \bar{v' u'} & \bar{v' v'} & \bar{v' w'} \\ \bar{w' u'} & \bar{w' v'} & \bar{w' w'} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Em relação a hipótese de Boussinesq, é observado experimentalmente que a turbulência decai a menos que haja cisalhamento no escoamento incompressível médio. Além disso, é encontrado que as tensões turbulentas aumentam a medida que a taxa média de deformação aumenta. Dessa maneira, foi proposto por Boussinesq, em 1877, que as tensões de Reynolds podem ser relacionadas com as taxas médias de deformação (*tensões laminares*), como indicado pela equação 18 (Versteeg and Malalasekera, 2007).

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \tau^T_{ij} = \mu_T \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (18)$$

Sendo as tensões laminares:

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (19)$$

Onde  $\mu_T$  é a viscosidade turbulenta e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido. Temos que:

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_T + \mu) \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (20)$$

Logo, surge a necessidade de modelar uma nova propriedade, a viscosidade turbulenta ( $\mu_T$ ).

## 4.2 Modelagem da Viscosidade Turbulenta

Na Equação 19, é inserida uma nova variável ao problema, a viscosidade turbulenta ( $\mu_T$ ). Afim de prover um valor à mesma, são utilizados diversos modelos, os quais variam de acordo o seu número de equações, seja 0, 1, 2, ...,  $n$  equações (Versteeg and Malalasekera, 2007).

Além do modelo RSM, outros dois muito conhecidos e amplamente utilizados, são o  $k - \varepsilon$  e o  $k - \omega$ . Ambos representam a viscosidade turbulenta por meio de duas equações (Versteeg and Malalasekera, 2007).

No caso do modelo  $k - \varepsilon$ , o mesmo utiliza uma equação para o transporte da energia cinética turbulenta ( $k$ ) e outra para o transporte da dissipação da energia cinética turbulenta ( $\varepsilon$ ). A viscosidade turbulenta é representada através da Equação 21 (Versteeg and Malalasekera, 2007).

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (21)$$

Onde  $C_\mu$  é uma constante adimensional.

O modelo  $k - \omega$  utiliza uma equação para o transporte da energia cinética turbulenta ( $k$ ) e outra para o transporte da dissipação específica ( $\omega$ ). A viscosidade turbulenta é representada através da Equação 22 (Versteeg and Malalasekera, 2007).

$$\mu_T = \rho \frac{k}{\omega} \quad (22)$$

Ambos os modelos ( $k - \varepsilon$  e o  $k - \omega$ ) apresentam bons resultados, são amplamente testados e requisitam baixo dispêndio computacional, em função de sua simplicidade. Porém, o modelo  $k - \omega$ , apesar de sua simplicidade e confiabilidade, apresenta uma indesejável dependência de fluxo livre na região próxima a parede, ele apresenta bons resultados perto da parede e resultados não tão bons na região de fluxo livre. O que não ocorre no modelo  $k - \varepsilon$ , o qual apresenta bons resultados na região de fluxo livre e não tão

bons perto da parede. Após analisar tal problema, Menter (1994) propôs um novo modelo, que mantém as boas características do modelo  $k-\omega$ , porém sem os seus efeitos indesejados na região próximo a parede. Ele faz isso a partir de uma função que discrimina a região próxima a parede (aproximadamente 50%) na camada limite e o restante do escoamento. Na região próxima a parede, é resolvido o modelo  $k-\omega$ , mudando gradualmente para o modelo  $k-\epsilon$  a medida que se caminha para a borda da camada limite. A este novo modelo, foi dado o nome de  $k-\omega$  SST (*Shear-Stress Transport* - Transporte das Tensões de Cisalhamento), o qual ainda tem a capacidade de considerar o transporte das principais tensões de cisalhamento turbulentas em gradientes de pressão adversos na camada limite (Menter, 1994).

O modelo utiliza as duas seguintes equações de transporte para  $k$  e  $\omega$ :

$$u_j \frac{\partial \rho k}{\partial x_j} = \tau_{i,j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (23)$$

$$u_j \frac{\partial \rho \omega}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{nu_t} \tau_{i,j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_\omega 2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (24)$$

As constantes genéricas do modelo são representadas por  $\phi$  e são calculadas a partir das constantes  $\phi_1$  e  $\phi_2$ , pela equação (25).

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2 \quad (25)$$

As constantes para o primeiro grupo ( $\phi_1$ ), são:

$$\sigma_{k,1} = 0,85, \sigma_{\omega,1} = 0,5, \beta_1 = 0,0750$$

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega,1} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}$$

As constantes para o segundo grupo ( $\phi_2$ ) ( $k-\epsilon$ ), são:

$$\sigma_{k,2} = 1,0, \sigma_{\omega,2} = 0,856, \beta_2 = 0,0828$$

$$\gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega,2} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}$$

Os valores de  $a_1$ ,  $\beta^*$  e  $\kappa$  são constantes e iguais a 0,31, 0,09 e 0,41, respectivamente. A viscosidade cinemática turbulenta, é dada por:

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)} \quad (26)$$

Os coeficientes e relações auxiliares são apresentados abaixo. A função  $F_1$  é definida como:

$$F_1 = \tanh \left( \min \left( \max \left( \frac{\sqrt{k}}{0,09 \omega y}; \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right); \frac{4 \rho \sigma_{\omega,2} k}{CD_{k,\omega} y^2} \right) \right) \quad (27)$$

O termo  $y$  é a distância até a próxima superfície e  $CD_{k,\omega}$  é o termo de difusão cruzada, definido da seguinte forma:

$$CD_{k,\omega} = \max \left( \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right) \quad (28)$$

O termo  $F_2$ , que aparece na equação viscosidade dinâmica turbulenta, é definido como:

$$F_2 = \tanh \left( \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{0,09 \omega y}; \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) \right) \quad (29)$$

### 4.3 Condições de Contorno

As condições de contorno adotadas são: velocidade uniforme de  $3,82 \text{ m/s}$  no duto circular de entrada, que proporciona uma velocidade média de  $0,33 \text{ m/s}$  na seção principal do túnel de vento, condição de não deslizamento nas paredes e, na saída, a condição de pressão atmosférica. Todas as condições de contorno estão expostas na Tabela 4.

Tabela 4: Condições de contorno aplicadas.

|         |  |
|---------|--|
| Entrada | Perfil de velocidade uniforme: $3,82 \text{ m/s}$      |
| Saída   | Condição: $P = 1 \text{ atm}$                          |
| Parede  | Condição de não deslizamento ( $u_1 = u_2 = u_3 = 0$ ) |

Fonte: Próprio autor

É importante ressaltar que, uma vez que a superfície líquida na qual irá ocorrer a emissão do constituinte é quiescente, foi utilizada a condição de não deslizamento na mesma.

### 4.4 Métodos de Solução

Em relação aos métodos de solução utilizados, a pressão e a velocidade foram resolvidos de forma acoplada (esquema *coupled*), com a opção pseudo-transiente, que é uma forma implícita de relaxamento para casos de estado estacionário e foi utilizada em função de fornecer resultados mais rápidos e robustos (Mark Keating, 2011). Em relação à discretização espacial, o esquema *upwind* de primeira ordem foi utilizado para interpolações dos termos convectivos das equações de quantidade de movimento, energia cinética turbulenta e taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta. Os gradientes foram calculados com o método dos mínimos quadrados baseados na célula e os termos de pressão foram calculados com aproximação de segunda ordem. Todos os métodos de solução utilizados, estão expostos na Tabela 5.

Tabela 5: Métodos de solução

|                                |                                      |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| Acoplamento pressão-velocidade | Esquema acoplado - Pseudo Transiente |
| Gradiente                      | Mínimos Quadrados Baseados na Célula |
| Pressão                        | Aproximação de Segunda Ordem         |
| Quantidade de movimento        | <i>Upwind</i> de Primeira Ordem      |
| Energia cinética turbulenta    | <i>Upwind</i> de Primeira Ordem      |
| Taxa de dissipação específica  | <i>Upwind</i> de Primeira Ordem      |

Fonte: Próprio autor

### 4.5 Método Numérico

A fim de solucionar as equações dispostas acima, é necessário utilizar um método numérico. O presente trabalho utilizou o programa ANSYS FLUENT 17.0, o qual utiliza o Método dos Volumes Finitos. A referida abordagem utiliza como ponto de partida as equações de conservação na forma integral. O domínio de estudo é subdividido em volumes de controle e as equações diferenciais são resolvidas em cada um deles. Uma a uma, as propriedades são calculadas no centroide de cada volume, e por meio de uma função de interpolação espacial, é possível definir as propriedades para a superfície do volume de controle. À partir deste procedimento, é obtida a equação de discretização contendo valores da propriedade para um grupo de pontos do domínio, constituindo assim, um sistema linear de equações.

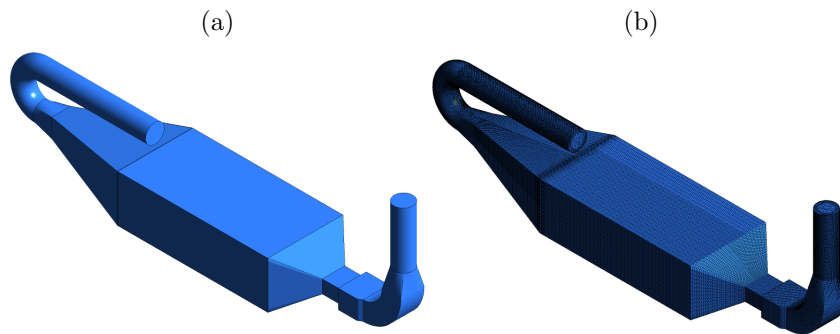
O sistema linear de equações é resolvido a partir do método *Multigrid* (MG), em conjunto com a técnica de decomposição LU incompleta (*Incomplete Lower Upper*). Basicamente, a técnica MG envolve a solução de iterações preliminares em malhas mais finas, seguida por iterações posteriores em malhas progressivamente maiores, para então transferir os resultados da malha maior para a malha original, mais fina (Fluent, 2016).

O critério de convergência adotado para o presente trabalho foi: RMS (*root mean square* - raiz quadrada média) do resíduo de cada equação, inferior a  $10^{-06}$ . Este é um valor considerado razoável para muitas aplicações técnicas (Fluent, 2016).

## 4.6 Domínio Computacional e Malha

Para construir o domínio computacional, foram utilizados os programas ANSYS DesignModeler e AutoCAD 2016. De maneira a representar da forma mais aproximada possível o túnel de vento real apresentado por Wang et al. (2001), como mostrado na Figura 7.

Figura 7: Malha e geometria construídas no ANSYS DesignModeler e ANSYS Meshing: (a) Desenho 3D do túnel de vento projetado pela UNSW e (b) Malha utilizada no túnel de vento.



Fonte: Próprio autor

A malha foi construída utilizando o programa ANSYS Meshing. Em um contexto geral, a malha construída é híbrida, com elementos prismáticos nas proximidades da parede e elementos tetraédricos no núcleo do domínio.

### 4.6.1 Teste de Malha

A malha é um parâmetro fundamental para garantir a precisão dos resultados. Em função disto é realizado o teste de malha, o qual demonstra a sensibilidade da malha e garante a redução dos erros numéricos provenientes da discretização das equações de transporte pelo método numérico. Basicamente, é realizada a mesma simulação em diversas malhas semelhantes, diferindo quanto ao número de pontos nodais. Chamaremos de malha grosseira ( $Me_1$ ) aquela com menor número de pontos nodais, refinada ( $Me_3$ ) aquela com maior número de pontos nodais e intermediária ( $Me_2$ ) aquela que apresenta um número de pontos nodais entre os dois casos citados anteriormente. Após serem realizadas as simulações, é analisado se os resultados obtidos através das mesmas é semelhante, ou seja, é testada a sensibilidade da malha ao número de pontos nodais.

De forma que para aprovar a malha, é necessário que todos os resultados sejam semelhantes. É escolhida a menor malha que proporciona resultados independente do número de pontos.

## 5 Resultados

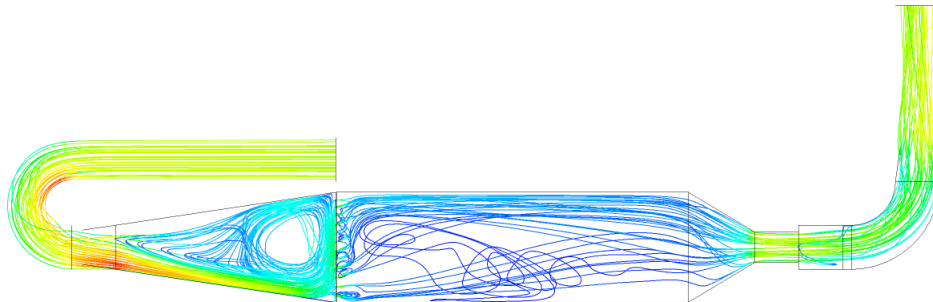
Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações numéricas realizadas para o túnel de vento proposto pela UNSW, bem como para propostas alternativas. O caso base será a referência de comparação com as alternativas propostas.

### 5.1 Caso Base

O caso base constitui-se da geometria idêntica àquela do túnel de vento proposto pela UNSW (Figura 7). O teste de malhas está apresentado no Apêndice A e uma comparação dos dados obtidos por simulação numérica no presente trabalho e os dados obtidos a partir de um trabalho experimental, realizado por Jiang et al. (1995), é mostrado no Apêndice C.

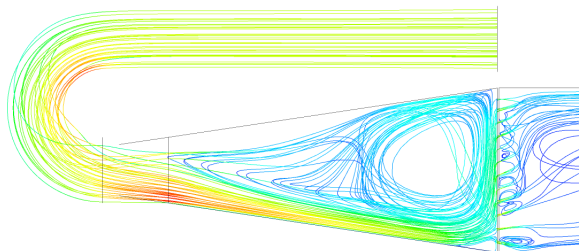
A partir das Figuras 8 e 9, nas quais estão representadas as linhas de corrente para o caso base, percebe-se que, em função da curva existente no duto de entrada do túnel de vento, existe uma aceleração indesejada do escoamento na região subsequente. Além deste ponto, é notado que a placa retificadora de fluxo age como uma espécie de parede, exercendo o efeito inverso para o qual foi proposta, ou seja, impedindo que o fluxo de ar entre na seção central de forma uniforme, por meio de uma recirculação que é provocada na região posterior a mesma. Tal recirculação, provocada pela presença do retificador de fluxo na configuração proposta, parece ser acentuada pela aceleração provocada pela curva no duto de entrada. Dessa maneira, é desejável que a mudança geométrica proposta, faça desaparecer ou diminuir tal efeito de aceleração.

Figura 8: Linhas de corrente para o case base.



Fonte: Próprio autor

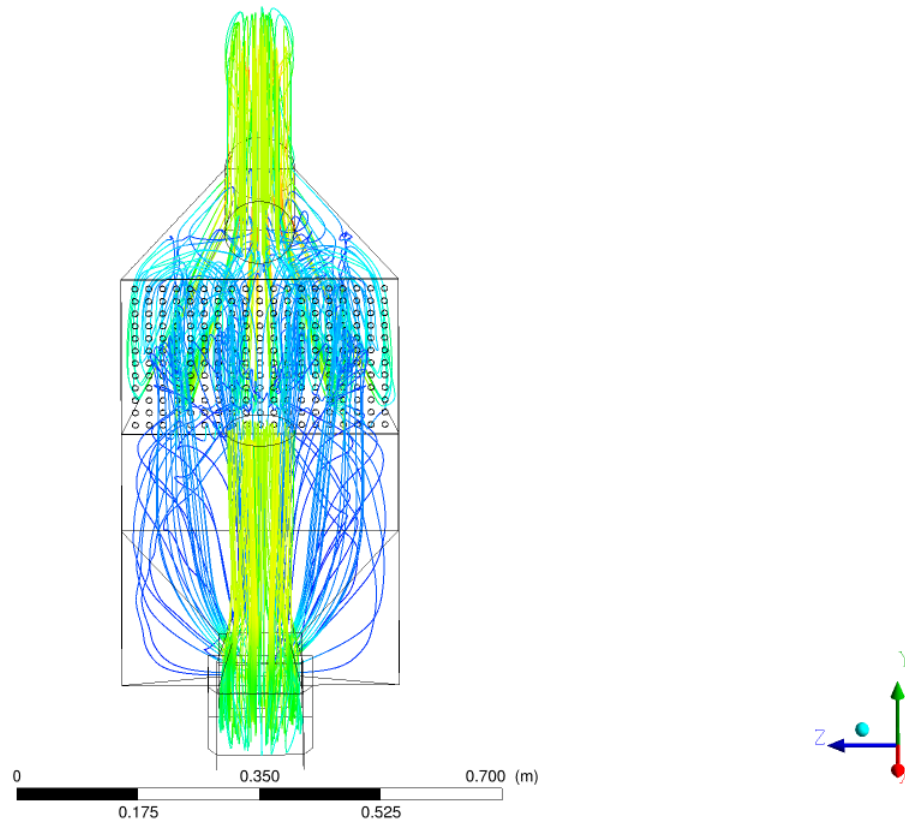
Figura 9: Imagem detalhada das linhas de corrente para a região próxima a entrada do túnel de vento (caso base)



Fonte: Próprio autor

A partir da Figura 10, que mostra o comportamento das linhas de corrente na seção central, parece existir pouca assimetria no escoamento na região, o qual ocorre na direção  $x$ .

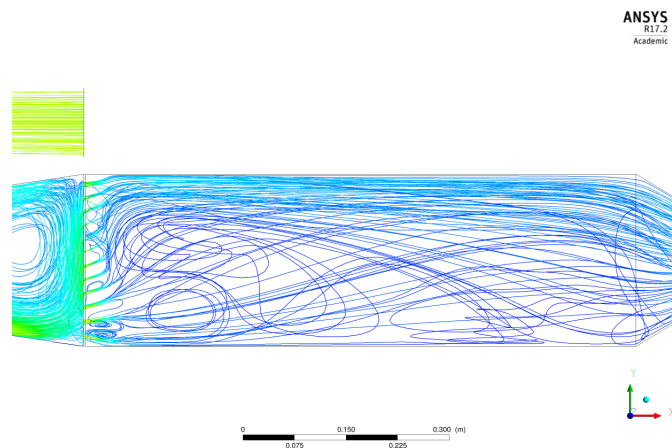
Figura 10: Imagem detalhada das linhas de corrente para a região do túnel de vento com a placa retificadora de fluxo (caso base).



Fonte: Próprio autor

Como consequência desses efeitos indesejáveis que ocorrem na entrada do túnel de vento, o escoamento na seção central do túnel de vento ocorre de forma divergente a esperada, ou seja, não apresenta um escoamento e uma camada limite bem desenvolvidos, como evidenciado na Figura 11.

Figura 11: Imagem detalhada das linhas de corrente para a seção central do túnel de vento (caso base).

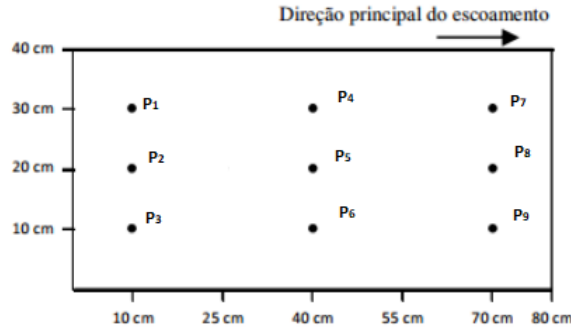


Fonte: Próprio autor

A partir da Figura 12, a qual mostra a vista superior da seção central do túnel de

vento, é possível ver a localização dos nove pontos de medição transversal, utilizados para analisar os resultados obtidos. Os três primeiros pontos de medição transversal, localizados na região próxima entrada da seção central, serão chamados de  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ , os pontos de medição localizados no meio da seção central serão chamados de  $P_4$ ,  $P_5$  e  $P_6$  e os pontos de medição localizados na região próxima a saída serão chamados de  $P_7$ ,  $P_8$  e  $P_9$ .

Figura 12: Pontos de coleta dos perfis de velocidade.



Fonte: Fernandes (2016) (modificado)

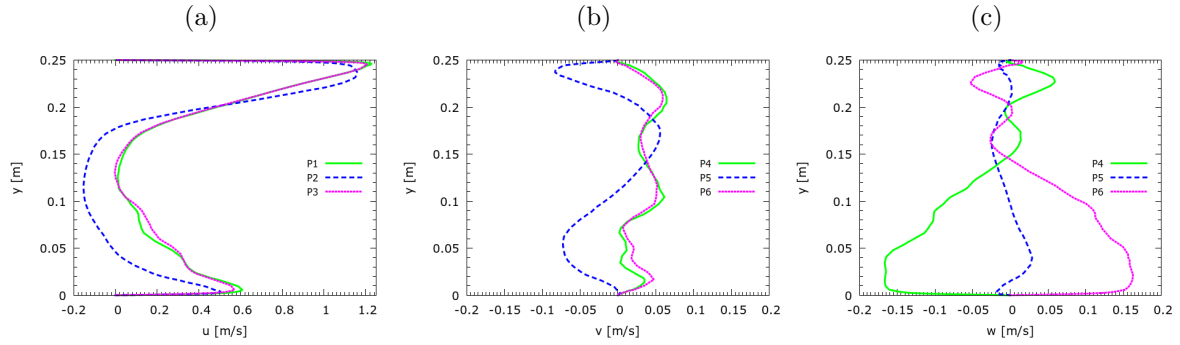
Examinando a componente  $u$  dos perfis de velocidade mostrados nas Figuras 13, 14 e 15, se identifica que as maiores velocidades ocorrem junto a parede superior da seção central do túnel de vento. Tal efeito parece ser acentuado pelo efeito retardante provocado pela placa retificadora de fluxo e, conseqüentemente, pela aceleração fomentada pela curva existente no duto de entrada. Além disso, observando os perfis de velocidade do conjunto  $P_4$  a  $P_6$  e  $P_7$  a  $P_9$ , ainda na componente  $u$ , se percebe que não existe a tendência de suavização desses efeitos ao longo da seção central, pelo contrário, eles se tornam ainda mais evidentes.

O perfil de velocidade para a região próxima à entrada da seção central, na componente  $u$ , apresentou valores negativos aproximadamente na região  $0,05 < y < 0,17$ , com valor máximo próximo a  $-0,2 \text{ m/s}$ . Já para os perfis da metade e final da seção central, ainda na componente  $u$ , ocorreram valores negativos na região próxima à interface, o que sugere a presença de gradiente de pressão adverso e descolamento da camada limite, chegando próximo a  $-0,1 \text{ m/s}$ , para a metade da seção central e  $-0,03 \text{ m/s}$ , para a região próxima à saída. Como já era de se esperar, os valores mais expressivos da velocidade ocorrem na componente  $u$ , ou seja, na direção do escoamento.

Analisando o perfil de velocidades mostrado na Figura 13-a, é possível perceber que o escoamento na seção central do túnel de vento é pouco assimétrico na direção  $x$ , apresentando pouca variação entre os pontos  $P_1$  e  $P_3$ , localizados em extremidades opostas, um a esquerda e outro a direita. Tal conclusão pode ser expandida para todo o escoamento na seção central, observando os perfis de velocidade para os pontos  $P_4, P_6$  e  $P_7, P_9$ , também localizados em extremidades opostas, se observa a mesma característica.

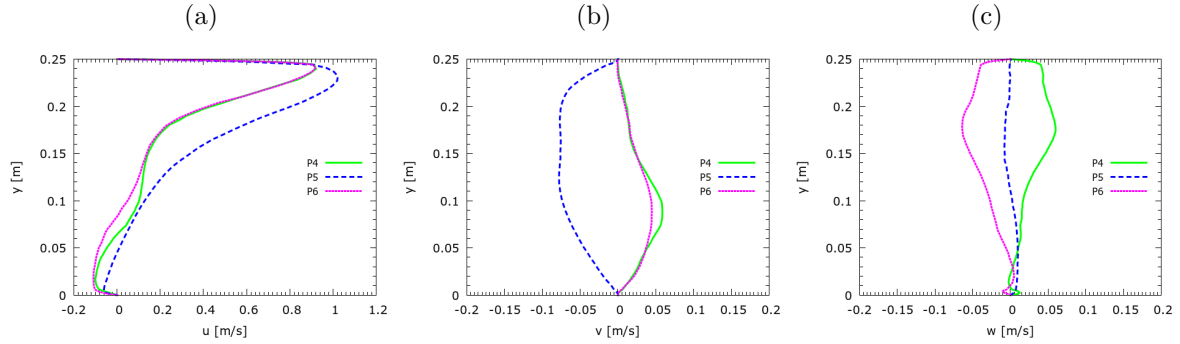


Figura 13: Perfis de velocidade para os pontos  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ , localizados entrada da seção central do túnel de vento: (a) Componente  $u$ ; (b) Componente  $v$ ; e (c) Componente  $w$ .



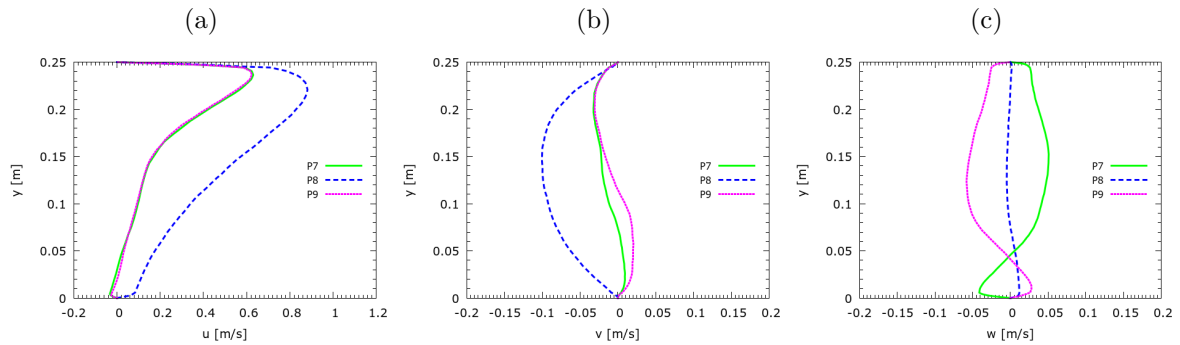
Fonte: Próprio autor

Figura 14: Perfis de velocidade para os pontos  $P_4$ ,  $P_5$  e  $P_6$ , localizados no meio da seção central do túnel de vento: (a) Componente  $u$ ; (b) Componente  $v$ ; e (c) Componente  $w$ .



Fonte: Próprio autor

Figura 15: Perfis de velocidade para os pontos  $P_7$ ,  $P_8$  e  $P_9$ , localizados na saída da seção central do túnel de vento: (a) Componente  $u$ ; (b) Componente  $v$ ; e (c) Componente  $w$ .



Fonte: Próprio autor

Outro ponto importante, é que uma vez que o objetivo do túnel é obter um escoamento e uma camada limite bem desenvolvidos, era esperado que a velocidade  $u$  fosse majoritária em termos de contribuição dos perfis, ou seja, que o escoamento ocorresse majoritariamente na direção  $x$ , sobretudo, na região longe das paredes. Porém, a partir da análise dos perfis de velocidade, é visto que tal efeito não ocorre da maneira pretendida e ainda que as componentes  $v$  e  $w$  apresentem valores baixos em comparação a componente  $u$ , porém seus valores são razoavelmente significativos, apontando efeitos de escoamento secundário importantes.

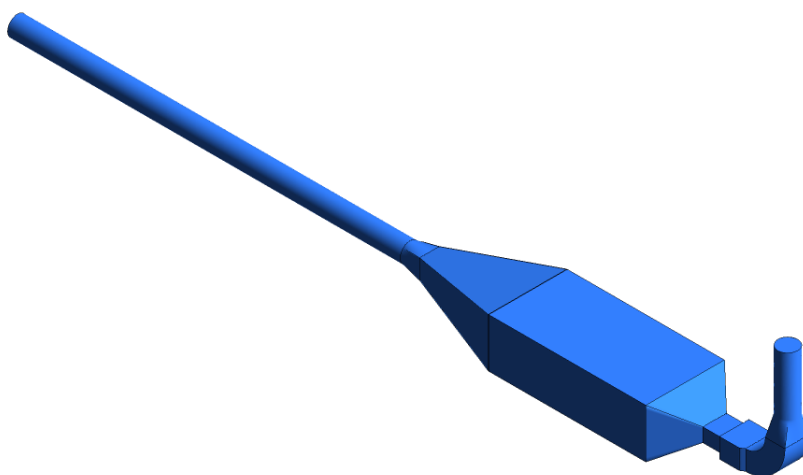
## 5.2 Propostas de Geometrias Alternativas

Primeiramente, serão apresentadas as propostas de geometrias alternativas ao caso base, para então serem analisados os resultados provenientes das mesmas.

### 5.2.1 Geometria Alternativa 1

Tendo em vista os efeitos deletérios provocados pela presença da curva no duto de entrada do túnel de vento, foi proposta uma geometria visando mitigar esse efeito, como é mostrado na Figura 16. Foi retirado o duto de entrada contendo a curva e substituído por um duto de entrada reto de 2 *metros* de comprimento.

Figura 16: Proposta de geometria alternativa para o caso real.



Fonte: Próprio autor

Em função dos aspectos construtivos da malha terem sido idênticos ao que foi executado para o caso base, não foi procedido o teste de malhas para o mesmo.

Figura 17: Malha construída para o caso alternativo.

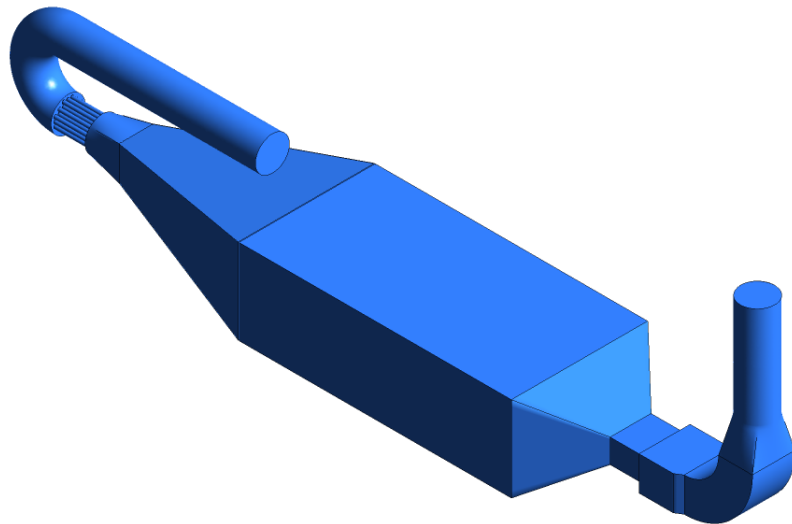


Fonte: Próprio autor

### 5.2.2 Geometria Alternativa 2

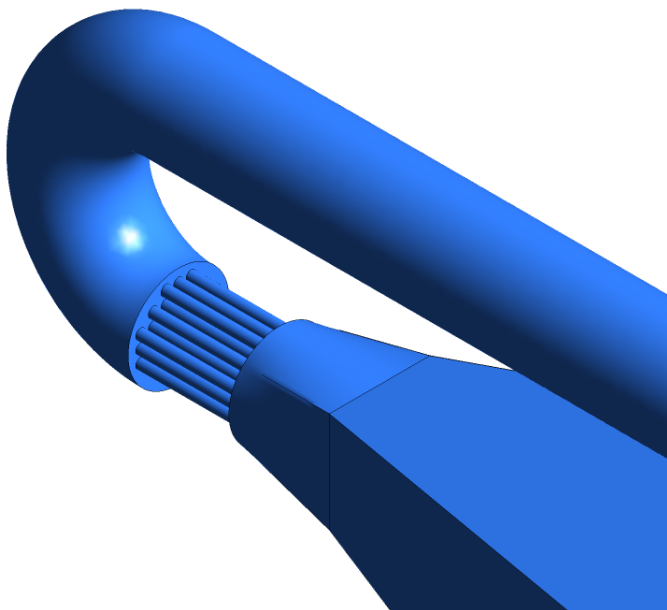
Afim de estudar alternativas para a geometria do túnel de vento, foi analisada uma segunda proposta de geometria, mostrada na Figura 18. Esta nova geometria contém dois retificadores de fluxo, um deles é o que já estava presente no caso base e um novo, localizado entre a saída da curva do duto de entrada e a seção de expansão, mostrado em detalhe na Figura 19. O objetivo do novo retificador de fluxo é atenuar os efeitos da aceleração provocados pela curva no duto de entrada e promover um escoamento mais próximo ao desejado.

Figura 18: Segunda proposta de geometria alternativa, contendo um retificador de fluxo extra.



Fonte: Próprio autor

Figura 19: Imagem em detalhe do retificador de fluxo extra proposto para geometria alternativa 2.

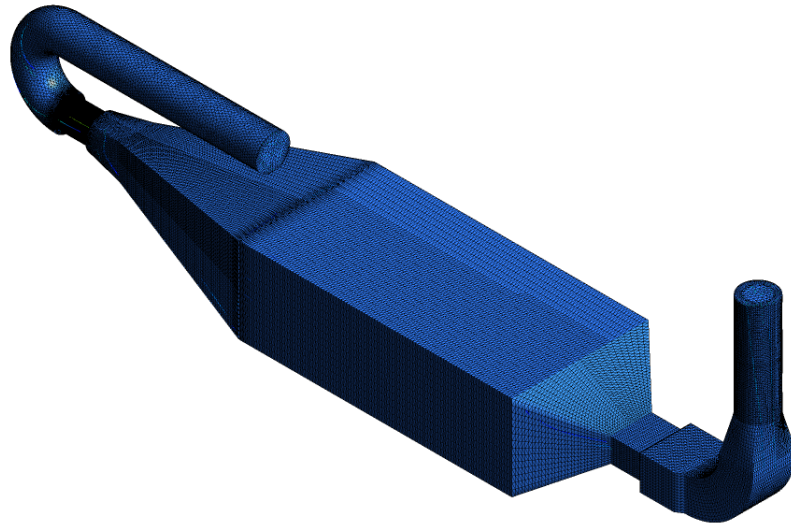


Fonte: Próprio autor

Assim como ocorreu para a primeira proposta de geometria alternativa, os aspectos construtivos da malha foram idênticos aos que foram considerados para o caso base,

portanto não foi procedido o teste de malhas para o mesmo. A Figura 20 mostra a malha construída.

Figura 20: Malha construída para a segunda proposta de geometria alternativa.



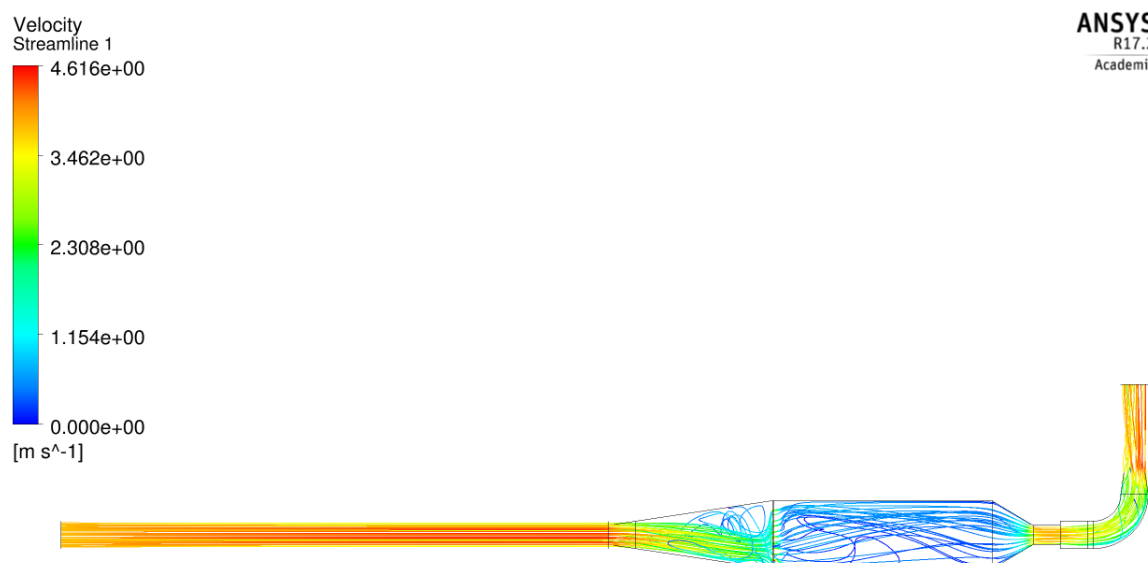
Fonte: Próprio autor

### 5.3 Análise dos Resultados das Propostas Alternativas

Neste tópico serão apresentados os resultados para as duas propostas de geometria alternativa. Para facilitar a nomenclatura, a análise dos resultados advindos da simulação numérica procedida nas geometrias alternativas 1 e 2, serão chamados de casos 1 e 2, respectivamente.

Observando a Figura 21, a qual apresenta as linhas de corrente para o caso 1, se nota que o fluxo de ar adentra a seção de expansão de forma consideravelmente mais uniforme, quando em comparação com o caso base. Tal melhoria ocorre em função da inexistência da aceleração provocada pela curva no duto de entrada. Sendo esperado que o efeito retardante provocado pela placa retificadora de fluxo seja diminuído e o escoamento no interior da seção central seja mais uniforme.

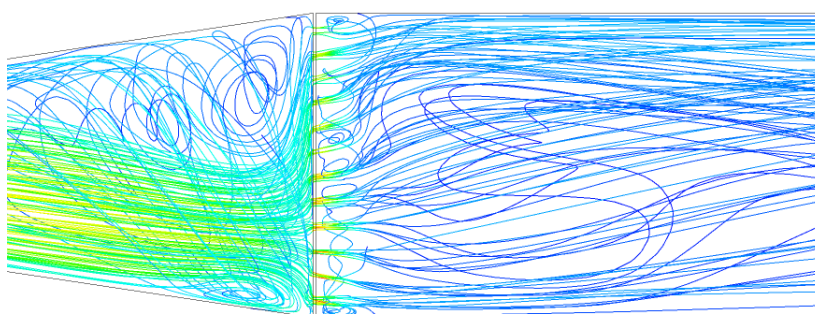
Figura 21: Linhas de corrente caso 1.



Fonte: Próprio autor

Averiguando com mais atenção o escoamento na região próxima à placa retificadora de fluxo, pela Figura 22, é possível notar que o efeito de recirculação permanece, porém com intensidade menor quando em comparação com o caso base, mostrado na Figura 10. Em função desta atenuação do efeito recirculatório, é esperado que o escoamento na seção central do túnel de vento ocorra de forma menos perturbada, quando comparada ao caso base. A Figura 23 detalha o escoamento na seção central para o caso alternativo, maiores comentários a respeito desta serão feitos a partir dos perfis de velocidade.

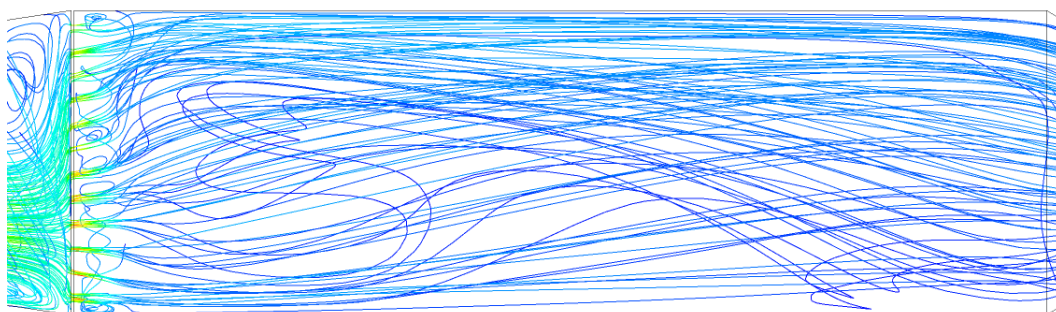
Figura 22: Detalhes das linhas de corrente junto a placa retificadora de fluxo (caso 1).



Fonte: Próprio autor

Figura 23: Detalhes das linhas de corrente para a seção central (caso 1).

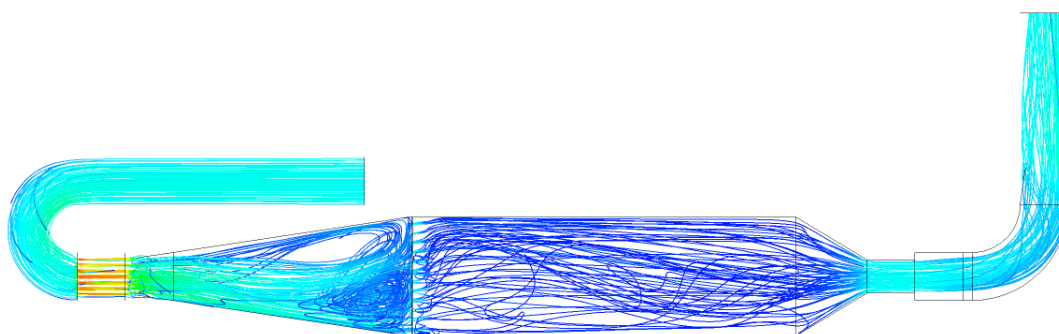
Acad



Fonte: Próprio autor

Analisando a Figura 24, a qual apresenta as linhas de corrente para a segunda proposta de geometria alternativa, se percebe que os efeitos causados pela aceleração no duto de entrada foram amenizados. O escoamento adentra a seção de expansão de maneira mais uniforme.

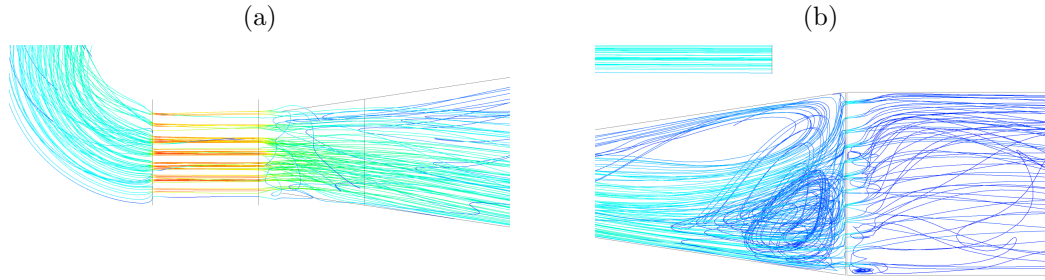
Figura 24: Linhas de corrente (caso 2)



Fonte: Próprio autor

Por meio da Figura 25, a qual detalha as linhas da corrente nos dois retificadores de fluxo, é possível perceber que o escoamento sai do novo retificador de fluxo de maneira próxima a esperada, ou seja, de forma quase constante ao longo da seção. Porém, quando o escoamento adentra a seção de expansão e encontra a placa retificadora de fluxo já existente no caso base, ocorre a formação de duas recirculações, uma delas já se mostrava presente no caso base e na primeira proposta de geometria alternativa e está localizada na parte superior da placa. Uma nova recirculação ocorre na porção inferior da placa retificadora de fluxo. As consequências dessas mudanças no escoamento na seção central, podem ser analisadas por meio das Figuras 26-28.

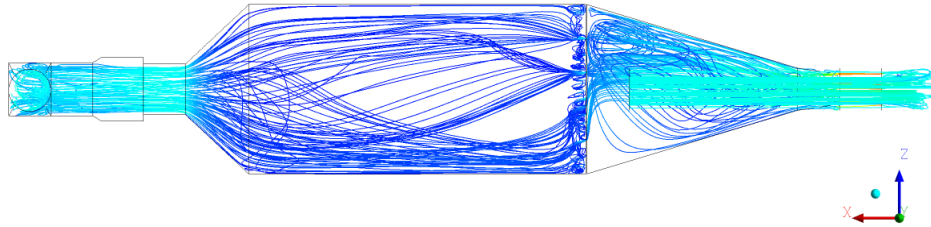
Figura 25: Detalhe das linhas de corrente para a segunda proposta de geometria alternativa: (a) Novo retificador de fluxo; (b) Retificador de fluxo já constante no caso base.



Fonte: Próprio autor

Por meio da Figura 26, a qual apresenta as linhas de corrente para o caso 2, em sua vista superior, é possível perceber que, diferentemente do que ocorre para os casos base e caso 1, é observada uma considerável assimetria na direção  $x$ .

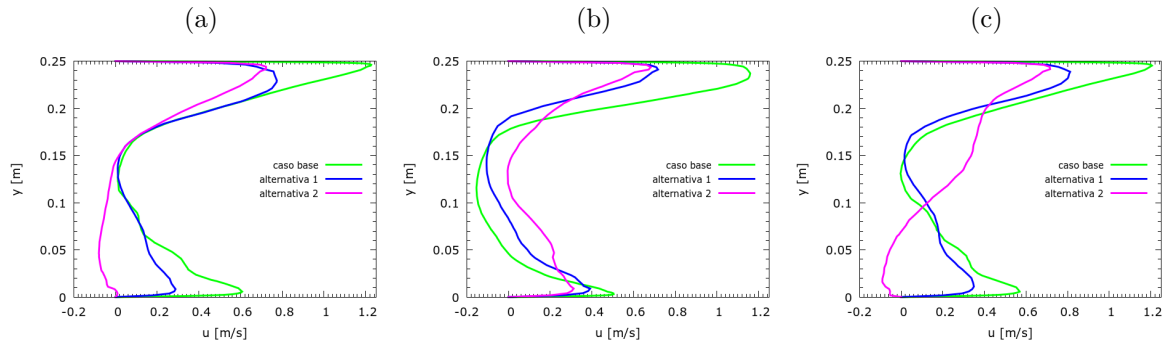
Figura 26: Visão superior das linhas de corrente (caso 2).



Fonte: Próprio autor

Serão, agora, analisados por meio das Figuras 27-29, os perfis de velocidade na direção do escoamento (componente  $u$ ), para os casos base, caso 1 e caso 2. As componentes  $v$  e  $w$  da velocidade irão ser analisados no Apêndice B

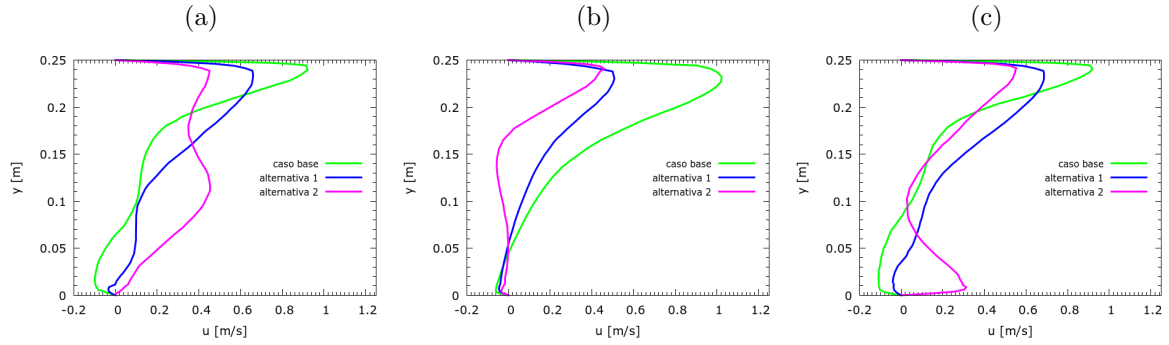
Figura 27: Perfis de velocidade (componente  $u$ ), localizados na região próxima a entrada da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto  $P_1$ ; (b) Ponto  $P_2$ ; e (c) Ponto  $P_3$ .



Fonte: Próprio autor

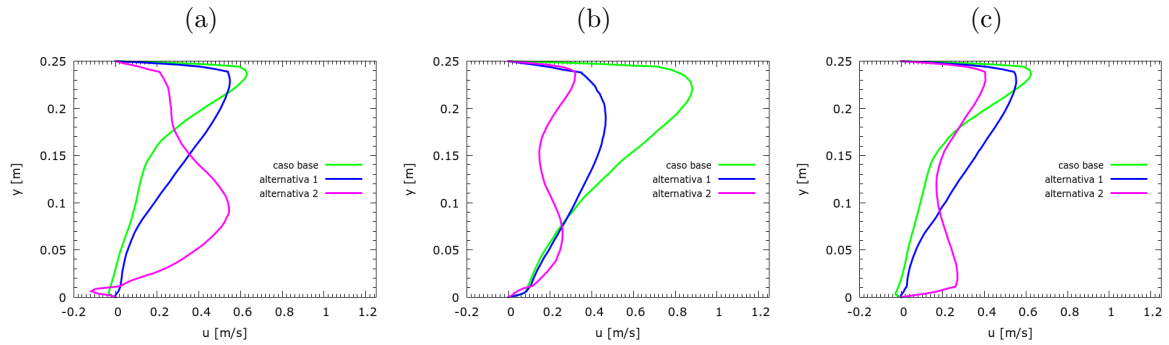


Figura 28: Perfis de velocidade (componente  $u$ ), localizados no meio da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto  $P_4$ ; (b) Ponto  $P_5$ ; e (c) Ponto  $P_6$ .



Fonte: Próprio autor

Figura 29: Perfis de velocidade (componente  $u$ ), localizados na região próxima a saída da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto  $P_7$ ; (b) Ponto  $P_8$ ; e (c) Ponto  $P_9$ .



Fonte: Próprio autor

A partir da análise dos perfis de velocidades para o caso 1 (*alternativa 1*), é possível perceber que as maiores velocidades continuam ocorrendo na porção superior do túnel de vento, em função do efeito recirculatório provocado pela placa retificadora de fluxo. Os valores negativos que ocorreram na região próxima a entrada da seção central no caso base, se mantiveram, porém com menor intensidade, assumindo valor máximo de aproximadamente  $-0,1 \text{ m/s}$  no ponto  $P_2$  na região  $0,1 < y < 0$ . No meio e na região próxima a saída da seção central, também ocorreram valores negativos de velocidade, porém na região próxima à interface, o valor máximo encontrado foi de  $-0,1 \text{ m/s}$  no ponto  $P_6$  e  $-0,1 \text{ m/s}$  no ponto  $P_7$ . É possível perceber uma atenuação das velocidades na porção superior do túnel de vento, em todos os nove pontos analisados. Analisando os perfis de velocidade nos pontos  $P_1 - P_3$  (Figuras 27-a e 27-c),  $P_4 - P_6$  (Figuras 28-a e 28c) e  $P_7 - P_9$  (Figuras 29-a e 29c), se percebe que de forma semelhante ao que ocorreu no caso base, foi observada pouca assimetria. Ainda vale ressaltar que observando o conjunto de perfis de velocidade para o meio da seção central (Figura 28-a) e na região próxima a saída da mesma (Figura 29-a), é possível perceber uma maior tendência de uniformização dos mesmos.

Averiguando os perfis de velocidade para a entrada da seção central do túnel de vento, a partir das Figuras 27-29, para o caso 2 (*alternativa 2*), se percebe que as maiores velocidades ainda predominam na parte superior do túnel de vento, em magnitude semelhante a primeira alternativa de geometria. Porém, também é possível perceber que as velocidades que ocorriam próximas à interface nos casos base e geometria alternativa 1, diminuíram consideravelmente, chegando a zero. Porém tomando valores negativos um pouco acima.

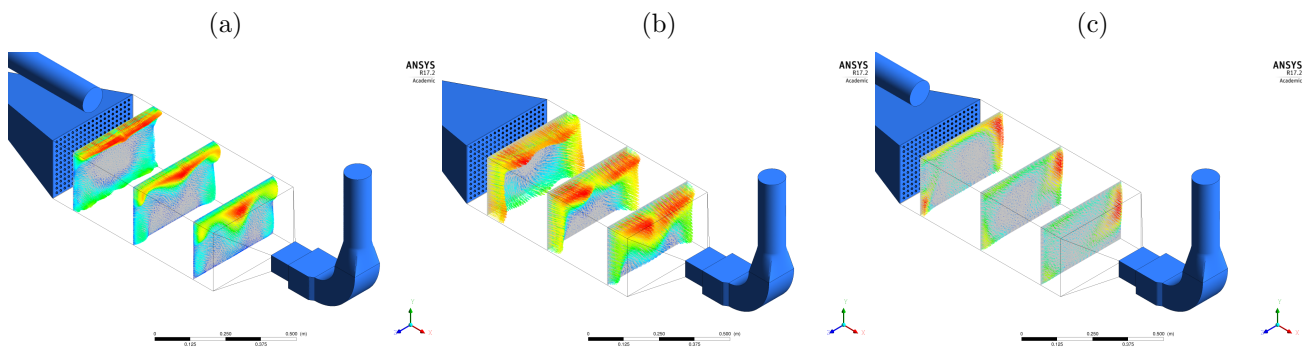


Ainda em relação ao caso 2, por meios dos perfis de velocidade para as extremidades do túnel, Figuras 27-a, 27-c, 28-a, 28-c, 29-a, 29-c, se percebe a existência de uma maior assimetria, em comparação com os casos base e geometria alternativa 1.

Vale ressaltar que, por meio dos perfis de velocidade para as componentes  $v$  e  $w$ , apresentados no apêndice B, é possível perceber que ainda ocorrem velocidades para ambas as componentes de velocidade, tanto para o caso 1, quanto para o caso 2.

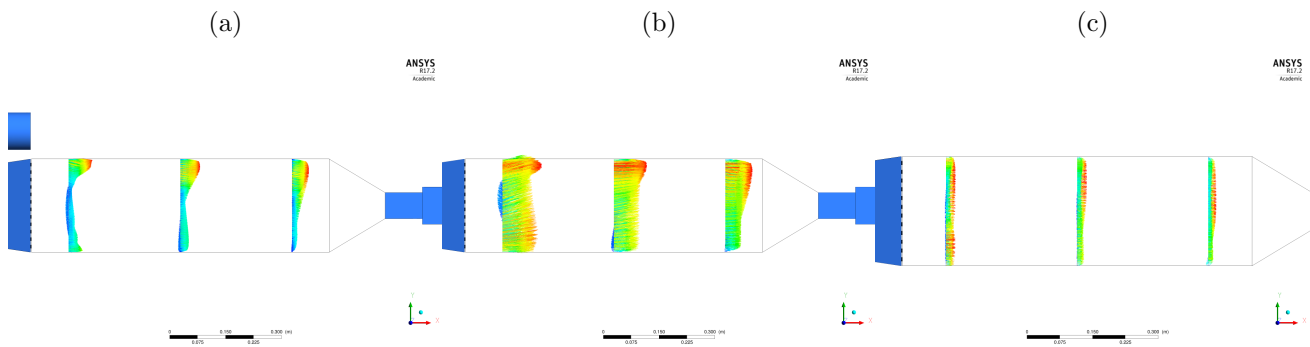
A partir da análise dos vetores de velocidade na seção central do túnel de vento, nos planos localizados nas coordenadas  $x = 10\text{ cm}$ ,  $x = 40\text{ cm}$  e  $x = 70\text{ cm}$ , como mostrado nas Figuras 30 e 31, é possível perceber que o caso 2, com um retificador de fluxo extra, foi o que mostrou a maior tendência de uniformização do escoamento e o caso 1, com um duto de entrada de  $2\text{ m}$ , apresentou as maiores velocidades.

Figura 30: Vetores velocidade plotados nos planos  $x = 10\text{ cm}$ ,  $x = 40\text{ cm}$  e  $x = 70\text{ cm}$ : (a) Caso base; (b) Caso 1; e (c) Caso 2



Fonte: Próprio autor

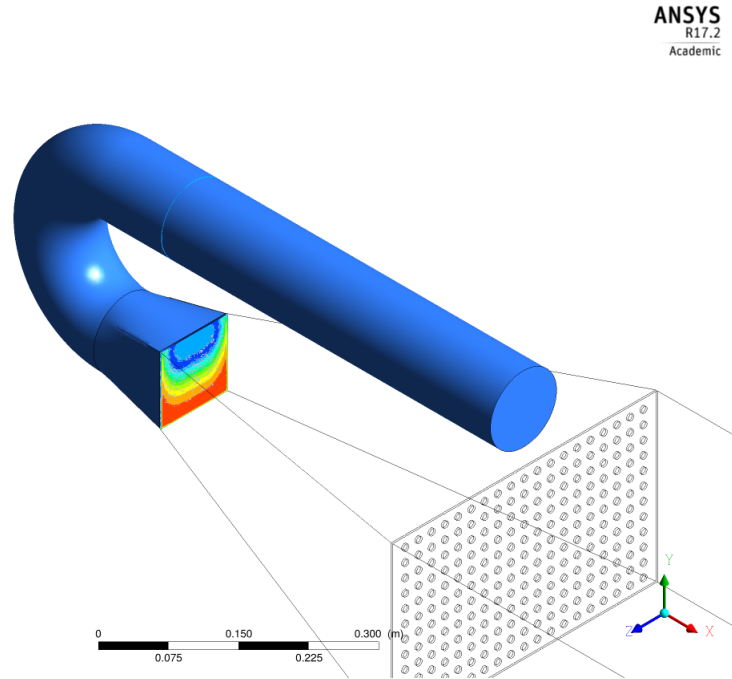
Figura 31: Vista lateral dos vetores velocidade plotados nos planos  $x = 10\text{ cm}$ ,  $x = 40\text{ cm}$  e  $x = 70\text{ cm}$ : (a) Caso base; (b) Caso 1; e (c) Caso 2



Fonte: Próprio autor

Por último, as velocidades que ocorrem logo após o duto de entrada do túnel vento, serão analisadas pelo contorno da velocidades, como indica a Figura 32.

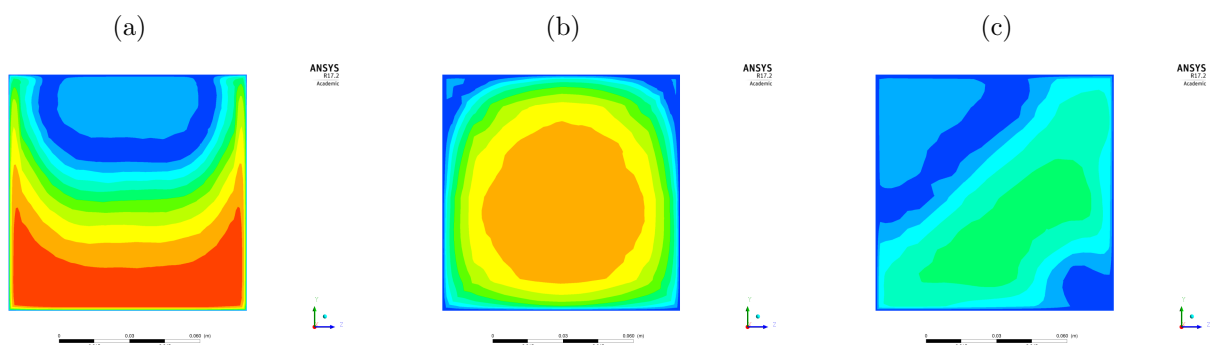
Figura 32: Localização dos contornos de velocidade analisados neste trabalho, após o duto de entrada.



Fonte: Próprio autor

Observando a Figura 33, a qual apresenta os contornos de velocidade após o duto de entrada, para os 3 casos. É possível perceber que, como era esperado, as maiores velocidades para o caso base ocorrem na parcela inferior. O caso 2 é o que apresentou as velocidades mais baixas e demonstrou que o efeito provocado pela curva a 180°, foi minimizado, porém, não foi obtida a distribuição ideal de velocidades, como ocorre para o caso 1, o qual mostra uma distribuição de velocidades proveniente de um fluxo de ar que não passou por nenhuma barreira.

Figura 33: Contornos de velocidade na saída do duto de entrada para os 3 casos: (a) Caso base; (b) Caso 1; e (c) Caso 2



Fonte: Próprio autor

## 6 Conclusão

O presente trabalho objetivou simular numericamente o escoamento no interior do túnel de vento projetado pela UNSW, estudar seu comportamento e propor alterações geométricas a fim de melhorar o escoamento em seu interior. Para executar tais tarefas, foi construído o domínio computacional com formato semelhante a geometria do túnel de vento, discretizou-se o mesmo e foi procedida a solução numérica das equações de transporte em seu interior, com condições de contorno razoáveis. Depois do resultado ser analisado através de linhas de corrente, perfis, contornos e vetores de velocidade, foram propostas geometrias alternativas ao caso real. O mesmo foram analisados através das mesmas maneiras que o caso base. O trabalho concluiu que:

- A presença da placa retificadora de fluxo com a configuração proposta e localizada onde está, não causa o efeito esperado, ou seja, ao invés de fazer com que o fluxo de ar entre de forma mais uniforme na seção central do túnel de vento, ela age como uma espécie de barreira, criando uma recirculação na região anterior a mesma e fazendo com que o fluxo de ar entre de forma bastante assimétrica em relação ao eixo  $x$  na seção central;
- A curva a  $180^\circ$  existente no duto de entrada, faz com que ocorra uma aceleração indesejada do fluxo de ar na região posterior a mesma. Tal aceleração parece acentuar o efeito negativo provocado pela placa retificadora de fluxo;
- A escolha por substituir a curva no duto de entrada, por um duto reto de 2 metros de comprimento, se mostrou vantajosa em relação a mitigação da aceleração na entrada da seção central;
- Os efeitos negativos provocados pela placa retificadora de fluxo se mantiveram no caso alternativo 1, porém com menor intensidade. Tal atenuação destes efeitos resultou em um escoamento mais uniforme na seção central do túnel de vento. Quando comparado ao caso base, foram atenuados picos de velocidade e observou-se a ocorrência de um número menor de velocidades negativas;
- Adicionar um segundo condicionador de fluxo antes da seção de expansão, como foi o caso da geometria alternativa 2, se mostrou uma alternativa vantajosa por reduzir consideravelmente os efeitos da aceleração provocada pela curva no duto de entrada e manter praticamente intacta a característica portátil do aparato;
- Em relação aos efeitos negativos provocados pela placa retificadora de fluxo, estes se mantiveram na geometria alternativa 2, porém com menor intensidade. As linhas de corrente para o caso base e geometria alternativa 1, mostraram a presença de uma recirculação na região da placa retificadora de fluxo, para a geometria alternativa 2 ocorreram duas recirculações de menor intensidade e o escoamento na seção central se mostrou mais estável, quando comparado ao caso base e a geometria alternativa 1. Apresentando valores menores, atenuações de picos de velocidade e número menor de velocidades negativas, mesmo comparado ao caso 1.
- As modificações propostas aparentemente não trazem melhorias significativas para o problema, porém, dão pistas no sentido de geometrias mais favoráveis, as quais serão discutidas a seguir.

## 7 Sugestões para Trabalho Futuros

- Executar as simulações numéricas com o domínio mais esbelto (alongado), a fim de verificar se as linhas de corrente se linearizam, ou se mantem como um problema de equalização entre as condições de contorno;
- Analisar o comportamento aerodinâmico, por simulação numérica, do caso base e geometria alternativa 2, sem a presença do retificador de fluxo na entrada da seção central;
- Analisar o comportamento aerodinâmico, por simulação numérica, do caso base e geometria alternativa 2, sem a presença da expansão vertical na entrada, somente expansão horizontal;
- Analisar o comportamento aerodinâmico, por simulação numérica, do caso base e geometria alternativa 2, com a presença de aletas direcionadoras de fluxo que acompanhem a expansão;
- Analisar o comportamento aerodinâmico, por simulação numérica, da geometria alternativa 2, mudando o formato do retificador de fluxo extra para um formato cônico ao invés de cilíndrico;
- Analisar o comportamento aerodinâmico, por simulação numérica, do túnel de vento proposto por Capelli et al. (2009);
- Caso nenhuma das mudanças propostas acima acarrete em melhorias significativas para o problema, promover variações entre as mesmas;
- Validar os resultados apartir da análise física, em laboratório, do comportamento aerodinâmico da configuração de túnel de vento que apresente os melhores resultados;
- Analisar a real influência do comportamento aerodinâmico na seção central do túnel de vento, sob a medição dos compostos odorantes.

## Referências Bibliográficas

- Andreão, W. L. (2016). Análise da influência do escoamento no interior de um câmara de fluxo dinâmica na taxa de emissão de sulfeto de hidrogênio. Dissertação de Mestrado (PPGEA - Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental), UFES (Universidade Federal do Espírito Santo), Vitória, Brazil.
- Blanes-Vidal, V., Guàrdia, M., Dai, X.-R., and Nadimi, E. S. (2012). Emissions of  $\text{nh}_3$ ,  $\text{co}_2$  and  $\text{h}_2\text{s}$  during swine wastewater management: characterization of transient emissions after air-liquid interface disturbances. *Atmospheric Environment*, 54:408–418.
- Bockreis, A. and Steinberg, I. (2005). Measurement of odour with focus on sampling techniques. *Waste Management*, 25(9):859–863.
- Capelli, L., Sironi, S., Céntola, P., Del Rosso, R., and Grande, M. I. (2008). Electronic noses for the continuous monitoring of odours from a wastewater treatment plant at specific receptors: Focus on training methods. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 131(1):53–62.
- Capelli, L., Sironi, S., and Del Rosso, R. (2013). Odor sampling: techniques and strategies for the estimation of odor emission rates from different source types. *Sensors*, 13(1):938–955.
- Capelli, L., Sironi, S., Del Rosso, R., and Centola, P. (2009). Predicting odour emissions from wastewater treatment plants by means of odour emission factors. *Water Research*, 43(7):1977–1985.
- Chao, H.-P., Lee, J.-F., Lee, C.-K., and Huang, H.-C. (2005). An alternative method for predicting organic solute volatilization rates under gas and liquid turbulence. *Chemosphere*, 59(5):711–720.
- Conselho Nacional de Meio Ambiente (Brasil, 1990). Resolução CONAMA 003/90.
- Durmusoglu, E., Corapcioglu, M. Y., and Tuncay, K. (2005). Landfill settlement with decomposition and gas generation. *Journal of Environmental Engineering*, 131(9):1311–1321.
- Eklund, B. (1992). Practical guidance for flux chamber measurements of fugitive volatile organic emission rates. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 42(12):1583–1591.
- Fernandes, I. F. (2016). Análise aerodinâmica do túnel de vento portátil para estimativa da emissão de compostos odorantes e  $\text{CO}_2$  a partir de superfícies líquidas em ete e superfícies sólidas em aterros sanitários. Monografia (Bacharel em Engenharia Ambiental), UFES (Universidade Federal do Espírito Santo), Vitória, Brazil.
- Fluent, A. (2016). Ansys fluent theory guide. *ANSYS Inc., USA*, 15317:724–746.
- Fox, R. W., Pritchard, P. J., and McDonald, A. T. (2000). *Introdução À Mecânica Dos Fluidos*. Grupo Gen-LTC.
- Frechen, F.-B. (2004). Odour emission inventory of german wastewater treatment plants- odour flow rates and odour emission capacity. *Water Science and Technology*, 50(4):139–146.

- Hudson, N. and Ayoko, G. A. (2008a). Odour sampling 1: Physical chemistry considerations. *Bioresource Technology*, 99(10):3982–3992.
- Hudson, N. and Ayoko, G. A. (2008b). Odour sampling. 2. comparison of physical and aerodynamic characteristics of sampling devices: a review. *Bioresource Technology*, 99(10):3993–4007.
- Hudson, N., Ayoko, G. A., Dunlop, M., Duperouzel, D., Burrell, D., Bell, K., Gallagher, E., Nicholas, P., and Heinrich, N. (2009). Comparison of odour emission rates measured from various sources using two sampling devices. *Bioresource Technology*, 100(1):118–124.
- Hudson, N. A. (2009). *Investigation of mechanisms governing emission of odorants*. PhD thesis, Queensland University of Technology.
- Jiang, K., Bliss, P. J., and Schulz, T. J. (1995). The development of a sampling system for determining odor emission rates from areal surfaces: Part i. aerodynamic performance. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 45(11):917–922.
- Klenbusch, M. (1986). Measurement of gaseous emission rates from land surfaces using an emission-isolation flux chamber. user’s guide. Technical report, Radian Corp., Austin, TX (USA).
- Latos, M., Karageorgos, P., Kalogerakis, N., and Lazaridis, M. (2011). Dispersion of odorous gaseous compounds emitted from wastewater treatment plants. *Water, Air, & Soil Pollution*, 215(1-4):667–677.
- Lewis, W. and Whitman, W. (1924). Principles of gas absorption. *Industrial & Engineering Chemistry*, 16(12):1215–1220.
- Loriato, A. G., Salvador, N., Santos, J. M., Moreira, D. M., and Reis Jr, N. C. (2012). Odour-a vision on the existing regulation. *Chemical Engineering*, 30.
- Mark Keating, A. (2011). Accelerating cfd solutions. *Advantage*, 1:48.
- Melo de Sá, L. (2011). Modelagem matemática da formação e emissão do gás sulfídrico no tratamento de esgotos domésticos.
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 32(8):1598–1605.
- National Research Council (1979). Odors from stationary and mobile sources. In *Odors from Stationary and Mobile Sources*. National Academy of Sciences.
- Parker, D., Ham, J., Woodbury, B., Cai, L., Spiehs, M., Rhoades, M., Trabue, S., Casey, K., Todd, R., and Cole, A. (2013). Standardization of flux chamber and wind tunnel flux measurements for quantifying volatile organic compound and ammonia emissions from area sources at animal feeding operations. *Atmospheric Environment*, 66:72–83.
- Parker, D. B., Cole, N. A., Casey, K. D., Galvin, G., Ormerod, R., Paris, C. S., Caraway, E. A., and Rhoades, M. B. (2009). Wind tunnels vs. flux chambers: Area source emission measurements and the necessity for voc and odour correction factors. In *Proceedings 19th International Clean Air and Environment Conference, Perth, Australia*.

- Prata, A. A., Santos, J. M., Beghi, S. P., Fernandes, I. F., Vom Marttens, L. L., Neto, L. I. P., Martins, R. S., Reis, N. C., and Stuetz, R. M. (2016). Dynamic flux chamber measurements of hydrogen sulfide emission rate from a quiescent surface—a computational evaluation. *Chemosphere*, 146:426–434.
- Prata Jr, A., Santos, J., Timchenko, V., and Stuetz, R. M. (2014). Use of computational fluid dynamics in the analysis of a portable wind tunnel for sampling of odorous emissions at liquid surfaces. *Chem. Eng. Trans*, 40:14.
- Santos, J. M., Kreim, V., Guillot, J.-M., Reis, N. C., de Sá, L. M., and Horan, N. J. (2012). An experimental determination of the  $h_{2s}$  overall mass transfer coefficient from quiescent surfaces at wastewater treatment plants. *Atmospheric Environment*, 60:18–24.
- Sohn, J., Smith, R., Hudson, N., and Choi, H. (2005). Gas sampling efficiencies and aerodynamic characteristics of a laboratory wind tunnel for odour measurement. *Biosystems Engineering*, 92(1):37–46.
- Souza, C., Chernicharo, C., and Melo, G. (2012). Methane and hydrogen sulfide emissions in uasb reactors treating domestic wastewater. *Water Science and Technology*, 65(7):1229–1237.
- VDI 3880 (2011). *German Guideline: Olfactometry Static sampling*. Verein Deutscher Ingenieure.
- Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson Education.
- Wang, X., Jiang, J., and Kaye, R. (2001). Improvement of a wind-tunnel sampling system for odour and vocs. *Water Science and Technology*, 44(9):71–77.

## Apêndice A

A malha construída inicialmente possui 2 milhões de pontos nodais, é híbrida, com elementos prismáticos nas proximidades da parede e elementos tetraédricos no núcleo do domínio. Foram contruídos modificações desta, mantendo os seus aspectos construtivos e variando a quantidade de pontos nodais, como é mostrado na Tabela 6.

O critério de convergência utilizado para a malha  $Me_3$  foi de  $10^{-4}$ .

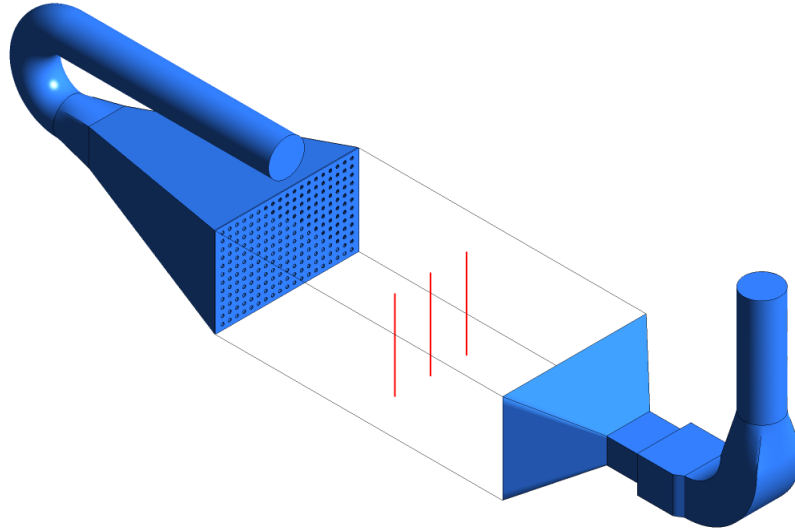
Tabela 6: Números de pontos nodais das malhas utilizadas no teste de malhas.

| Tipo de Refinamento da Malha | Número de Pontos Nodais |
|------------------------------|-------------------------|
| $Me_1$                       | 1124388                 |
| $Me_2$                       | 2002887                 |
| $Me_3$                       | 5683390                 |

Fonte: Próprio autor

O parâmetro utilizado para avaliar as malhas foram os três perfis de velocidade no meio da seção central do túnel de vento, como indicado na Figura 34. Será utilizada a abordagem apresentada no tópico 5.1.3 para nomenclatura das malhas.

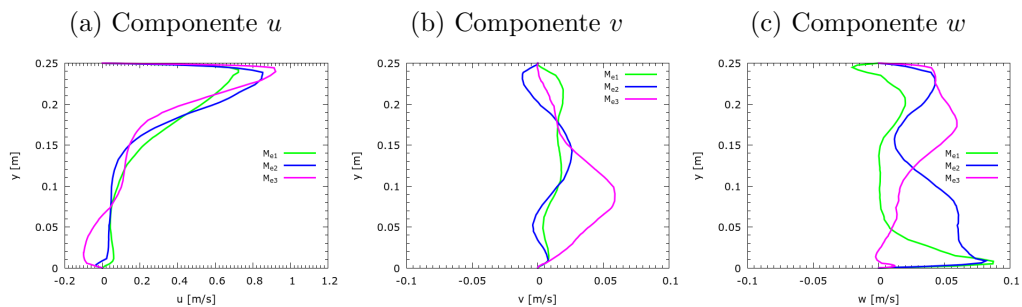
Figura 34: Localização dos perfis de velocidade utilizados para executar o teste de malhas



Fonte: Próprio autor

As Figuras 35-37, apresentam os perfis de velocidade  $P_3$ ,  $P_4$  e  $P_5$  para as três malhas, divididas em suas velocidades  $u$ ,  $v$  e  $w$ , respectivamente.

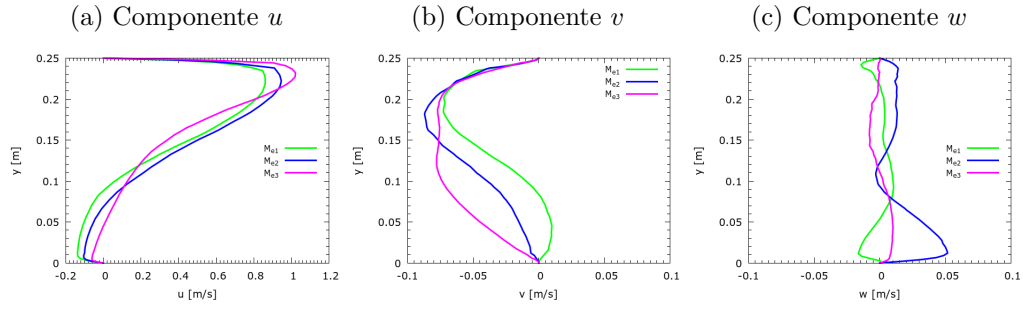
Figura 35: Perfis de velocidade no ponto  $P_4$  para as malhas  $Me_3$  (azul),  $Me_2$  (verde) e  $Me_1$  (vermelha), divididos em suas componentes  $u$ ,  $v$  e  $w$ .



Fonte: Próprio autor

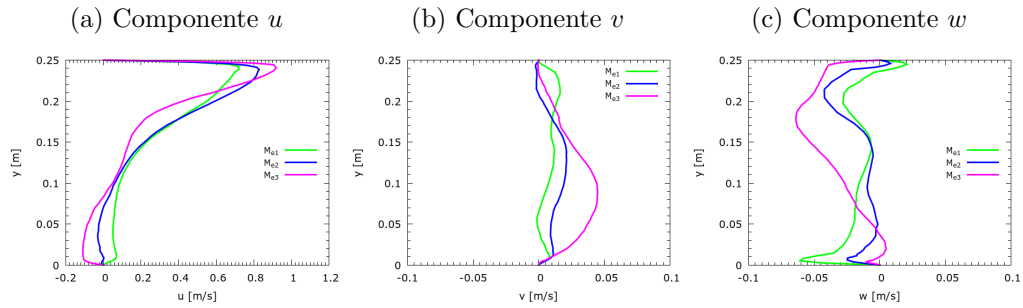


Figura 36: Perfis de velocidade no ponto  $P_5$  para as malhas  $Me_3$  (azul),  $Me_2$  (verde) e  $Me_1$  (vermelha), divididos em suas componentes  $u, v$  e  $w$ .



Fonte: Próprio autor

Figura 37: Perfis de velocidade no ponto  $P_6$  para as malhas  $Me_3$  (azul),  $Me_2$  (verde) e  $Me_1$  (vermelha), divididos em suas componentes  $u, v$  e  $w$ .



Fonte: Próprio autor

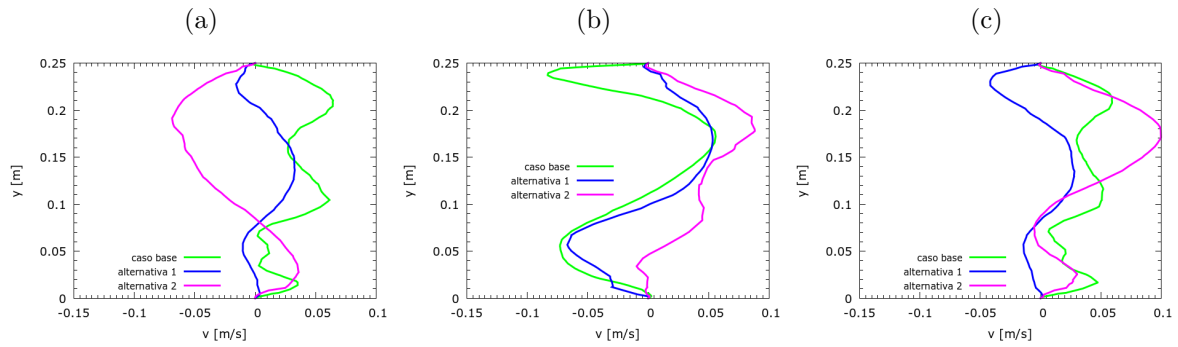
Observa-se que existe alguma variação entre os perfis de velocidade localizados nos três pontos, para as três malhas. Portanto, foi escolhido utilizar a malha de 5 milhões de pontos nodais, para ser mais conservador.

## Apêndice B

### Perfis de velocidade (componente $v$ ):

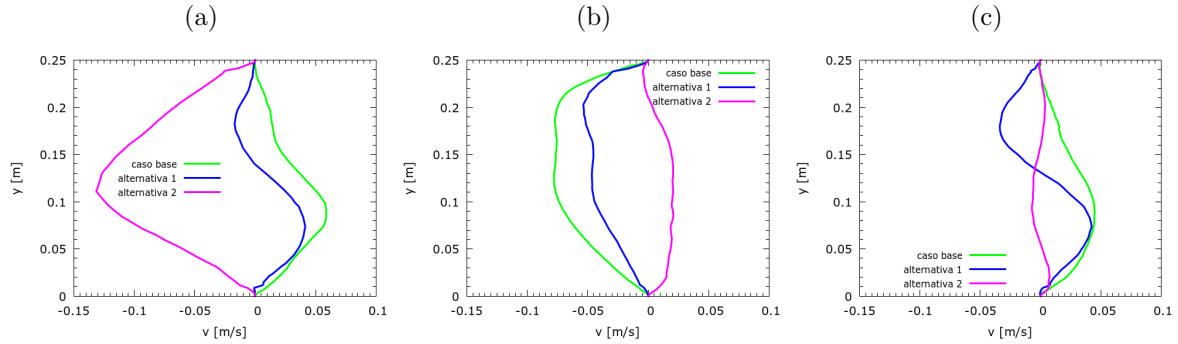
A partir das Figuras 38-40, as quais apresentam os perfis de velocidade para a componente  $v$  em todos os pontos analisados, se observa que para todos os 3 casos estudados e em todos os nove pontos onde foram analisados os perfis de velocidades, os valores retornados foram sempre diferentes de zero, o que não é bom, uma vez que não era desejado que a velocidade  $u$  fosse majoritária e não existissem velocidades em outras direções. A geometria alternativa 2 é a que apresentou os maiores valores, chegando próximo a 0,15  $m/s$  no meio da seção central.

Figura 38: Perfis de velocidade, componente  $v$ , localizados na região próxima a entrada da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto  $P_1$ ; (b) Ponto  $P_2$ ; e (c) Ponto  $P_3$ .



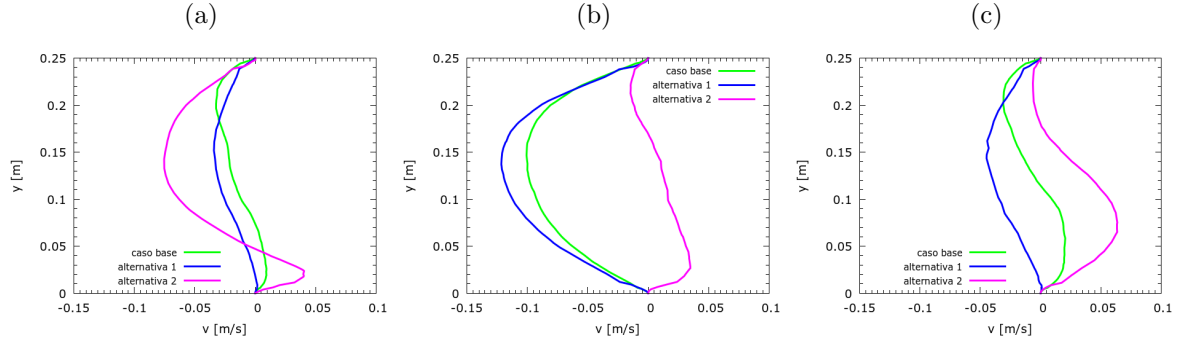
Fonte: Próprio autor

Figura 39: Perfis de velocidade, componente  $v$ , localizados no meio da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto  $P_4$ ; (b) Ponto  $P_5$ ; e (c) Ponto  $P_6$ .



Fonte: Próprio autor

Figura 40: Perfis de velocidade, componente  $v$ , localizados na região próxima a saída da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto  $P_7$ ; (b) Ponto  $P_8$ ; e (c) Ponto  $P_9$ .

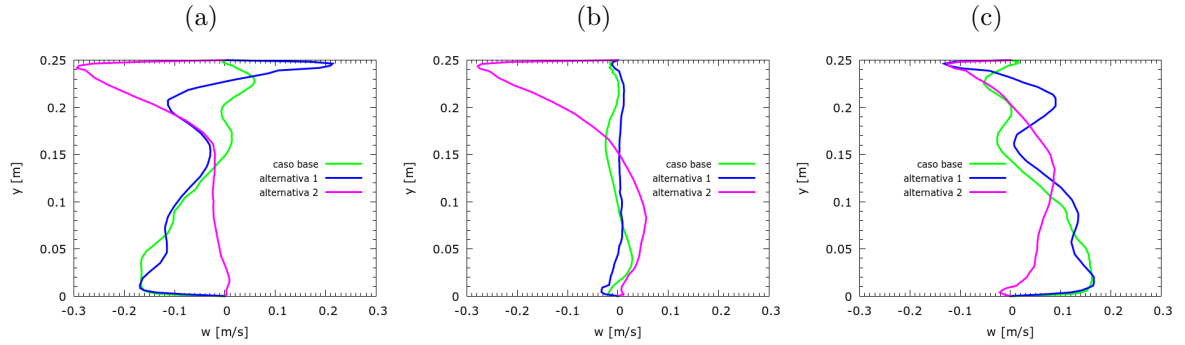


Fonte: Próprio autor

### Perfis de velocidade (componente $w$ ):

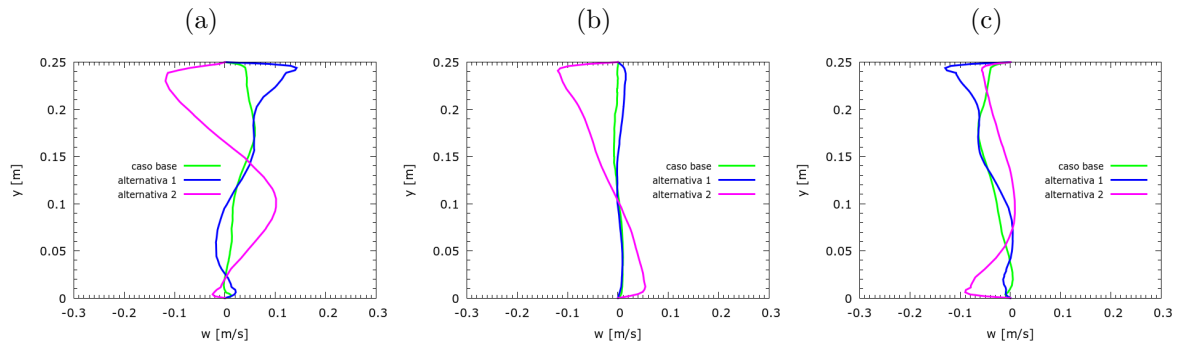
Assim como foi observado para a componente  $v$ , os valores da velocidade  $w$  para as três geometrias e nos nove pontos analisados, retornaram valores diferentes de zero, como pode ser observado nas Figuras 41-43. Os maiores picos de velocidade, ocorreram na entrada e saída da seção central, chegando a assumir valores superiores a  $0,20 \text{ m/s}$ .

Figura 41: Perfis de velocidade, componente  $w$ , localizados na região próxima a entrada da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto  $P_1$ ; (b) Ponto  $P_2$ ; e (c) Ponto  $P_3$ .



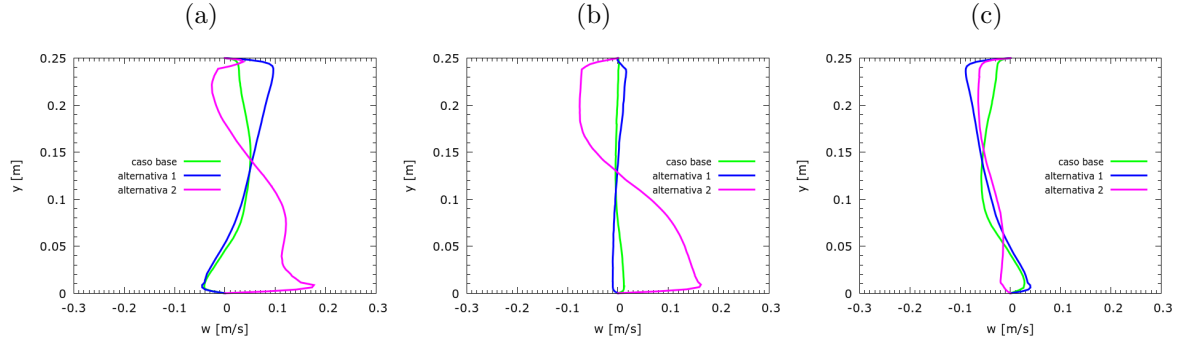
Fonte: Próprio autor

Figura 42: Perfis de velocidade, componente  $w$ , localizados no meio da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto  $P_4$ ; (b) Ponto  $P_5$ ; e (c) Ponto  $P_6$ .



Fonte: Próprio autor

Figura 43: Perfis de velocidade, componente  $w$ , localizados na região próxima a saída da seção central do túnel de vento, casos base e nas duas alternativas de geometria: (a) Ponto  $P_7$ ; (b) Ponto  $P_8$ ; e (c) Ponto  $P_9$ .



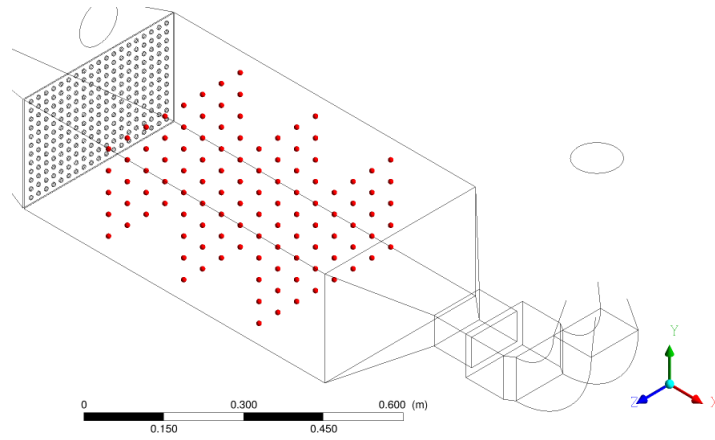
Fonte: Próprio autor

Vale ressaltar que tais valores são pequenos quando em comparação com os encontrados para a componente  $u$ , na direção principal do escoamento, porém atrapalham alcançar o comportamento esperado e ideal para o bom funcionamento do equipamento, que é o estabelecimento de escoamento e uma camada limite bem desenvolvida.

## Apêndice C

Com fins de confrontar os dados obtidos na presente simulação numérica e dados obtidos por um trabalho experimental, serão postos em análise os gráficos de distribuição de velocidade apresentados por Jiang et al. (1995) e pelo presente trabalho. Jiang et al. (1995) obteve os dados para o gráfico de distribuição de velocidades em três seções transversais, localizadas em  $x = 200 \text{ mm}$ ,  $x = 400 \text{ mm}$  e  $x = 600 \text{ mm}$ , ao longo do comprimento da seção central do túnel de vento, cada seção foi dividida em 40 quadrados com  $50 \times 50 \text{ mm}$  e a velocidade foi medida no centro de cada um desses quadrados. O mesmo procedimento foi realizado para simulação numérica procedida no presente trabalho. A Figura 44, mostra a localização dos pontos utilizados para montar o gráfico.

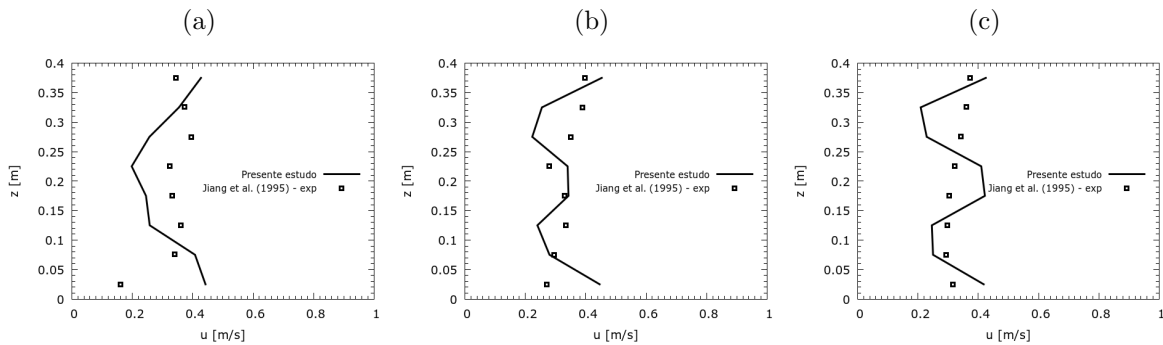
Figura 44: Localização dos três conjuntos de pontos utilizados para calcular as três distribuições de velocidade, localizadas em  $x = 200 \text{ mm}$ ,  $x = 400 \text{ mm}$ ,  $x = 600 \text{ mm}$ , respectivamente.



Fonte: Próprio autor

O gráfico de distribuição de velocidades horizontal, mostrado na Figura 45, foi obtido calculando a média dos 5 pontos localizados nas 8 linhas verticais ao longo das 3 seções transversais, ou seja, foram obtidos 8 valores para cada seção transversal.

Figura 45: Gráficos de distribuições de velocidade horizontal para a seção central do túnel de vento, localizados em: (a)  $x=200$ ; (b)  $x=400$  e (c)  $x=600$ .



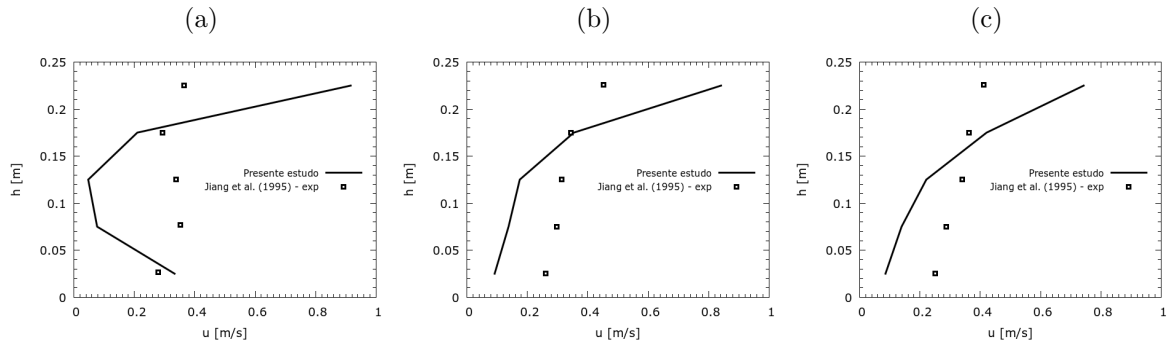
Fonte: Próprio autor

Observando os gráficos da Figura 45, se percebe que as curvas tiveram comportamentos diferentes, as velocidades na região próxima a  $z = 0 \text{ m}$  foram maiores para o caso de Jiang et al. (1995), enquanto que na região entre a largura ( $z$ ) de  $0,05$  e  $0,35 \text{ m}$  as velocidades para o presente estudo foram maiores na maior parte de sua extensão, salvo a região central entre as larguras de  $0,15$  e  $0,30$  para o meio da seção central (Figura 45-b) e para

a região próxima a saída da seção central (Figura 45-c). Por último, na região próxima a  $z = 0,4\text{ m}$ , as velocidades para o presente estudo foram maiores.

O gráfico de distribuição de velocidades vertical, mostrado na Figura 46, foi obtido calculando a média dos 8 pontos localizados nas 5 linhas horizontais ao longo das 3 seções transversais, ou seja, foram obtidos 5 valores para cada seção transversal.

Figura 46: Gráficos de distribuições de velocidade vertical para a seção central do túnel de vento, localizados em: (a)  $x=200$ ; (b)  $x=400$  e (c)  $x=600$ .



Fonte: Próprio autor

Em relação aos gráficos da Figura 46, os quais mostram a distribuição de velocidades vertical, se observa que entre as alturas de  $0,025$  e  $0,17\text{ m}$  as velocidades para o estudo de Jiang et al. (1995) foram maiores, salvo na região próxima a entrada da seção central em  $x = 0,2\text{ m}$  (Figura 46-a). Nas alturas mais elevadas, próximas ao topo da seção central, as velocidades para o presente estudo foram maiores. De maneira geral, as maiores velocidades para ambos os casos ocorreram nas regiões próximas ao topo, a diferença entre ambos é que os gráficos provenientes do trabalho de Jiang et al. (1995) são mais homogêneos.

A divergência entre os dados obtidos por Jiang et al. (1995) e pelo presente trabalho, parece ocorrer em função das diferenças nas geometrias utilizadas nos dois trabalhos e nas condições de contorno. A geometria utilizada por Jiang et al. (1995) não contém a extensão do duto de saída, a mesma foi incorporada a atual configuração do túnel de vento por Wang et al. (2001) com o objetivo de melhorar a amostragem. Em relação as condições de contorno, para que os resultados ficassem ao máximo similares seria necessário utilizar as mesmas condições de contorno ou algo aproximado, porém, não foram obtidas informações nesse sentido. Logo, ainda que não seja desejada, a divergência entre os resultados obtidos pelos dois estudos é natural.