

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

FELIPE SIMÕES MACIEL

**IMPACTO DO ACOPLAMENTO DE MODELAGEM METEOROLÓGICA WRF
COM MODELAGEM CFD DE MICROESCALA NO ESTUDO DO CAMPO DE
VENTO NO INTERIOR DO DOSSEL URBANO**

VITÓRIA

2020

FELIPE SIMÕES MACIEL

**IMPACTO DO ACOPLAMENTO DE MODELAGEM METEOROLÓGICA WRF
COM MODELAGEM CFD DE MICROESCALA NO ESTUDO DO CAMPO DE
VENTO NO INTERIOR DO DOSSEL URBANO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Neyval Costa Reis Jr.

VITÓRIA

2020

Ficha Catalográfica

**IMPACTO DO ACOPLAMENTO DE MODELAGEM METEOROLÓGICA WRF
COM MODELAGEM CFD DE MICROESCALA NO ESTUDO DO CAMPO DE
VENTO NO INTERIOR DO DOSSEL URBANO**

FELIPE SIMÕES MACIEL

Dissertação submetida como requerimento parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovado em ____, _____, 2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Neyval Costa Reis Jr., PhD
Orientador

Prof. Elisa Valentim Goulart, PhD
Coorientadora

VITÓRIA
2020

AGRADECIMENTOS

Dirijo meus agradecimentos primeiramente ao Senhor Deus criador de todas as coisas, por toda graça que provém em minha vida.

Aos meus pais Maria Josefa e Pedro por todos os valores que me passaram e o grande suporte pela educação.

Aos meus irmãos Rodrigo e Alvaro por todo apoio, suporte, amizade em todos os momentos.

Ao professor Neyval, pelo excepcional trabalho de orientação e por compartilhar sua experiência no sentido de produzir o melhor. Muito obrigado pela paciência e grande colaboração em para conclusão deste trabalho.

Ao departamento de Engenharia Ambiental por toda infraestrutura e conhecimentos transmitidos que permitiram a evolução desta pesquisa.

Agradeço especialmente às professoras Elisa Valentim Goulart e Jane Meri Santo pelo excepcional trabalho transmitindo o seu conhecimento em sala de aula, além de todas as sugestões e orientações. Pessoas inspiradoras.

Aos caros amigos e companheiros de trabalho do NQUALIAR Alexandre Santiago, Victória Venturini, Karine Klippel, Jamily Faé, Luisa Peláez, Mayana Rigo, Yasmin Kaore, Vitor Ferreira, Vitor Mateus, Igor Richa, Adrielle de Melo, Ana Teresa, Cristina Lima e Ramon Martins pelo compartilhamento de momentos memoráveis e por tornarem mais agradável cada dia de trabalho.

Ao Pós-Doutorando Alexandre por todo suporte com a modelagem de mesoescala com o WRF.

Ao IEMA, em particular o técnico Douglas por todo o suporte durante a campanha de medição e por ceder um espaço para alocação da estação meteorológica.

A administração da MCK Locadora de veículos e do condomínio Morada da Praia por ceder espaço para instalação das estações meteorológicas.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq, pelo apoio financeiro ao programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental da UFES.

RESUMO

O presente trabalho investiga o impacto do acoplamento de dados meteorológicos de modelo de mesoescala como condições de contorno para modelos de microescala baseado em CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para uma área urbana real. Foram realizadas simulações numéricas utilizando CFD, considerando dados de entrada transientes provenientes do modelo WRF e de estação meteorológica fixa. A geometria estudada é baseada em um bairro da área urbana real da Região Metropolitana da Grande Vitória. A modelagem matemática CFD de microescala consiste na resolução das equações de conservação de massa e *momentum* para o escoamento transiente. O modelo k- ϵ padrão foi usado para o tratamento da turbulência. O acoplamento de dados de velocidade e direção do vento provenientes do modelo de mesoescala (considerando a dinâmica macroscópica da atmosfera) é feito por meio de uma *User Defined Function* (UDF), que basicamente acopla dados do modelo WRF em pontos coincidentes com a entrada do domínio CFD. A mesma UDF foi utilizada para acoplar dados da estação meteorológica do Aeroporto de Vitória como dados de entrada para o domínio CFD. Com o objetivo de avaliar a precisão dos resultados obtidos foi conduzida uma campanha de medição de velocidade e direção do vento em três pontos dentro do bairro com 16 dias de duração. Os resultados obtidos mostram que a viabilidade da utilização do acoplamento de dados meteorológicos de modelagem de mesoescala e dados de estações de medição para estudos do campo de vento em microescala por meio de CFD. Contudo, a qualidade dos resultados da metodologia de acoplamento é fortemente dependente da qualidade dos dados provenientes do monitoramento ou da modelagem de mesoescala. A utilização de acoplamento de dados de modelos de mesoescala em modelagem CFD de microescala é importante principalmente em áreas onde não há disponível estações de medição meteorológica. Neste sentido, fica disponível a possibilidade de utilização de modelos como o WRF para geração de dados de entrada para estudos do escoamento do ar em maiores detalhes dentro do dossel urbano por meio de CFD.

Palavras-Chave: Poluição do ar, modelagem de mesoescala, modelagem de microescala, escoamento do ar, área urbana real.

ABSTRACT

The present work investigates the impact of the use of mesoscale meteorological model data coupled as boundary conditions for microscale CFD (Computational Fluid Dynamics) models for a real urban area. Numerical simulations were performed using CFD considering transient input data from the WRF model and from the fixed weather station. The geometry studied is based on a real urban area of Metropolitan Region of Vitória, in Brazil. The microscale CFD modeling consists of solving the mass and momentum conservation equations for transient flow, on a discretized domain formed by 3D hexahedral mesh. The standard k- ϵ model was used for the treatment of turbulence. The coupling of wind speed and direction data from the mesoscale model (considering the macroscopic dynamics of the atmosphere) is carried out by using a User Defined Function (UDF), which basically reads output data from the WRF simulations and creates boundary conditions for the microscale CFD simulations. The same UDF was used to couple data from Vitória Airport weather station as input data for CFD domain. In order to evaluate the accuracy of the simulations, a 16 days field campaign was also conducted to measure wind speed and direction at three points within the neighborhood. The considerable gain was observed comparing WRF results with CFD-WRF coupling results at the monitoring points. The velocity and direction values from the simulations follow a trend similar to the data measured in the field and are in accordance with commonly used acceptance criteria. For the case with airport station data as an entry condition, there is a significantly greater agreement between the data. This is due to the better quality of input data provided by the airport meteorological station. The result of microscale modeling using mesoscale data is shown to be sensitive to the quality of the input data, since the better agreement between the results is observed in periods of better WRF data quality. Also, good results were obtained from the use of measured data as input for the CFD model. Using data from mesoscale models such as WRF is a viable option for studying wind field modeling and pollutant dispersion in areas where meteorological measurement stations are not available.

Keywords: Air pollution, mesoscale modeling, microscale modeling, air flow, real urban area.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Exemplos de diferentes tipos de estratégia de representação do meio urbano para estudos de escoamento do ar e dispersão de poluentes. (a) Arranjo urbano genérico. Fonte: Ramponi *et al.*, (2015); e (b) Arranjo urbano real da área urbana de Bergpolder Zuid, Rotterdam. Fonte: Toparlar *et al.*, (2015).....20
- Figura 2 – Representação tridimensional dos modelos utilizados tanto para a modelagem computacional quanto para o estudo em túnel de vento considerando arranjos de blocos regulares (SimpleC), arranjo regular com diferentes alturas (SimpleV) e arranjo realista com diferentes formatos de alturas (DAPPLE). Fonte: Carpentieri et al. (2012)22
- Figura 3 – Média espacial dos perfis de velocidade vertical comparando diferentes configurações do arranjo urbano (SimpleC e SimpleV). Resultados da modelagem CFD à esquerda e resultados experimentais de túnel de vento a direita. Fonte: Carpentieri et al. (2012).....23
- Figura 4 – A) Domínio computacional e malha criada para a área urbana; B) Distribuição da velocidade do vento na faixa de 1,6 m na horizontal causada por vento norte para velocidade de referência de 10 m/s; C) Distribuição da concentração de poeira sobre vento norte em um plano a 1,6 m do solo. Fonte: Luo et al (2016).....29
- Figura 5 – Localização geográfica da área de estudo dentro do mapa do estado do Espírito Santo. (a) Em vermelho a Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV); (b) Município de Vitória indicado no canto inferior direito e limites do bairro Jardim Camburi no canto direito superior. Fonte: O autor.32
- Figura 6 - Domínios computacionais do modelo WRF com a indicação da localização de cada *grid* com diferentes resoluções espaciais. O *grid* D04 contém a área onde está localizada a região metropolitana de Vitória e o Bairro em estudo. Fonte: Modificado de Santiago (2015).34
- Figura 7 - Disposição dos 14 pontos de aquisição de dados do modelo de mesoescala WRF. As linhas brancas correspondem às arestas do grid D04. Imagem de satélite obtida de Google Earth. Fonte: O autor.35
- Figura 8 – Vista em perspectiva superior do domínio computacional e *grid* indicando a localização de todas as faces laterais e superiores onde as condições de contorno são definidas. Fonte: O autor.40
- Figura 9 - Vista superior do domínio computacional evidenciando o plano na altura zero (chão) onde são indicadas a localização das áreas referentes às diferentes ocupações de terrenos com rugosidades específicas de acordo com a Tabela 3.....41
- Figura 10 – Esquema da metodologia de acoplamento entre dados da modelagem de WRF de mesoescala em modelagem CFD de microescala onde são indicados as principais etapas da

modelagem WRF e da modelagem CFD bem como a estratégia de interação entre os modelos. Fonte: O autor.....	43
Figura 11 – Localização da estação meteorológica fixa do aeroporto de Vitória (PT-Aero) em relação ao bairro Jardim Camburi. O círculo vermelho indica a localização da estação meteorológica do aeroporto. Fonte: <i>GoogleEarth</i>	44
Figura 12 - (a) Região do bairro onde estão localizadas as estações de monitoramento dos dados; (b) Posição específica dos pontos de monitoramento PT-01, PT-02 e PT-03. Fonte: Modificado de <i>Google Earth</i>	47
Figura 13 - Detalhes dos três pontos de monitoramento de dados meteorológicos no bairro Jardim Camburi. Ponto PT-01 (estação do IEMA), Ponto PT-02, e Ponto PT-03. Fonte: O autor.....	47
Figura 14 - Visão global do campo de vento gerado pelo acoplamento entre escalas para o caso CFD-WRF às 12:00 do dia 03/05/2018. O retângulo vermelho indica a região no domínio onde estão localizados os pontos de monitoramento.	51
Figura 15 – Detalhes do campo vetorial simulado ao redor das estações meteorológicas para o caso CFD-WRF às 12:00 do dia 03/05/2018.....	52
Figura 16 – Detalhes do campo vetorial simulado ao redor das estações meteorológicas para o caso CFD-AERO às 12:00 do dia 03/05/2018.....	52
Figura 17 - Campo de velocidade do vento em um plano vertical passando sobre PT-03 indicado na Figura 6, para a configuração CFD-WRF.....	53
Figura 18 - Campo de velocidade do vento em um plano vertical passando sobre PT-03 indicado na Figura 6, para a configuração CFD-AERO.....	53
Figura 19 – Representação esquemática da localização do plano do plano vertical passando sobre PT-03, empregado para plotar o campo vertical de velocidades nas Figuras 4 e 5.	54
Figura 20 – Detalhes da evolução do campo de vento simulado ao redor das estações meteorológicas para o caso CFD-WRF em intervalos de 12 horas a partir das 16h do dia 03/05/2018. O quadro ao lado indica a direção do vento na estação meteorológica do Aeroporto no mesmo instante de tempo.	56
Figura 21 – Detalhes da evolução do campo de vento simulado ao redor das estações meteorológicas para o caso CFD-AERO em intervalos de 12 horas a partir das 16h do dia 03/05/2018. O quadro ao lado indica a direção do vento na estação meteorológica do Aeroporto no mesmo instante de tempo.	57
Figura 22 – Evolução temporal da diferença entre os valores observados pela estação meteorológica do aeroporto de Vitória (O) e os resultados preditos modelagem de mesoescala	

WRF (S): (a) Diferença entre as direções do vento (°): menor ângulo formado entre os vetores velocidade; (b) Módulo das diferenças entre velocidade do vento (m/s).....	58
Figura 23 - Comparação entre a direção do vento (0° a 360°) observada nos pontos de monitoramento e os resultados preditos CFD-WRF: (a) Ponto PT-01, (b) Ponto PT-02 e (c) Ponto PT-03.....	62
Figura 24 - Comparação entre a velocidade do vento observada nos pontos de monitoramento e os resultados preditos por CFD-WRF: (a) Ponto PT-01, (b) Ponto PT-02 e (c) Ponto PT-03.	63
Figura 25 - Comparação entre a direção (0° a 360°) observada nos pontos de monitoramento e os resultados preditos por CFD-AERO: (a) Ponto PT-01, (b) Ponto PT-02 e (c) Ponto PT-03.	64
Figura 26 - Comparação entre a velocidade do vento observada nos pontos de monitoramento e os resultados preditos por CFD-AERO: (a) Ponto PT-01, (b) Ponto PT-02 e (c) Ponto PT-03.	65
Figura 27 - Métricas estatísticas para a velocidade do vento com dados horários, com cada ponto representado um intervalo de 24 horas. A região delimitada pelo retângulo indica o intervalo de aceitação. (a) e (b) WRF, (c) e (d) CFD-WRF e (e) e (f) CFD-AERO.	68
Figura 28 - Métricas estatísticas para a direção do vento com dados horários, com cada ponto representado um intervalo de 24 horas. A região delimitada pelo retângulo indica o intervalo de aceitação. (a) e (b) WRF, (c) e (d) CFD-WRF e (e) e (f) CFD-AERO.	69
Figura 29 - Gráfico Quantil-Quantil para direção e velocidade do vento observada em campo e simulada por CFD-AERO nos três pontos de monitoramento, com $Z = \phi - \phi\sigma_s$, ($\sigma_s =$ desvio padrão amostral). (a) Direção WRF, (b) Velocidade WRF, (c) Direção CFD-WRF, (d) Velocidade CFD-WRF, (e) Direção CFD-AERO, (f) Velocidade CFD-AERO.....	73
Figura 30 – Posição dos pontos de amostragem para o teste de sensibilidade de malha. Cada ponto indica a localização de uma linha vertical que se estende até o topo do domínio computacional.....	84
Figura 31 – Coparação dos perfis de velocidade vertical ao longo das linhas indicadas na Figura 30 para diferentes tamanhos de malha computacional teste de malhas (a) Linha 1, (b) Linha 2, (c) Linha 3.	84
Figura 32 - Perfis verticais de velocidade na localização das linhas indicadas na Figura 30 para cada configuração de Δt . (a) Linha 1, (b) Linha 2, e (c) Linha 3.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Divisão das escalas espaciais de estudo. (Fonte: LIN <i>et al.</i> , 2014).....	24
Tabela 2 - Rugosidade aerodinâmicas para terreno nos arredores do bairro.....	41
Tabela 3 - Condições de contorno para os limites do domínio CFD de microescala utilizados nos casos simulados.....	46
Tabela 4 - Critérios de aceitação utilizados para avaliação da precisão da modelagem (<i>benchmarks</i>).	66
Tabela 5 - Comparação entre métricas estatística para as modelagens WRF, CFD-WRF e CFD-AERO para direção do vento nos três pontos de monitoramento considerando o período total de medição.....	70
Tabela 6 – Comparação entre métricas estatística para as modelagens WRF, CFD-WRF e CFD-AERO para velocidade do vento nos três pontos de monitoramento considerando o período total de medição.....	71
Tabela 7 - Configurações das malhas 1, 2 e 3 construídas para o teste de independência de malha bem como o tempo requerido para convergência das simulações para cada malha.	84
Tabela 8 – Tempo gasto para finalização de cada teste para os três diferentes tamanhos de intervalo de tempo, bem como o tempo gasto para convergência de cada intervalo de tempo Δt	85

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanas

C_μ, C_1, C_2, C_3	Constantes empíricas do modelo k- ϵ [kg m-3]
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
3D	Tridimensional
d_f	Fator de ajuste
ECT	Energia cinética turbulenta [m ² s ⁻²]
F_U, F_V, F_W e F_Θ	Termos de força do modelo WRF
g	Aceleração da gravidade [m s ⁻²]
Gk	Produção de ECT devido aos gradientes de velocidade média [N m ⁻² s]
k	Energia cinética turbulenta
IEMA	Instituto Estadual do Meio Ambiente
k	Energia cinética turbulenta [m ² s ⁻²]
l	Escala de comprimento característico [m]
LES	Large Eddy Simulation
M_t	Número de <i>Mach</i> turbulento
MVF	Método dos Volumes Finitos
p	Pressão [N m ⁻²]
RANS	Reynolds Averaging Navier-Stokes
Re	Número de Reynolds []
Re _{crit}	Número de Reynolds []
S_{ij}	Tensor taxa de deformação [s ⁻¹]
S_k e S_ϵ	Termos fontes
t	Tempo [s]
\bar{u}	Velocidade média na direção longitudinal [m s ⁻¹]
u^*	Velocidade de fricção [m s ⁻¹]
u_i	Velocidade instantânea na direção <i>i</i> [m s ⁻¹]
u_i'	Flutuação de velocidade instantânea na direção <i>i</i> [m s ⁻¹]
u	Velocidade instantânea na direção <i>i</i> [m s ⁻¹]
UDF	<i>User-Defined Function</i>
v	Velocidade instantânea na direção <i>j</i> [m s ⁻¹]
w	Velocidade instantânea na direção <i>k</i> [m s ⁻¹]
WRF	Weather Research and Forecast

Letras Gregas

$\Delta \bar{W}$	Variação de velocidade [ms ⁻¹]
κ	Constante de Von-Kàrman []
ϵ	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta [m ² s ⁻³]
ω	Taxa de dissipação específica da turbulência [s ⁻¹]
μ	Viscosidade molecular do fluido [m ² s ⁻²]
μ_t	Viscosidade turbulenta [Nsm ⁻²]
μ_{turb}	Viscosidade turbulenta [N s m ⁻²]

ν	Viscosidade cinemática do fluido [m ² s ⁻¹]
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	Números de <i>Prandtl</i> turbulentos
ρ	Massa específica [kg m ⁻³]
τ	Escala Temporal
τ_{ij}	Tensor das tensões de Reynolds [N m ⁻²]
τ_{ij}^{lam}	Tensor das tensões de cisalhamento [N m ⁻²]
τ_{ij}^{turb}	Tensor das tensões de Reynolds [N m ⁻²]
ϕ	Variável genérica []
θ	Ângulo de direção do vento [°]

Subscritos

i,j,k	Índices de direção da notação de Einstein
H	Altura do obstáculo

Sobrescritos

‘	Flutuações turbulentas
—	Valores médios com respeito ao tempo
SIM	Simulado
OBS	Observado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	19
2.1. Morfologia urbana e dinâmica do escoamento	19
2.2. Abordagens mais empregadas.....	21
2.3. Trabalhos Correlatos	25
3. METODOLOGIA	31
3.1. Descrição da área de estudo	31
3.2. Modelagem de Mesoescala - WRF	32
3.3. Modelagem CFD de Microescala	35
3.3.1. Configuração do modelo computacional de microescala	39
3.4. Acoplamento entre mesoescala e microescala	42
3.4.1. Acoplamento WRF-CFD	42
3.4.2. Acoplamento CFD com dados medidos	44
3.4.3. Condições de contorno	45
3.5. Avaliação da precisão dos resultados	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1. Características gerais do campo de ventos obtidos no interior do dossel urbano da região de estudo	50
4.2. Comparações com os dados observados pelas estações no interior do dossel urbano e as simulações CFD-WRF e CFD-AERO	59
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS	74
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
APÊNDICE I – Teste de Sensibilidade de malha.....	83
APÊNDICE II -Teste de sensibilidade do <i>time step</i> e do critério de convergência	85

1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar nas áreas urbanas tem sido uma preocupação crescente, já que nos últimos anos a população urbana vem crescendo em várias regiões do planeta (CARPENTIERI, 2015). A grande urbanização tem inspirado muitos estudos centrados no ambiente urbano. Os estudos relacionados ao fluxo de ar e a dispersão de poluentes têm se tornando mais importantes devido a problemas ambientais cada vez mais sérios (BRITTER; HANNA, 2003), de forma que o aumento das emissões de poluentes, principalmente veiculares e industriais, tem agravado as questões ambientais e de saúde pública.

A qualidade do ar urbano, a qual é tipicamente quantificada por várias concentrações de poluentes principais, apresenta em geral uma variabilidade significativa ao longo de cidade (KWA *et al.*, 2015), motivada principalmente pelas localizações das fontes e pela própria estrutura urbana. Diversos estudos de modelagem apresentam a influência da estrutura das edificações nos padrões de acumulação e dispersão dos poluentes (VARDOULAKIS *et al.*, 2003). A dispersão de poluentes também está fortemente relacionada às características do campo de vento, de modo que a direção e a velocidade do vento são intimamente ligadas a disseminação dos contaminantes emitidos (WANG *et al.*, 2016).

Com o advento de recursos computacionais cada vez mais evoluídos e disponíveis, a abordagem da fluidodinâmica computacional (CFD) tem ganhado cada vez mais espaço como ferramentas de investigação de problemas envolvendo escoamento de fluidos nos mais diversos setores. Em alguns casos, estudos convencionais envolvendo túnel de vento têm sido gradativamente substituídos pela modelagem computacional ou complementados, objetivando a redução significativa dos custos e tempo, além de fornecer soluções práticas para problemas envolvendo qualidade do ar, como nos estudos de Tominaga *et al.*, (2011), Ramponi e Blocken (2012), e Kwak *et al.*, (2015).

Embora muitos estudos utilizando CFD na avaliação de fluxo de ar e dispersão de poluentes em áreas urbanas tenha sido conduzidos e publicados, há poucos trabalhos considerando grandes áreas devido aos requisitos de poder computacional, limitando este tipo de abordagem a estudos de microescala em seções urbanas de pequena extensão (centenas de metros), ruas, e modelos urbanos simplificados (AMORIM *et al.*, 2013). A maioria destes trabalhos, também utilizam a consideração de condições de contorno permanentes na entrada do domínio computacional, como a direção do vento e os perfis de concentração e velocidade (KWA *et al.*, 2015). Uma desvantagem ao assumir perfis permanentes, com velocidades do vento e energia cinética turbulenta constantes, é o fato de que nem sempre são consistentes com dados de campo e medidas em túnel de vento (CHANG *et al.*, 2003). Ademais, variações temporais de velocidade e direção do vento na entrada do domínio

induzem uma maior perturbação no fluxo a jusante, que não poderia ser observada com a consideração de condições de contorno permanentes na entrada (ZHANG *et al.*, 2011).

Por outro lado, estudos envolvendo modelagem de mesoescala são capazes de determinar campos de escoamento em grandes áreas possibilitando a investigação de fatores que afetam a qualidade do ar em um núcleo urbano como um todo (BEEVERS *et al.*, 2012), e são capazes de incluir os efeitos meteorológicos de maior escala e processos como brisas marinhas e terrestres, chuvas, inversões térmicas e outros. Entretanto, os modelos de mesoescala são limitados a uma baixa resolução espacial (da ordem de 1 km), não sendo possível investigar os fenômenos que ocorrem em menores escalas, como por exemplo a escala de rua. O modelo *Weather Research and Forecasting model* (WRF) é um dos modelos meteorológicos de mesoescala mais difundidos atualmente (POWERS *et al.*, 2017), sendo capaz de fornecer dados meteorológicos, como campos de temperatura, campos de velocidade e direção do vento, além de uma série de outras variáveis meteorológicas para áreas que podem chegar a centenas de quilômetros quadrados.

Considerando as características específicas da modelagem de microescala e de mesoescala, alguns estudos têm apresentado metodologias que possibilitam a utilização conjunta das duas abordagens. Neste sentido, o acoplamento entre modelos de microescala e mesoescala tem sido explorado para avaliar os efeitos de condições meteorológicas realistas e campos globais de concentração em fenômenos ligados ao escoamento do ar e poluição em áreas urbanas (BERCHET *et al.*, 2017; KWAK *et al.*, 2015; TEWARI *et al.*, 2010). Neste contexto, dados de variação temporal de velocidade e direção do vento são obtidos por modelagem meteorológica de mesoescala, que consideram escalas espaciais maiores que as comumente avaliadas pelos estudos de microescala. Essas informações provenientes da modelagem de mesoescala são utilizadas como parâmetros de entrada para a modelagem de microescala, possibilitando resultados mais realistas considerando a dinâmica da atmosfera.

O avanço de técnicas de acoplamento e a evolução da capacidade de processamento computacional, tem possibilitado a modelagem do escoamento em um dossel urbano utilizando condições de contorno mais realistas dependentes do tempo, para variáveis meteorológicas como velocidade e direção do vento (KWAK *et al.*, 2015). No entanto, esta abordagem ainda tem sido pouco explorada principalmente devido à grande infraestrutura computacional necessária para avaliação do escoamento de microescala utilizando simulação numérica computacional, assim, a maioria dos trabalhos se limitam a áreas urbanas como modelagem do escoamento em cânion ou alguns blocos urbanos (BERCHET *et al.*, 2017).

Muitos estudos envolvendo escoamento do ar em áreas urbanas reais utilizam como condições de contorno informações provenientes de estações meteorológicas próximas a área de estudo em questão (LIU *et al.* 2017; SAPIAN, 2009). No entanto, em muitos casos estas

informações meteorológicas não são disponíveis ou não são representativas para determinado núcleo urbano que deseja-se estudar. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), administra cerca de 400 estações meteorológicas espalhadas em todo o território nacional, que monitoram informações como precipitação, ventos, umidade relativa do ar e pressão (INMET, 2019). Em um país como Brasil com cerca de 5570 municípios (IBGE 2018), este número de estações é bem pequeno, de forma que muitas cidades não dispõem dessas de medição, ou possuem medições em poucos pontos ao longo da cidade, não sendo capazes de obter valores representativos para toda a área urbana. Esta pouca disponibilidade de dados é uma limitação para estudos de modelagem do campo de vento e dispersão de poluentes dentro de áreas urbanas reais, uma vez que os dados das estações necessários como condições de entrada para a modelagem. Uma alternativa para estudos de qualidade do ar seria a instalação de estações de medição portáteis nos arredores da área urbana a ser investigada, mas essa opção é inviabilizada pelo alto custo destes equipamentos e a infraestrutura necessária para mantê-los.

A modelagem de mesoescala tem mostrando-se como a alternativa mais viável para obtenção de dados meteorológicos, possibilitando a aquisição de dados até mesmo para regiões onde não há nenhum tipo de equipamento de medição. Muitos estudos têm investigado a aplicação de modelos de mesoescala, bem como modificações no sentido de tornar a modelagem mais precisa para diferentes áreas de estudo (AYLAS et al., 2017; MEDINA, 2017; TAJ, 2018). Sendo assim, torna-se evidente e promissora a utilização de dados de mesoescala acoplados à modelagem CFD de microescala para estudos do escoamento de ar em núcleos urbanos reais. Essa técnica torna possível o estudo mais realista de diferentes áreas urbanas mesmo sem a disponibilidade de dados provenientes de estações meteorológicas.

Neste contexto, este trabalho objetiva avaliar a capacidade de predição do escoamento atmosférico no interior do dossel urbano, a partir do acoplamento entre modelagem WRF de mesoescala e modelagem de microescala baseada na técnica da fluidodinâmica computacional (CFD). Uma metodologia de acoplamento entre o modelo meteorológico de mesoescala WRF e modelagem CFD é usada para o estudo do escoamento de ar em uma área urbana com dimensões reais de um bairro típico de uma região metropolitana. Além do uso de dados do WRF, também avalia-se o uso de dados provenientes de uma estação meteorológica localizada no entorno da área de estudo. Com o objetivo de avaliar a precisão dos resultados obtidos pelas diferentes abordagens empregadas, uma campanha de medição em campo com estações meteorológicas portáteis é realizada dentro da área urbana de estudo para levantamento de dados.

Para alcançar o objetivo geral descrito, são determinados os objetivos específicos da seguinte forma:

- Implementar o acoplamento entre a modelagem atmosférica de mesoescala WRF e a modelagem CFD de microescala.
- Conduzir uma campanha de medição de dados de velocidade e direção do vento dentro da área urbana em estudo.
- Avaliar os resultados obtidos com o acoplamento WRF-CFD e resultados de CFD utilizando condições de contorno baseados em dados de *in-situ* de estação meteorológica local (CPTEC-Aeroporto de Vitória).

A descrição do campo de vento considerando características mais realistas poderá eventualmente ser usada para estudos envolvendo modelagem CFD da qualidade do ar e análise da dispersão de poluentes emitidos por fontes dentro e fora do dossel urbano. A metodologia de acoplamento possibilita uma melhor predição dos campos de vento e seus efeitos na dinâmica do campo de concentração em estudos de qualidade do ar dentro de áreas urbanas reais.

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos. Após o material introdutório do Capítulo 1, o Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura referente a aplicação de modelagem matemática a a pesquisa de escoamento de ar urbano e qualidade do ar bem como o uso de acoplamento de modelos e diferentes escalas espaciais e temporais. Subsequentemente, o Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada neste trabalho. No Capítulo 4 são mostrados e discutidos os resultados da modelagem e resultados de medições em campo que são confrontados a fim de avaliar a precisão dos resultados do modelo. Finalmente o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas a partir da análise dos resultados além de recomendações para trabalhos futuros envolvendo a metodologia utilizada. Após a lista de referências bibliográficas utilizadas, dois apêndices apresentam o teste de sensibilidade da malha computacional e teste de sensibilidade do *time-step* utilizada nas simulações.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A poluição do ar em ambientes urbanos se configura como um problema ambiental quando é associada aos danos causados a saúde pública (RAMPONI *et al.*, 2015). A exposição a poluentes atmosféricos (gases e materiais particulados) em núcleos urbanos está associada com as taxas de mortalidade por doenças respiratórias e câncer causados por estes materiais (BEELEN *et al.*, 2014). Dados da Organização Mundial de Saúde (WHO) indicam que em 2018 cerca de 4,2 milhões de pessoas morreram por doenças relacionadas à poluição do ar (WHO, 2018). Diante deste cenário com grande número de pessoas vivendo em cidades, é crucial a investigação de fenômenos ligados à dinâmica do escoamento do vento em meio urbano, bem como seu efeito na dispersão de contaminantes nocivos à saúde pública.

Dentro do ambiente urbano, o escoamento do ar é fundamental para a dispersão de poluentes emitidos por fontes internas e externas ao núcleo urbano (SALIM *et al.*, 2011; ZAKI *et al.*, 2011). O fluxo de vento é fortemente influenciado por fatores como a morfologia urbana e pelas condições meteorológicas. Sendo assim, estes fatores podem contribuir para uma pobre dispersão dos poluentes, principalmente em cidades com alta densidade de edificações, o que configura maior complexidade para o escoamento do ar (VARDOULAKIS *et al.*, 2003). Para uma modelagem representativa do escoamento do ar e dispersão de poluentes em áreas urbanas reais, é fundamental uma profunda compreensão dos mecanismos e parâmetros que influenciam estes fenômenos (COCEAL *et al.*, 2014).

Muitos estudos têm se dedicado ao escoamento de ar em meio urbano, abordando principalmente seu efeito na dispersão de poluentes e na qualidade do ar (ANTONIOU *et al.*, 2017; BRITTER *et al.*, 2003; SALIM *et al.*, 2011). Trabalhos com os de Eliasson *et al.*, (2006), Kwa *et al.*, (2014) e Lin *et al.*, 2014, investigam o escoamento de ar em meio urbano, bem como seu efeito na dispersão. O fluxo de ar contribui para o transporte e diluição dos contaminantes, afetando positivamente na qualidade do ar em meio urbano (AHMAD *et al.*, 2005; BLOCKEN *et al.*, 2013). Neste sentido, é evidente a importância do fator escoamento na dispersão de contaminantes e na qualidade do ar em meio urbano.

2.1. Morfologia urbana e dinâmica do escoamento

A topologia urbana influencia nas características do escoamento e na dispersão de poluentes. Devido à complexidade da morfologia urbana real, muitos estudos abordam o efeito das edificações como obstáculos ao escoamento do vento (LIN *et al.*, 2014; SATO *et al.*, 2017; TOMINAGA *et al.*, 2015).

Vários estudos de modelagem computacional e túnel de vento utilizam obstáculos isolados, arranjos de prédios alinhados e alternados para avaliar a escoamento do ar em áreas urbanas genéricas idealizadas (CASTRO *et al.*, 2017; COCEAL *et al.*, 2006; MAVROIDIS 1999). Por exemplo, Ramponi *et al.*, (2015) realizaram um estudo numérico para avaliar a performance do escoamento do ar em uma configuração urbana genérica, onde as edificações são representadas por paralelepípedos retangulares de tamanho uniforme, como ilustrados em vista superior na Figura 1a.

Alguns trabalhos investigam o efeito de configurações urbanas reais no comportamento do escoamento (ANTONIOU *et al.*, 2017; TOPARLAR *et al.*, 2015). Por exemplo, Toparlar *et al.*, (2015) utilizam modelagem computacional para avaliar o campo de vento e temperatura em uma configuração urbana real, área urbana de Bergpolder, um bairro de Rotterdã nos Países Baixos. A Figura 1b, ilustra o contorno de velocidade do vento para esta área urbana. Fica evidente a maior complexidade do campo de vento resultante do efeito de obstáculos (edificações) com diferentes formatos, alturas e variados espaçamentos.

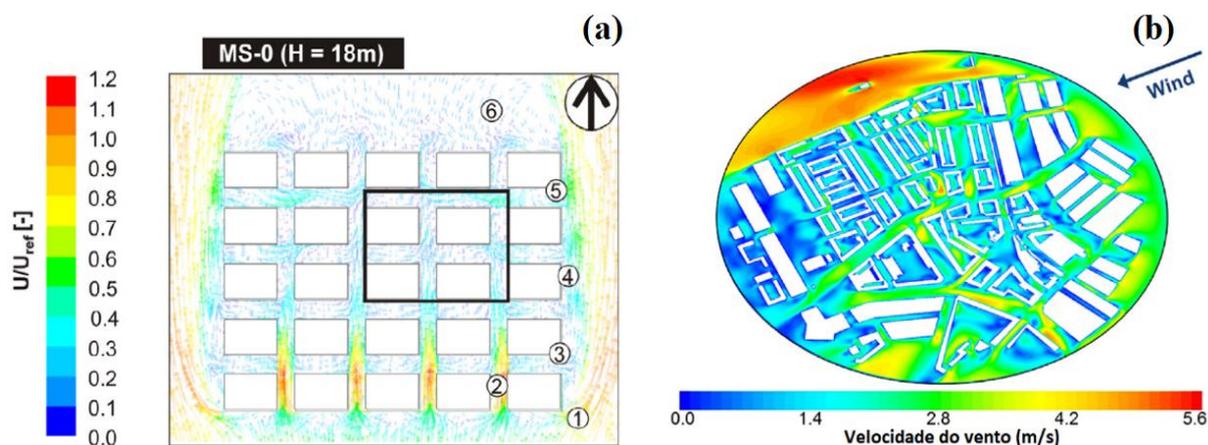


Figura 1 – Exemplos de diferentes tipos de estratégia de representação do meio urbano para estudos de escoamento do ar e dispersão de poluentes. (a) Arranjo urbano genérico. Fonte: Ramponi *et al.*, (2015); e (b) Arranjo urbano real da área urbana de Bergpolder Zuid, Rotterdam. Fonte: Toparlar *et al.*, (2015)

Neste contexto, fica clara a importância dos estudos do escoamento do ar dentro de áreas urbanas reais, considerando a influência da complexidade da morfologia urbana no escoamento do vento. Tanto nos arranjos de prédios genéricos quanto nos modelos de áreas urbanas reais, os obstáculos produzem zonas com maior velocidade do vento como também zonas de estagnação, podendo influenciar para o aumento da concentração de poluentes do ar nestas áreas. Enquanto estudos em geometrias idealizadas permitem o entendimento dos padrões de escoamento e dispersão de poluentes no interior do dossel urbano, a reprodução precisa das características geométricas do arranjo urbano permite a captura das características específicas do escoamento do ar

em um determinado centro urbano considerando diferentes alturas, configurações de prédios e formato de intercessões entre vias.

2.2. Abordagens mais empregadas

Os estudos do escoamento urbano, bem como os efeitos na dispersão de poluentes, podem ser realizados por metodologias que utilizam medição direta no local (KUMAR *et al.*, 2015; VAN HOOFF e BLOCKEN, 2012), experimentos em túnel de vento com modelos reduzidos (CARPENTIERI *et al.*, 2012; CUI *et al.*, 2016), ou simulação numérica computacional CFD (KWA *et al.*, 2014; KWAK *et al.*, 2015; RAMPONI *et al.*, 2015; SANCHEZ *et al.*, 2017). São comuns trabalhos que utilizam estas técnicas combinadas objetivando maior precisão do estudo e validação da metodologia (ANTONIOU *et al.*, 2017).

As medições *in situ*, apesar de tradicionais neste tipo de estudo apresentam algumas limitações, principalmente devido a característica pontual da medição, não fornecendo uma estimativa global da área de estudo. Por outro lado, com o avanço da tecnologia de aquisição de dados, é possível obter informações precisas de diversos parâmetros como velocidade e direção do vento, humidade, perfil vertical de temperatura e velocidade do vento, concentrações de espécies químicas e particulados, etc. (ALLWINE *et al.*, 2002). Estes dados comumente são usados tanto para fins de monitoramento por agências ambientais, como para estudos de qualidade do ar e validação de modelagem computacional (ALLWINE *et al.*, 2007).

Estudos em túnel de vento com modelos urbanos reduzidos permitem a investigação do fluxo de ar global, características da turbulência, e dispersão de contaminantes que são geralmente representados por gases traçadores (AHMAD *et al.*, 2005; CARPENTIERI *et al.*, 2012; RICCI *et al.*, 2017). Nesta abordagem, são usados sensores capazes de medir com precisão dados de velocidade do vento, concentração, entre outros. No túnel de vento, os sensores também fornecem medidas pontuais, de acordo com o posicionamento do aparato de medição. Como limitações desta abordagem, pode-se destacar a dificuldade para obter em modelos em escala reduzida a representação correta dos fenômenos atmosféricos, a própria disponibilidade do túnel de vento e o custo dos experimentos.

Carpentieri et al. (2012) conduz uma análise numérica (CFD) e de túnel de vento para avaliar o impacto de diferentes parâmetros morfológicos urbanos no escoamento dentro e acima do dossel urbano. Para tanto, são usados modelos mais realísticos ao invés de utilizar apenas modelos idealizados com os cuboides. Três diferentes direções do vento são testadas sobre os domínios apresentados na Figura 2 abaixo. Tanto o experimento em túnel de vento quanto as simulações avaliaram o efeito dos parâmetros urbanos no perfil de velocidade vertical gerado pelos

escoamentos. Os resultados indicaram que as médias espaciais dos perfis de velocidade apresentam diferenças significativas para os casos testados como pode ser observado nos perfis de velocidade da Figura 3. Prédios com variações de altura e outras características morfológicas como razão de aspecto e ângulos entre os cânions, provaram ser de significativa importância para o comportamento do perfil de velocidade médio. Essas variações dos perfis de velocidade afetam a dispersão de poluentes na área urbana. Isso evidencia a importância de estudos que tratam de morfologias urbanas reais e seus efeitos no escoamento do ar e dispersão de poluentes.

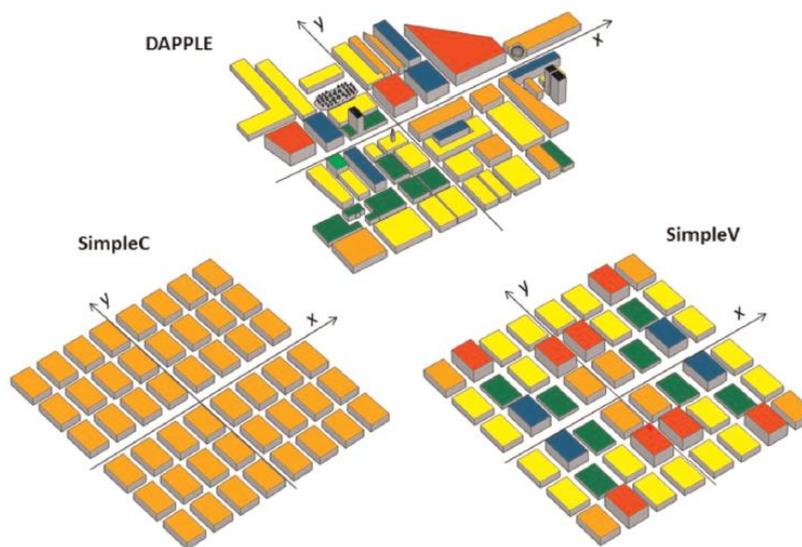


Figura 2 – Representação tridimensional dos modelos utilizados tanto para a modelagem computacional quanto para o estudo em túnel de vento considerando arranjos de blocos regulares (SimpleC), arranjo regular com diferentes alturas (SimpleV) e arranjo realista com diferentes formatos de alturas (DAPPLE). Fonte: Carpentieri et al. (2012)

A modelagem matemática computacional tem se destacado nos últimos anos como alternativa aos estudos experimentais, possibilitando a predição do escoamento e dispersão, utilizando como base as equações de transporte de massa, momentum, energia e espécie química (BALOGH *et al.*, 2015). Os avanços da tecnologia computacional têm permitido a propagação desta técnica, possibilitando a investigação de fenômenos cada vez mais complexos e com maior detalhe. A fluidodinâmica computacional CFD, é capaz de fornecer um panorama global do escoamento no domínio, disponibilizando resultados como campos de vento e de concentração, que são de inviável obtenção em estudos experimentais (BLOCKEN, 2013). Por outro lado, por se tratar de modelagem e utilizar diversas considerações simplificadoras, os estudos envolvendo CFD e outros tipos de modelagem computacional, necessitam de validação que comumente é feita em conjunto com estudos de monitoramento e de túnel de vento (RAMPONI *et al.*, 2015).

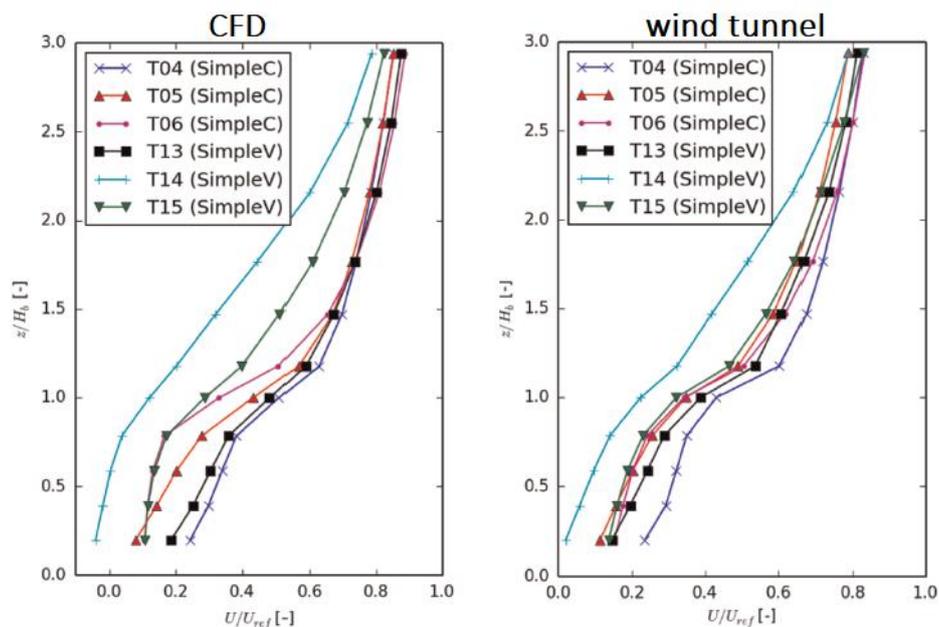


Figura 3 – Média espacial dos perfis de velocidade vertical comparando diferentes configurações do arranjo urbano (SimpleC e SimpleV). Resultados da modelagem CFD à esquerda e resultados experimentais de túnel de vento a direita. Fonte: Carpentieri et al. (2012)

O escoamento atmosférico de ar incidente sobre as edificações é tipicamente turbulento e os modelos que descrevem a turbulência variam conforme as hipóteses simplificadoras e a acurácia do resultado para representação mais adequada do fenômeno (COSTA, 2016). Três diferentes classes de modelagem podem ser usadas para representar a turbulência: simulação numérica direta (DNS), simulação de grandes escalas (LES), e decomposição das médias de Reynolds (RANS). A abordagem DNS resolve diretamente, utilizando as equações governantes, todas as escalas de turbulência do espectro de energia e a LES resolve apenas as maiores escalas e utiliza modelagem para menores escalas. Essas duas técnicas apesar de fornecerem grande acurácia dos resultados e muitos detalhes do escoamento, requerem uma grande discretização espacial e temporal e geralmente são custosas computacionalmente, chegando a inviabilizar a aplicabilidade em muitos estudos. Já a estratégia de resolução RANS modela todas as escalas de turbulência baseando-se nas equações médias de Reynolds. Esta abordagem apresenta diversos modelos com diferentes complexidades para a representação da turbulência, e fornece bons resultados de fluxo médio e propriedades espaciais (YOSHIE *et al.*, 2007).

De fato, o uso de DNS para escoamentos urbanos com geometrias reais ainda não é viável, por outro lado, estudos baseados em LES para geometrias urbanas começam a ser utilizados em geometrias reais (GOUSSEAU et al; 2011), porém com significativas restrições quanto ao esforço computacional exigido. Desta forma, apesar do potencial para gerar melhores resultados associados às simulações LES, simulações numéricas baseadas em RANS são muito mais numerosas no estudo do escoamento e dispersão de poluentes em regiões urbanas reais.

A maior parte dos trabalhos de modelagem envolvendo escoamento em área urbana são focados em escalas espaciais de estudo na ordem de 1 km, ou escala de bairro, isso devido ao grande esforço computacional requerido para o tratamento de escalas com maior resolução espacial (LIN *et al.*, 2014). A Tabela 1 mostra a divisão de escalas, que tratam do comprimento horizontal do espaço, usadas em estudos. A avaliação do escoamento em escala de cidade ainda tem sido pouco explorada devido à grande complexidade dos fenômenos e o tamanho das escalas espaciais e temporais envolvidas (BERCHET *et al.*, 2017). Estudos de modelagem computacional do escoamento e dispersão de poluentes em escala real se limitam a capacidade computacional disponível, uma vez que este tipo de modelagem requer grande esforço computacional.

Tabela 1- Divisão das escalas espaciais de estudo. (Fonte: LIN *et al.*, 2014)

Escala de rua	~ 0,1 km
Escala de Bairro	~ 1 km
Escala de Cidade	~ 5 - 20 km
Escala Regional	~ 100 - 1000 km

Condições meteorológicas, como mudanças de velocidade e direção do vento são fatores importantes e influenciadores do escoamento do ar dentro do dossel urbano. Variações na intensidade e direção do vento, podem gerar maior turbulência no escoamento a jusante (ZHANG *et al.*, 2011) interferindo nos padrões de fluxo e na dispersão de poluentes. Contudo, muitos estudos, tanto de modelagem como experimentos em túnel de vento, consideram a intensidade e direção do vento constantes na entrada do domínio estudado (COCEAL *et al.*, 2006; SALIM, 2011; TSANG *et al.*, 2012). Alguns trabalhos avaliam casos isolados testando diferentes velocidades do vento e diferentes direções em regime permanentes, e seus efeitos no escoamento principal ao redor dos prédios (HAGISHIMA *et al.*, 2009; LIN *et al.*, 2014).

Avaliando direções do vento de $\theta = 0^\circ$, 15° , 30° e 45° , Lin *et al.*, (2014) verificaram o efeito na dispersão considerando diferentes configurações urbanas idealizadas e com mesma densidade. Foi observado que o escoamento do ar é facilitado para direção $\theta = 0^\circ$, paralelo a avenidas principais com arranjos de prédios cúbicos, o que promoveria melhores condições de ventilação e dispersão de contaminantes.

Considerando áreas urbanas reais, Shen *et al.*, (2017) e avaliaram o efeito da topologia das vias de tráfego na ventilação e qualidade do ar nas cidades de Manhattan, Paris, Barcelona, Berlim, Londres e Nanjing. Foi observado que características morfológicas como largura e interseções são fatores influenciadores nos fluxos de ar dentro dos cânions urbanos. Os resultados do estudo mostraram que ruas mais espaçadas facilitam o escoamento do vento, melhorando a capacidade de transporte de contaminantes e dispersão.

Estudos recentes de modelagem computacional têm aplicado metodologias que incluem o efeito de variáveis meteorológicas considerando flutuações temporais de direção e velocidade do vento, em configurações urbanas reais (LIU *et al.*, 2012; SANCHEZ *et al.*, 2017; SANTIAGO *et al.*, 2017; SOULHAC *et al.*, 2012). Os dados meteorológicos usados são obtidos principalmente de medições de campo, e modelagem de mesoescala, utilizando softwares de previsão meteorológica como o WRF e GRAMM (BERCHET *et al.*, 2017; GROSZ *et al.*, 2015; POUR *et al.*, 2017). Sendo assim, metodologia CFD se apresenta como uma ferramenta importante e promissora para aplicação em estudos de qualidade do ar, fornecendo resultados práticos cada vez mais confiáveis e de viável obtenção.

2.3. Trabalhos Correlatos

Um dos primeiros trabalhos relacionados ao uso de acoplamento de modelagem de mesoescala e microescala para determinação do campo de vento foi apresentado por Kunz *et al.* (2000). Foram avaliados o campo de vento em escala local de uma área industrial na Alemanha por meio do acoplamento entre os modelos MEMO (mesoescala) e MIMO (microescala). Os resultados das simulações de mesoescala são usados para gerar o estado inicial e as condições de contorno para simulações em microescala. O método usado emprega um esquema 3D de interpolação e um ajuste vertical das quantidades interpoladas na camada superficial com base na teoria da similaridade. Dados de medição de campo foram utilizadas para avaliar a precisão da modelagem em um período de 24h e os resultados mostraram boa concordância entre dados medidos e simulados. Os autores concluem que o método é adequado para gerar valores iniciais e condições de contorno realistas para simulações em microescala.

Ehrhard *et al.* (2000), usando o mesmo cenário de acoplamento, avaliam o desempenho do modelo MIMO em microescala que resolve as equações de conservação médias de Reynolds para massa, momento e energia para determinar o campo de fluxo para uma área específica. Comparando os dados medidos com simulados, foi observado que a modelagem prediz valores maiores que os valores medidos. No entanto, foi considerado que a modelagem é capaz de prever com precisão aceitável os valores referentes ao campo de vento e que a metodologia de acoplamento é capaz de retornar valores de velocidade e direção do vento mesmo sem a disponibilidade de dados de estação meteorológica.

Liu et al (2017) em um estudo de modelagem CFD, explorou o uso de informações sobre o vento de uma estação meteorológica para simular a distribuição do vento em uma comunidade urbana, onde a estação localiza-se longe da comunidade. O estudo construiu um modelo urbano em grande escala com detalhes de construção da área, desde a estação meteorológica até a comunidade. O modelo em escala real era tipicamente de 2 a 20 km de comprimento, entre a microescala e o modelo em mesoescala. As equações tridimensionais constantes de Navier-Stokes (RANS), com média de Reynolds, foram resolvidas para simular os fluxos de vento urbanos. A investigação utilizou dois métodos diferentes de definição da rugosidade da superfície do solo para aproximar as estruturas do edifício. Os dois métodos produziram resultados semelhantes, mas apenas um deles foi capaz de fornecer informações sobre o vento próximo ao solo. A distribuição do vento calculada pelo modelo em escala real foi comparada com a calculada pelo modelo microescala local, onde o domínio computacional incluía apenas estruturas de construção na comunidade e espaços limitados nas proximidades da comunidade. A velocidade do vento calculada pelo modelo em escala real foi 20% maior que os dados experimentais obtidos pelas estações meteorológicas locais no teto de um edifício na comunidade, e a velocidade calculada pelo modelo de microescala foi quase o dobro. O autor recomenda modelo em escala real é recomendado para prever a distribuição do vento em uma comunidade urbana, embora seja necessário mais tempo para a construção do modelo geométrico

Coirier et al 2007 avaliam o acoplamento unidirecional, em que um dos modelos é utilizado para fornecer condições de entrada para o outro. Neste caso, o modelo numérico de mesoescala WRF foi utilizado para a fornecer dados meteorológicos para o de microescala baseado em Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD). Para o acoplamento em um modelo de microescala, CFD-URBAN, foram utilizadas tanto a abordagem transiente e a quase-permanente, ou seja, com um intervalo de tempo, Δt , suficientemente grande de forma que a simulação é considerada permanente dentro de cada intervalo de tempo. A primeira abordagem opera o solver CFD de maneira instável e interpola linearmente os dados do WRF em intervalos de 15 minutos. Por outro lado, o modo quase-estável calcula o campo de vento em regime permanente em intervalos 15 minutos, usando os dados WRF como condições limite. A malha computacional de microescala cobre um domínio de 8,4 km x 7,4 km x 1 km, com elementos mais refinados na região da área urbana. As duas formas de acoplamento testadas são comparadas com dados provenientes de estações meteorológicas e de qualidade do ar espalhadas dentro do domínio e apresentam resultados aceitáveis. No entanto, os autores recomendam o uso do modo de operação quase-permanente. As medidas estatísticas da precisão da modelagem de transporte e dispersão mostraram que esse modo pode produzir resultados tão bons quanto ou melhores do que os resultados com uma estação isolada ou que o modo transiente.

Li *et al.*, (2007) também aplicaram a metodologia de acoplamento unidirecional para dados provenientes do modelo de mesoescala *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS) em um modelo de microescala baseado em CFD para uma área urbana real de Haidian, China. Os dados provenientes do RAMS são introduzidos como condição de contorno para o modelo de microescala. São testados o acoplamento entre ANSYS FLUENT e RAMS dados com resolução de 1 km e com resolução de 0,2 km. Os resultados das duas abordagens são comparados com medições de uma estação meteorológica localizada a 10 m do solo. Os autores concluem que o acoplamento RAMS/FLUENT é capaz de prever com margem de erro aceitável os valores medidos pela estação meteorológica. Além disso, o modelo CFD de microescala foi capaz de fornecer detalhes do fluxo turbulento dentro da camada limite urbana, que é influenciada pelos prédios mais elevados. Este tipo de análise fica não é possível para o modelo de mesoescala devido a considerável menor resolução do grid.

Tewari *et al.*, (2010) realizaram um estudo para avaliar o impacto na precisão da modelagem de transporte e dispersão poluentes em áreas urbanas, acoplando um modelo de dinâmica de fluidos computacional em microescala ao modelo de mesoescala. O modelo CFD usado foi o CFD-URBAN, e o de previsão meteorológica foi o modelo WRF. Duas diferentes abordagens fornecem condições iniciais e de contorno para conduzir o estudo: (i) usando observação obtida de um único local de medição durante o experimento de campo URBAN 2000 e (ii) usando a saída WRF no modo quase-permanente. Os resultados do modelo WRF e CFD-URBAN foram avaliados em relação aos dados obtidos no período de observação intensiva durante o experimento de campo URBAN 2000. Verificou-se que a previsão de CFD-URBAN melhorou significativamente quando usando campos de vento produzidos pela redução da escala da saída WRF como condições iniciais e de contorno.

Liu *et al.*, (2012) investiga a dispersão de poluentes e campos de vento no nível da rua em uma área urbana real. Um método de acoplamento é empregado e os valores de velocidade e temperatura na área urbana são fornecidos pelo modelo de mesoescala *Weather Research and Forecasting* (WRF) que calcula o fluxo atmosférico em toda a cidade. Os fluxos locais são calculados por um código LES (*Large Eddy Simulation*) desenvolvido pelos autores. A fim de reduzir os custos computacional requerido pelas simulações a malha foi refinada em regiões mais críticas para o estudo onde a escoamento e dispersão são de maior importância. Nas regiões de menor interesse os elementos da malha são mantidos mais grosseiros. A possibilidade de considerar o efeito transiente do escoamento atmosférico na estrutura do escoamento do ar no meio urbano se configura com uma vantagem da abordagem proposta. Os resultados da modelagem foram considerados satisfatórios comparados com observações de campo. Tanto pela análise estatística

por meio de métricas específicas para as variáveis avaliadas como por avaliação das séries temporais dos dados indicaram um bom nível de acerto da modelagem.

Kwak et al. (2015) utilizam uma metodologia de acoplamento para modelagem da qualidade do ar em áreas urbanas reais. São acoplando modelos de mesoescala tanto meteorológicos e de transporte de espécies químicas como um modelo de microescala (CFD) da região urbana. Os modelos de mesoescala utilizados são o WRF e o modelo de qualidade do ar é o *Community Multi-scale Air Quality Model* (CMAQ), que fornece as condições de contorno iniciais e dependentes do tempo para o modelo CFD. As simulações de qualidade do ar urbano são realizadas de 09:00 a 18:00, em 3 de junho de 2010, em uma área de arranha-céus de Seul, República da Coreia, onde estão concentradas fontes de emissão móveis. Os dados de concentrações de NO₂ e O₃ na simulação de CFD são comparados com dados medidos em uma estação de monitoramento de qualidade do ar próximo a uma via de tráfego, mostrando melhor concordância que aqueles obtidos nas simulação CMAQ de mesoescala. O acoplamento de escalas permite a inclusão de efeitos transientes da atmosfera bem como o transporte de poluentes em grandes escalas. Os autores acrescentam que essa é uma abordagem de modelagem promissora, responsável por influências em várias escalas na qualidade do ar urbano.

Luo et al (2016) avalia o fluxo de ar e o transporte de poeira em uma comunidade residencial sob condições climáticas de tempestade de poeira usando CFD. O transporte de poeira e a distribuição da concentração são obtidos através do modelo de partículas discretas formuladas por Lagrange, integrando a velocidade das partículas entre determinados intervalos de tempo. Para o tratamento do fluxo turbulento, os autores empregam uma abordagem RANS com o modelo k-ε realizável. Para a velocidade e direção do vento na entrada do domínio são usadas informações meteorológicas típicas da região provenientes de estações de monitoramento. Um perfil vertical logarítmicos baseados nos valores medidos é usado para representação da velocidade do vento. Verifica-se que o transporte e a distribuição de poeira estão intimamente relacionados ao campo de vento gerado. Locais com baixa velocidade do vento e zonas de recirculação geralmente apresentam alta concentração de poeira. À medida que a direção do vento muda, o escoamento e a distribuição de poeira diferem de caso para caso, mas as características gerais são mantidas. Além disso, a forma dos edifícios e as condições de interação entre paredes e partículas têm efeitos adicionais na distribuição de poeira. A malha computacional da área urbana bem como as distribuições de velocidade do vento e concentração de poeira a 1,6 m do solo sob vento norte são mostradas na Figura 4.

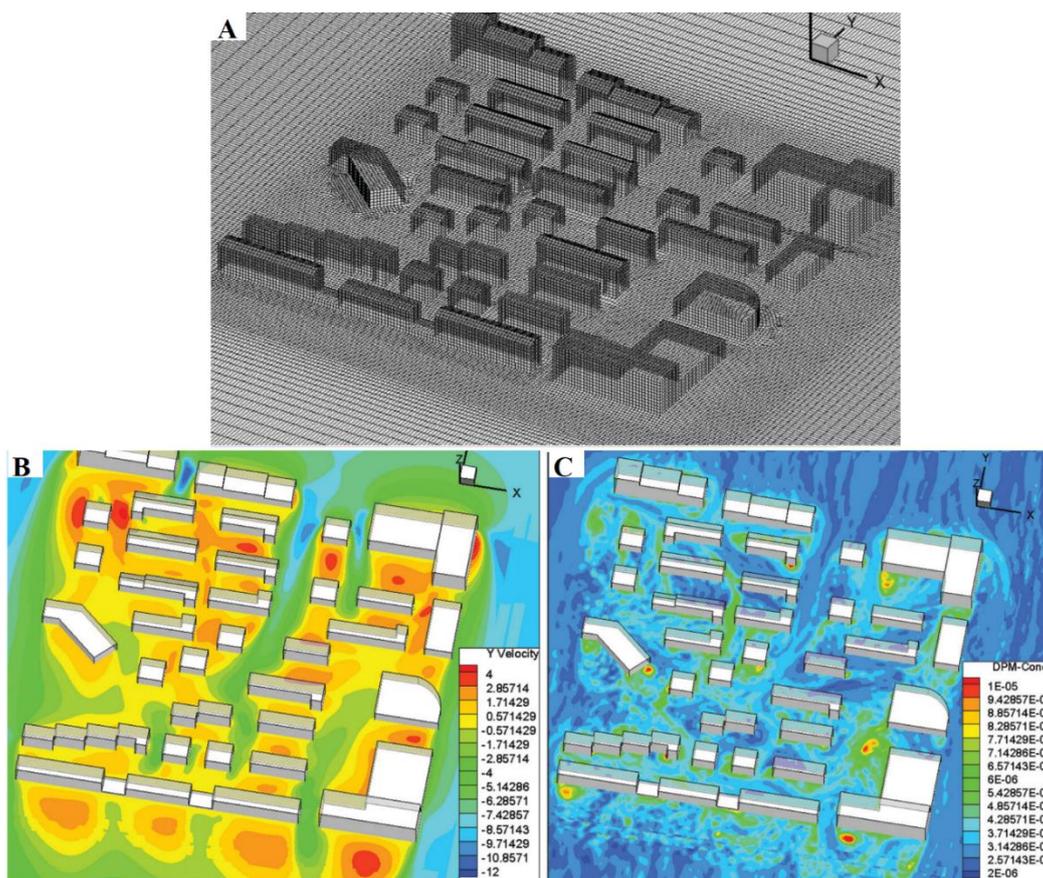


Figura 4 – A) Domínio computacional e malha criada para a área urbana; B) Distribuição da velocidade do vento na faixa de 1,6 m na horizontal causada por vento norte para velocidade de referência de 10 m/s; C) Distribuição da concentração de poeira sobre vento norte em um plano a 1,6 m do solo. Fonte: Luo et al (2016).

Berchet et al., (2017) apresentam um método de acoplamento entre os modelos GRAMM de mesoescala e GRAL de microescala para estudar o escoamento de ar e dispersão de poluentes em ambiente urbano real. A metodologia possibilita avaliar o escoamento de ar e dispersão de poluentes no interior de uma cidade em longos períodos. A combinação de alta resolução espacial e longos períodos de simulação é importante para estudos de controle da poluição do ar, mas ainda apresenta um grande desafio para as técnicas atuais de modelagem. O modelo meteorológico de mesoescala considera os efeitos da topografia da região no campo de vento, que por sua vez é utilizado como condições de contorno para a modelagem de microescala. O método é demonstrado com o sistema de modelagem GRAMM (mesoescala) / GRAL (microescala) para duas cidades suíças em terrenos complexos, Zurique e Lausanne. Os autores concluíram que a metodologia permite reproduzir com precisão a variabilidade de concentração mesmo em regiões mais distantes das fontes de emissão, possibilitando cobrir grande parte da cidade.

Wang et al (2018) utiliza uma estratégia semelhante à usada por Luo et al (2016) para representar as condições de entrada de velocidade e direção do vento para o estudo de modelagem dispersão de partículas derivadas das atividades de construção em um cânions urbano real. Usando um modelo CFD tridimensional, o estudo examina o efeito das emissões de PM10 derivadas da construção de um sistema de trânsito ferroviário em um desfiladeiro urbano em Wuhan, China. A lei de potência foi adotada para tratar do valor da velocidade do vento. Com base em campanhas de medição locais, assumiu-se uma velocidade de referência de 2,8 m/s a 10 m de altura. O perfil do vento foi introduzido através de um código desenvolvido pelos autores. Este estudo formula o impacto da razão de altura e das direções do vento na dispersão e concentração de PM10. Os resultados indicam que o fluxo paralelo causa o acúmulo da concentração de PM10 no final dos cânions enquanto que as condições de fluxo perpendicular, vórtices duplos levam à concentração de PM10 para a parte central do cânion da rua e sota-vento de edifícios em todas as proporções de altura.

Apesar da importância do uso de dados meteorológicos provenientes de estações de medição nos arredores de áreas urbanas para modelagem do escoamento do ar e dispersão de poluentes, fica evidente que em muitos casos esses dados são simplesmente indisponíveis pela falta desses equipamentos. Como mostrado, pesquisadores em posse de dados de estações meteorológicas tem utilizado aproximações e modelos empíricos para representar o perfil de velocidade vertical para a região de estudo específica. No entanto, o uso de metodologias de acoplamento bem como os constantes avanços em tecnologias de modelagem tem permitido a representação cada vez mais realista das condições atmosféricas da região. O acoplamento entre modelos de previsão atmosférica praticamente elimina a necessidade de estações meteorológicas pontuais para obtenção de condições de contorno para modelos de microescala, uma vez que modelos como o WRF podem fornecer informações de velocidade, direção do vento e outras variáveis atmosféricas para diferentes níveis de altura e resolução espacial de cerca de 1 km. Essa característica do acoplamento entre modelos de mesoescala e microescala facilita a aplicação de técnicas de modelagem mesmo em localidades urbanas onde não há estações de monitoramento atmosférico.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia adotada na pesquisa para alcançar os objetivos propostos. Por meio do acoplamento da modelagem computacional de mesoescala e microescala do escoamento do ar, busca-se uma estratégia para determinar o campo de vento considerando o efeito das variações temporais de velocidade e direção decorrentes da dinâmica atmosférica e das características geométricas do arranjo urbano. O campo de vento mais realista poderá ser usado para estudos posteriores envolvendo modelagem CFD da qualidade do ar e análise da dispersão de poluentes emitidos por fontes dentro e fora do dossel urbano e de outras áreas de estudo.

O material apresentado neste capítulo está dividido em 5 partes principais. Primeiramente, a Seção 3.1 descreve a região de estudo. A Seção 3.2 descreve as simulações de mesoescala empregadas neste trabalho. A Seção 3.3 apresenta a modelagem matemática e métodos numérico empregados nas simulações de microescala do presente estudo. A Seção 3.4 descreve a forma de acoplamento entre as simulações de mesoescala e microescala. Finalmente, a Seção 3.5 apresenta os procedimentos e indicadores para a avaliação de precisão da abordagem utilizada.

3.1. Descrição da área de estudo

A área urbana definida para este estudo corresponde ao bairro Jardim Camburi no município de Vitória-ES. O bairro é integrado à Região Metropolitana da Grande Vitória, caracterizada por uma área de grande urbanização cercada por intensa atividade industrial, turismo, comércio, além de portos e o aeroporto da cidade.

O bairro Jardim Camburi possui área de 2,61 km² e vem passando por um processo de verticalização e adensamento populacional. O bairro fica afastado da parte central da cidade, fazendo fronteira a leste, com o Parque Industrial da Ponta de Tubarão com as instalações industriais da mineradora Vale e siderúrgica Arcelor Mittal Tubarão, e a oeste, o aeroporto de Vitória, ainda sendo divisa com o município da Serra e o Oceano Atlântico. A localização espacial e os limites do bairro são apresentados na Figura 5.

O Instituto Estadual do Meio Ambiente (IEMA) opera uma estação de monitoramento da qualidade do ar instalada dentro do bairro. A unidade integra a Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar (RAMQar) da Região Metropolitana da Grande Vitória, dedicada ao acompanhamento de níveis de poluentes do ar no bairro, mas nesta estação não há equipamentos para medição dos dados meteorológicos.

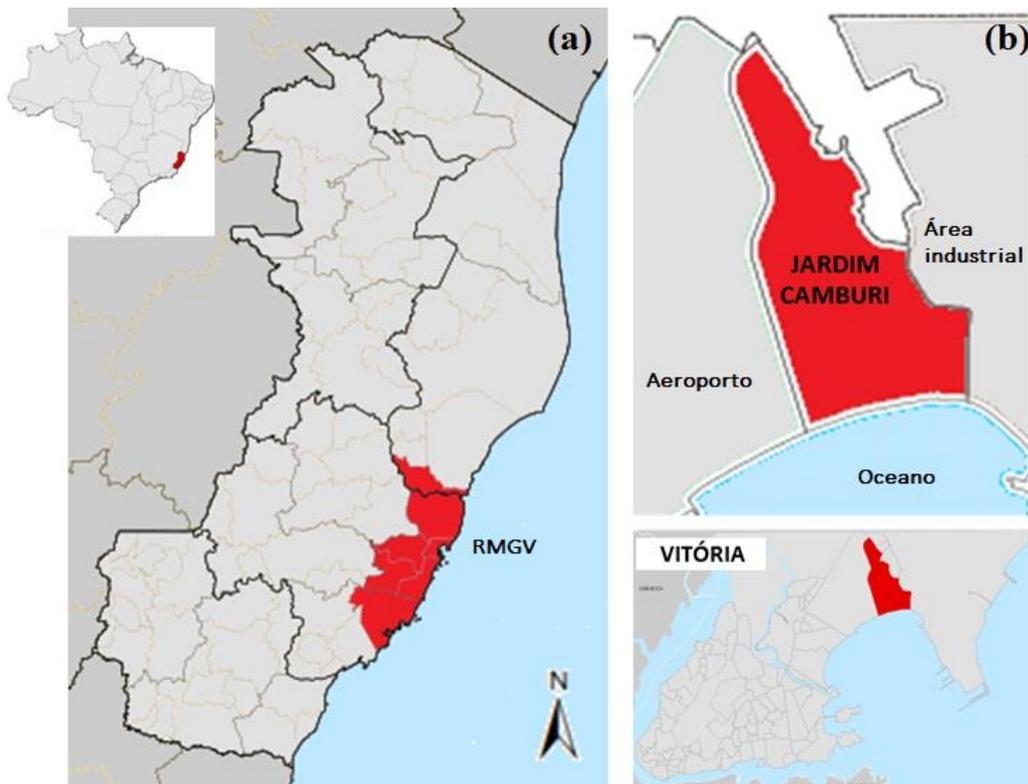


Figura 5 – Localização geográfica da área de estudo dentro do mapa do estado do Espírito Santo. (a) Em vermelho a Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV); (b) Município de Vitória indicado no canto inferior direito e limites do bairro Jardim Camburi no canto direito superior. Fonte: O autor.

3.2. Modelagem de Mesoescala - WRF

Neste estudo são utilizados dados provenientes de modelagem *Weather Research and Forecasting* (WRF). O WRF é um sistema de modelagem numérica da atmosfera de domínio público que foi desenvolvido em um esforço colaborativo entre vários de centros de pesquisa e agências governamentais (POWERS, 2017). O modelo WRF pode ser aplicado para previsões numéricas do tempo (operacionais ou não), pesquisas de parametrizações físicas e assimilação de dados, aplicações na previsão da qualidade do ar, acoplamento com modelos de previsões oceânicas e de dispersão de poluentes atmosféricos e simulações idealizadas. O modelo é relativamente versátil, podendo ser utilizado em diversas escalas de comprimento que variam de metros a milhares de quilômetros. (SANTIAGO, 2015).

O WRF é o modelo de previsão numérica do tempo mais utilizado atualmente (POWERS, 2017), além de representar o estado da arte de modelos de simulação atmosférica de mesoescala. O modelo possui três módulos principais: o (i) pré-processamento (WPS), (ii) o módulo de processamento (ARW) e o (iii) pós-processamento. No módulo de pré-processamento (WPS) os dados são processados e preparados para alimentar o módulo principal do WRF, os dados necessários para a inicialização do modelo (dados meteorológicos, geográficos e de ocupação de

solo), de malhas horizontais e verticais, de alinhamentos, tempo, etc. O módulo principal (ARW) simula a atmosfera com base nas equações de conservação de massa, quantidade de movimento, energia e suas parametrizações. Após o processamento principal no módulo ARW, os dados são tratados no módulo de pós-processamento. Este último fornece um conjunto de valores espaço-temporais de grandezas escalares e vetoriais como pressão, umidade, temperatura, velocidade, altura da CLA, etc, representando a evolução temporal das variáveis físicas da atmosfera. O modelo WRF permite realizar a assimilação de dados de observação ou de outros modelos utilizando o módulo WRF-Var. Os dados de saída estão no formato NetCdf e podem ser lidos por vários aplicativos gráficos como o GrADS, Vis5D, IDV, entre outros (SANTIAGO, 2015).

As equações diferenciais de conservação de massa, energia, momentum e espécies químicas governantes do comportamento da atmosfera são resolvidas pelo modelo WRF, para simular as condições atmosféricas. As Equações 1, 2 e 3 representam a conservação da quantidade de movimento, a Equação 3 a conservação de energia, a Equação 5 é conservação da massa, a Equação 6 é a geopotencial e a Equação 7 é a de estado termodinâmico. O equacionamento utilizado na prática pelo WRF possui termos adicionais que consideram o efeito da força de Coriolis, umidade do ar e a projeção cartográfica utilizada (AYLAS, 2017).

$$\partial_t U + (\nabla \cdot V_u) - \partial_x(p\phi_n) + \partial_\eta(p\phi_x) = F_U \quad (1)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot V_v) - \partial_y(p\phi_n) + \partial_\eta(p\phi_y) = F_V \quad (2)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot V_w) - (\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (3)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot V_\theta) = F_\Theta \quad (4)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot V) = 0 \quad (5)$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1}[(V \cdot \nabla \phi) - gW] = 0 \quad (6)$$

$$p = p_0 (R_d \theta / p_0 \alpha)^\gamma \quad (7)$$

θ é a temperatura potencial; $\phi = gz$ é o geopotencial; p é a pressão; $\alpha = 1/\rho$ é o inverso da densidade; R_d é a constante do gás para ar seco; p_0 é a pressão de referência (105 Pascal); μ é a massa por unidade de área; $V = \mu v = (U, V, W)$; $v = (u, v, w)$ é a covariância das velocidades na direção horizontal e vertical. F_U, F_V, F_W e F_Θ são os termos forçantes devido a física do modelo, mistura turbulenta, projeções esféricas e a rotação da terra.

Os dados provenientes do WRF foram obtidos por meio da modelagem elaborada por Santiago (2015) aplicada ao período de 26 de abril de 2018 até 12 de maio de 2018. Uma representação esquemática do domínio computacional da modelagem WRF para a RMGV empregado neste estudo pode ser visto na Figura 6. Esta configuração possui 4 grids

computacionais aninhados (*nested domains*) com resoluções de D01 = 27 km (70 x 70 células), D02 = 9 km (100 x 100 células), D03 = 3 km (100 x 100 células), e D04 = 1 km (120 x 120 células). Verticalmente, a malha do WRF é dividida em 21 camadas até o topo do domínio. A área de estudo está geograficamente localizada dentro do grid D04, com resolução de 1 km por 1 km. Sendo assim, para esta pesquisa, a D04 é a única região de interesse dentro do domínio do WRF.

A Figura 7 mostra com maiores detalhes a disposição do grid D04 sobre o bairro Jardim Camburi. Com o auxílio do software QGIS, foi possível identificar geograficamente a posição das células do WRF que envolvem o Bairro, e associar estas células ao modelo CFD de microescala (procedimento descrito na seção 3.3). Os quadrados delimitados por linhas brancas representam a disposição espacial do *grid* do WRF sobre o bairro Jardim Camburi, onde as linhas verticais são paralelas a linha Norte-Sul geográfico e as linhas horizontais são paralelas a linha Leste-Oeste. A localização dos pontos de aquisição é determinada de forma que toda a área urbana do bairro esteja delimitada pelo retângulo formado pelas arestas onde os 14 pontos de referência são dispostos (Figura 7). Sendo assim, a região a ser estudada por modelagem de microescala (CFD) abrange ao todo 12 células de 1 km por 1 km da malha do WRF.

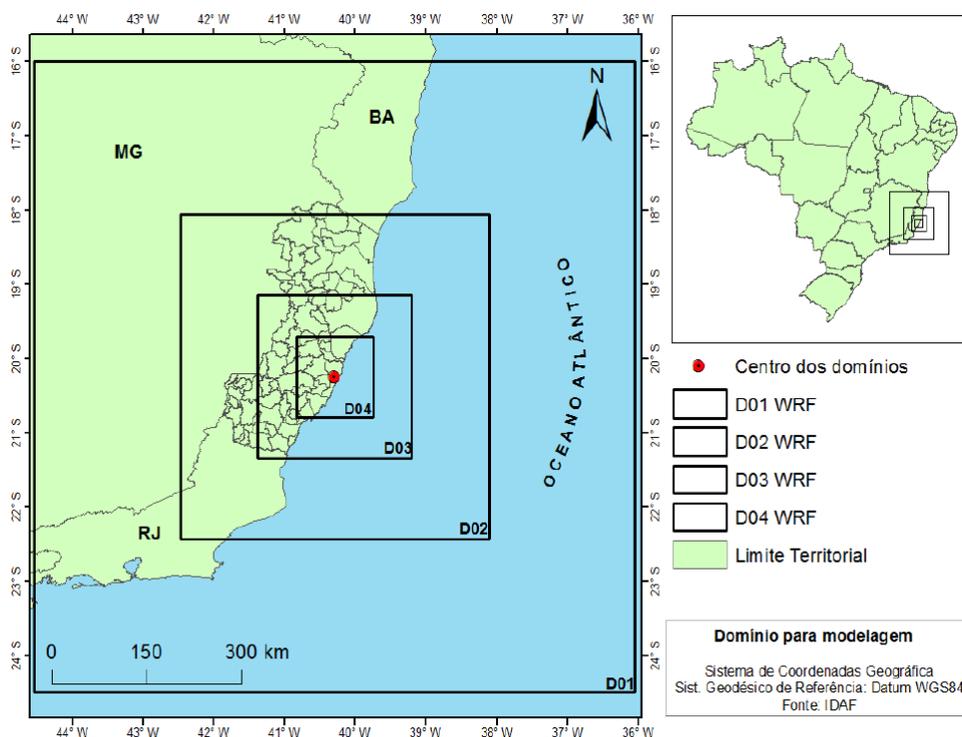


Figura 6 - Domínios computacionais do modelo WRF com a indicação da localização de cada *grid* com diferentes resoluções espaciais. O *grid* D04 contém a área onde está localizada a região metropolitana de Vitória e o Bairro em estudo. Fonte: Modificado de Santiago (2015).

Informações das componentes de velocidade (U , V e W) em 7 diferentes níveis de altura são obtidas em intervalos de uma hora e registrados em arquivos de dados para cada ponto. Além dos

níveis de altura, valores de velocidade e direção do vento a 300 m de altura também são registrados, o que correspondem ao topo do domínio que será usado para a modelagem de microescala. Ao todo, o grupo de dados horários de velocidade e direção do vento são obtidos para 98 pontos ao longo das faces laterais do grupo de células que envolvem o bairro, mais 12 pontos na altura do topo do domínio computacional de microescala.

Maiores detalhes da modelagem WRF utilizada neste trabalho, são descritos por Santiago (2015).

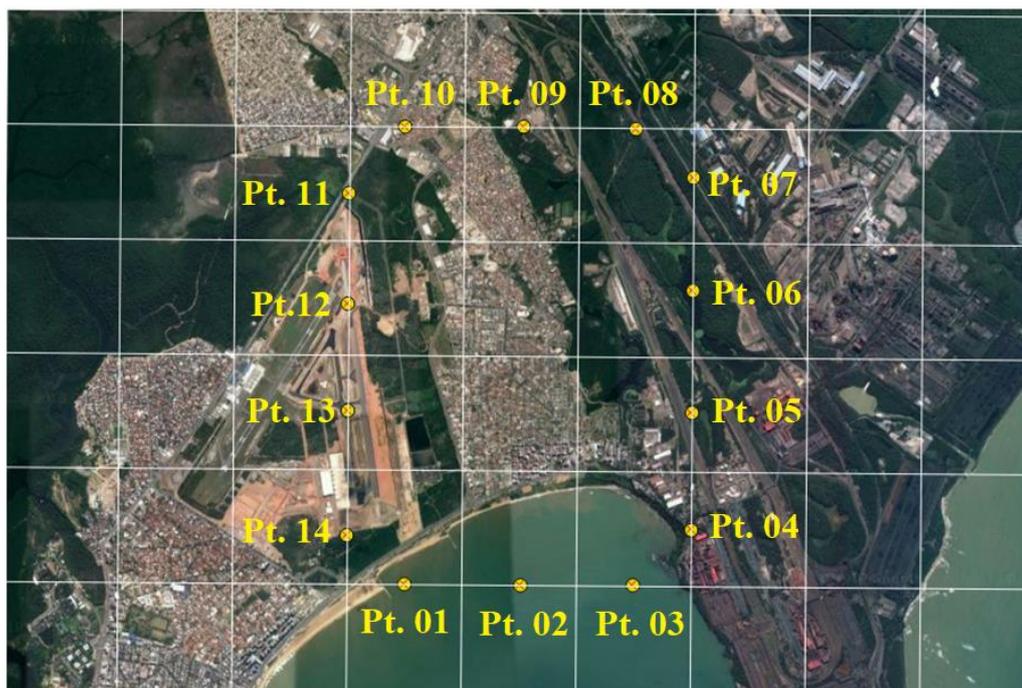


Figura 7 - Disposição dos 14 pontos de aquisição de dados do modelo de mesoescala WRF. As linhas brancas correspondem às arestas do grid D04. Imagem de satélite obtida de Google Earth. Fonte: O autor.

3.3. Modelagem CFD de Microescala

Para a modelagem de microescala do campo de vento é utilizada a dinâmica de fluidos computacional (CFD), em domínio tridimensional. Esta técnica baseia-se na resolução numérica das equações governantes do escoamento, abordadas anteriormente, para domínio computacional discretizado no espaço e no tempo.

O escoamento do ar atmosférico é governado pelas equações de conservação de massa (equação 8) e conservação da quantidade de movimento (equação 9). Sendo assim, na modelagem CFD de microescala, essas equações são resolvidas para cada elemento do domínio computacional discretizado em regime transiente. Nesta pesquisa, com o intuito de reduzir a complexidade da

modelagem, são consideradas condições de atmosfera neutra, fluido newtoniano e incompressível dentro do volume de controle.

A consideração de atmosfera neutra é feita somente para fins de simplificação da modelagem. Neste trabalho busca-se investigar a influência das variações temporais de velocidade e direção do vento dentro do dossel urbano, mas avaliando o efeito dinâmica atmosférica de mesoescala. Certamente as condições de instabilidade influenciam as características do escoamento atmosférico, mas por outro lado atribuem complexidade extra a modelagem computacional. Sendo assim, com o intuito de simplificar o modelo e reduzir o esforço computacional necessário para as simulações, os efeitos do empuxo térmicos causados pelas variações diárias de temperatura não serão avaliados neste estudo. Desta forma, as equações governantes são descritas como:

(i) Equação da conservação de massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

(ii) Equação da Conservação da Quantidade de Movimento

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g \delta_{3i} \quad (9)$$

Onde o termo τ_{ij} é definido na forma:

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \left(p + \frac{2}{3}\mu \frac{\partial U_K}{\partial x_K} \right) \delta_{ij} \quad (10)$$

e

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

Onde x_i são coordenadas cartesianas [L]; U_i é a velocidade instantânea na direção i [Lt^{-1}]; p é a pressão [$mL^{-1}t^{-2}$]; ρ é a massa específica [mL^{-3}]; μ é a viscosidade molecular do fluido [$mL^{-1}t^{-2}$]; S_{ij} tensor de deformação. As dimensões são descritas como [m] massa, [L] comprimento e [t] tempo.

Para o tratamento da turbulência, é utilizada a abordagem *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) para resolução do escoamento em regime transiente. Na abordagem RANS as equações são definidas por um conjunto de médias das equações de Navier-Stokes e da continuidade, em que as grandezas estatísticas de interesse são valores médios sobre todas as escalas de comprimento (COSTA, 2016). Esta abordagem simplifica a resolução do problema pois estas grandezas variam

suavemente no tempo e espaço. Dessa forma, o valor instantâneo de qualquer variável genérica φ é descrito da forma.

$$\varphi = \bar{\varphi} + \varphi' \quad (12)$$

Substituindo as variáveis decompostas, as equações de conservação de massa e quantidade de movimento podem ser reescritas da forma das equações 12 e 14.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{U}_i \bar{U}_j)}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^{turb}}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \rho g \delta_{2i} \quad (14)$$

O termo τ_{ij}^{turb} definido como tensor de Reynolds aparece como consequência da decomposição das equações em função da média e flutuações instantâneas das variáveis. O tensor é descrito da seguinte forma.

$$\tau_{ij}^{turb} = - \begin{bmatrix} \overline{u'_1 u'_1} & \overline{u'_1 u'_2} & \overline{u'_1 u'_3} \\ \overline{u'_2 u'_1} & \overline{u'_2 u'_2} & \overline{u'_2 u'_3} \\ \overline{u'_3 u'_1} & \overline{u'_3 u'_2} & \overline{u'_3 u'_3} \end{bmatrix} \quad (15)$$

A redução da complexidade da modelagem é importante para viabilização do estudo, uma vez que o domínio em escala real é muito grande e considerando o aparato computacional disponível, ficaria inviável a utilização de modelagem mais detalhada da turbulência do escoamento, como LES, DNS e modelos RANS mais sofisticados. Sedo assim, é utilizado o modelo RANS de duas equações *k-ε standard*, cuja aplicação já é consolidada com resultados considerados satisfatórios para casos envolvendo modelagem do escoamento do ar. Souza (2005) relata que a modelagem *k-ε* é a mais utilizada e conhecida dentre os modelos de turbulência para CFD. Modelos *k-ε* são largamente utilizados para o tratamento da turbulência em diversas aplicações, incluindo o estudo de escoamento de ar em meio urbano (COSTA, 2016; Mishra, 2018).

A abordagem *k-ε* padrão é considerada semi-empírica, ou seja, a derivação das equações baseia-se em considerações fenomenológica e empíricas. Na obtenção deste modelo, assume-se que o escoamento é completamente turbulento e negligencia-se a viscosidade molecular (POPE, 2000). Neste modelo, a viscosidade turbulenta é determinada com base na produção da energia cinética turbulenta (k) e na dissipação da energia cinética turbulenta (ϵ), como segue:

$$\mu_T = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon \quad (12)$$

com $C_\mu = 0,09$ sendo uma constante empírica do modelo. Dessas duas propriedades é possível obter a escala de comprimento ($L = k^{3/2}/\varepsilon$) e a escala temporal ($\tau = k^2/\varepsilon$).

Duas equações diferenciais são resolvidas para o cálculo dos valores da energia cinética turbulenta (k) e de sua dissipação (ε), e são descritas da seguinte forma.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (137)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (148)$$

Nestas equações o termo G_k representa a geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade média. G_b é a geração de energia cinética turbulenta devido as flutuações. Y_M represente a parcela relativa à flutuação na dilatação volumétrica para o caso de escoamentos turbulentos compressíveis. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são constantes. σ_k e σ_ε representam os números de Prandtl turbulentos para k e ε , respectivamente. S_k e S_ε representam termos fontes.

Cable (2009) apresenta a definição dos termos G_k , G_b , e Y_M como segue:

$$G_k = \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (15)$$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (20)$$

$$Y_M = 2\rho \varepsilon M_t^2 \quad (21)$$

Onde M_t é o número de Mach turbulento. Maiores detalhes da modelagem $k-\varepsilon$ standard são descritos por Versteeg e Malalasekera, (2007) e Ansys (2012). Um detalhamento do escoamento em regime transiente para fluidos incompressíveis pode ser encontrado em Kolmogorov, (1941) e (1942) e Uygun et al., (2004).

O solver ANSYS FLUENT versão 19.1 foi utilizado. Este solver utiliza o método dos volumes finitos para a resolução das equações governantes do escoamento para os pontos da malha computacional, como apresentado na seção 3.3.2.

A discretização numérica das equações diferenciais que governam o escoamento utiliza o método *Upwind*. O método *Upwind* contribui para a estabilidade da solução numérica. No entanto, o *Upwind* de primeira ordem, em alguns casos está associado a erros numéricos que podem atribuir

problemas de precisão. Considerando a limitação numérica deste método, o *Upwind* de segunda ordem é utilizado para a discretização espacial das equações de transporte neste trabalho.

Para o termo gradiente, o *Least squares cell-based* foi utilizado nesta pesquisa. A escolha foi baseada no menor esforço computacional requerido para as simulações, comparado a outros métodos como os do tipo Green-Gauss. Maiores detalhes destes métodos podem ser encontrados em (Ansys, 2013).

O método SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) para acoplamento pressão-velocidade é utilizado. Esta abordagem, inicializa o campo de pressão com base em um chute inicial e resolve as equações de *momentum* discretizadas com base nestes valores. Uma correção para a pressão é então aplicada e calculada através de uma segunda equação de continuidade. O ajuste de pressão e velocidade é feito por um processo iterativo até que os critérios de convergência sejam alcançados (Ansys, 2013).

3.3.1. Configuração do modelo computacional de microescala

Os dados para a confecção do modelo em 3D do bairro Jardim Camburi foram obtidos da prefeitura de Vitória, que disponibiliza os projetos de base cartográfica do ano de 2007, além de informações do número de pavimentos de cada lote ocupado. Estas informações tornam possível a criação da geometria tridimensional do bairro em escala real, adotando a estimativa de 3 m de altura por pavimento de cada edificação. Como as informações de base cartográfica são de 2007, o *GoogleMaps* é utilizado como complemento, onde são identificadas e incluídas na modelagem algumas edificações mais recentes que não estão detalhadas na base cartográfica.

É importante salientar que a geometria computacional construída possui simplificações para viabilizar a geração da malha computacional, como por exemplo a supressão de detalhes da morfologia urbana como muros, becos estreitos e outras características geométricas menores do que 3m. Além disso, a geometria não inclui certas edificações mais recentes que não constam na base cartográfica e não foram identificadas no *GoogleMaps*. Sendo assim, essas diferenças entre o modelo e o meio urbano real podem influenciar na acurácia da modelagem em alguns pontos. A representação do domínio computacional é mostrada na Figura 8, onde é possível observar a subdivisão das faces laterais do domínio computacional de acordo cada nível de altura onde os dados foram obtidos do WRF.

A Figura 9 mostra a divisão dos terrenos nos arredores do bairro Jardim Camburi. Como a ocupação do terreno é diferenciada nos entornos do bairro, são definidos diferentes valores de rugosidade superficial para cada divisão mostrada. Estes valores são definidos com base em Stull (1988), que apresenta uma relação de rugosidade aerodinâmica para diferentes tipos de terrenos. Os

tipos de ocupação de cada zona bem como suas respectivas rugosidades aerodinâmicas são mostradas na Tabela 2.

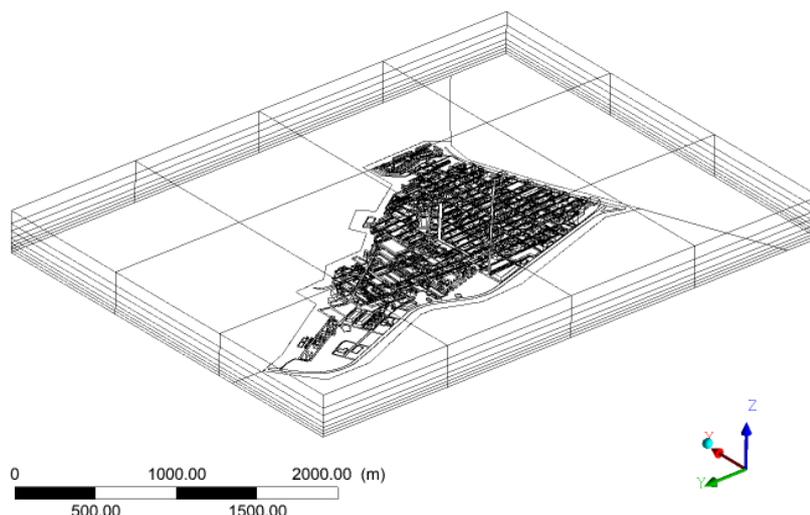


Figura 8 – Vista em perspectiva superior do domínio computacional e *grid* indicando a localização de todas as faces laterais e superiores onde as condições de contorno são definidas. Fonte: O autor.

O domínio delimitado para o estudo corresponde a uma distância no eixo X de 3 km e no eixo Y de 4 km, totalizando uma área total de 12 km². Esta área envolve totalmente o bairro em estudo. O afastamento da fronteira do domínio até o conjunto de prédios foi definido de acordo com o posicionamento do *grid* do WRF e dos pontos de aquisição (Figura 7), de forma que os limites do domínio CFD sejam coincidentes com o *grid* do WRF nestes pontos. Shen (2017) sugere um afastamento ideal de no mínimo 15H para a saída do domínio em geometrias com prédios de formatos variados, sendo H a altura média dos prédios. Como neste trabalho todas as fronteiras laterais do domínio serão definidas como entrada ou saída (de acordo com as velocidades do vento provenientes do WRF), a distância mínima de 15H para fronteira é respeitada em todos os lados do domínio, com valor de H igual a 9 m.

A altura do maior prédio do bairro é de 69 m, e a altura do domínio foi definida a 300 metros da base, a fim de evitar a influência do limite superior no escoamento do ar no nível do dossel. Para esta pesquisa, é considerada uma altura relativamente grande do chão para o topo do domínio (300 m), de forma a mitigar o efeito da fronteira superior do modelo no resultado do escoamento no nível da rua.

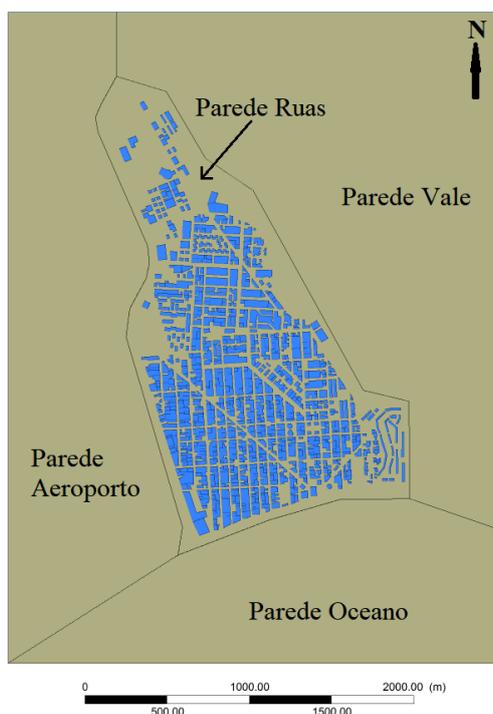


Figura 9 - Vista superior do domínio computacional evidenciando o plano na altura zero (chão) onde são indicadas a localização das áreas referentes às diferentes ocupações de terrenos com rugosidades específicas de acordo com a Tabela 3.

Tabela 2 - Rugosidades aerodinâmicas definidas para cada diferente tipo de terreno nos arredores do bairro como descrito na Figura 9.

Zona	Tipo de ocupação	Rugosidade
Parede Oceano	Área costeira	0,001
Parede Vale	Arredores de cidades	0,40
Parede Aeroporto	Arvores isoladas, arbustos e poucas edificações.	0,20

Para a definição das características da malha computacional, foi realizado um teste de independência ou sensibilidade de malha. Sendo assim, uma malha estruturada (elementos tetraédricos) de 2×10^7 de elementos foi selecionada para as simulações dos casos. O tamanho do menor elemento de 1,5 metros foi definido para áreas próximas as edificações. Além da sensibilidade da malha, o critério de convergência e o tamanho do *time-step* também foi avaliado. O critério de convergência de 5×10^{-3} e o tamanho do *time-step* de 3600 segundos foram definidos para os casos. No Apêndice A, são detalhados os testes de sensibilidade, bem como os critérios adotados para escolha de cada parâmetro.

3.4. Acoplamento entre mesoescala e microescala

Neste trabalho são empregadas 02 metodologias para acoplamento entre mesoescala e microescala: (i) acoplamento WRF-CFD e (ii) acoplamento CFD dados medidos por estação meteorológica. O acoplamento WRF-CFD é efetuado como o objetivo central deste trabalho, considerando os resultados do modelo de mesoescala WRF como condições de contorno para as simulações de CFD. Entretanto, os resultados das simulações WRF não representam de maneira exata a direção e velocidade do vento medidos no entorno do bairro. Uma vez que as simulações WRF apresentam desvios em relação aos dados de vento medidos na região, estes desvios podem influenciar a capacidade de previsão do modelo de CFD do escoamento no interior dos cânions urbanos. Desta forma, foi implementada uma segunda configuração cujos dados de condições de contorno das simulações de microescala são oriundos dos dados medidos por uma estação meteorológica posicionada no entorno do bairro. As próximas seções descrevem as duas configurações e a forma de implementação das condições de contorno de microescala com base na configuração empregada.

3.4.1. Acoplamento WRF-CFD

Para investigar o campo de vento resultante da modelagem CFD de microescala sob efeitos de variações temporais de velocidade e direção vento, uma metodologia de acoplamento com o modelo WRF é utilizada. O diagrama da Figura 10 mostra os passos seguidos pela estratégia de acoplamento. Basicamente, após propriamente inicializado, o modelo WRF calcula o campo de vento para a região de estudo. Posteriormente, os dados das componentes de velocidade em intervalos de 1 hora para cada ponto correspondente as faces do domínio CFD são alocados em arquivos de texto. Os arquivos são carregados ao modelo CFD e utilizados com condições de entrada para a modelagem de microescala *quase-steady* que resolve as equações governantes do escoamento de forma transiente para domínio computacional utilizando um *time-step* relativamente grande. Devido ao tamanho do intervalo de tempo, a simulação assume um regime permanente para cada *time-step*. Este processo continua até que se completem todos os intervalos de tempo incluídos nos arquivos de dados. Finalmente, a modelagem CFD fornece um novo campo de vento com que inclui informações provenientes da dinâmica da atmosfera e efeitos de larga escala.

O acoplamento dos dados do WRF como condições de contorno para a modelagem CFD é viável devido a possibilidade de implementação de condições de contorno customizadas ou *User-Defined Functions* (UDF) no solver ANSYS FLUENT. Uma UDF é uma função definida e programada pelo usuário em linguagem C, que pode ser carregada dinamicamente com o *solver* para aprimorar os recursos padrão do código. Por exemplo, é possível usar UDF's para definir condições de contorno específicas, propriedades do material e termos fonte para o escoamento, bem

como especificar parâmetros de modelo personalizados (DPM, modelos multifásicos, entre outros), inicializar uma solução ou melhorar o pós-processamento.

Neste sentido, para este projeto, é construída uma UDF para definição da condição de contorno transientes na entrada do domínio CFD. Dessa forma, diferentes valores das componentes de velocidade do vento são utilizados nas entradas do domínio de microescala ao longo do tempo de escoamento, de acordo com os dados de saída da modelagem WRF. Os intervalos entre cada valor das componentes podem ser definidos com base nos dados do WRF.

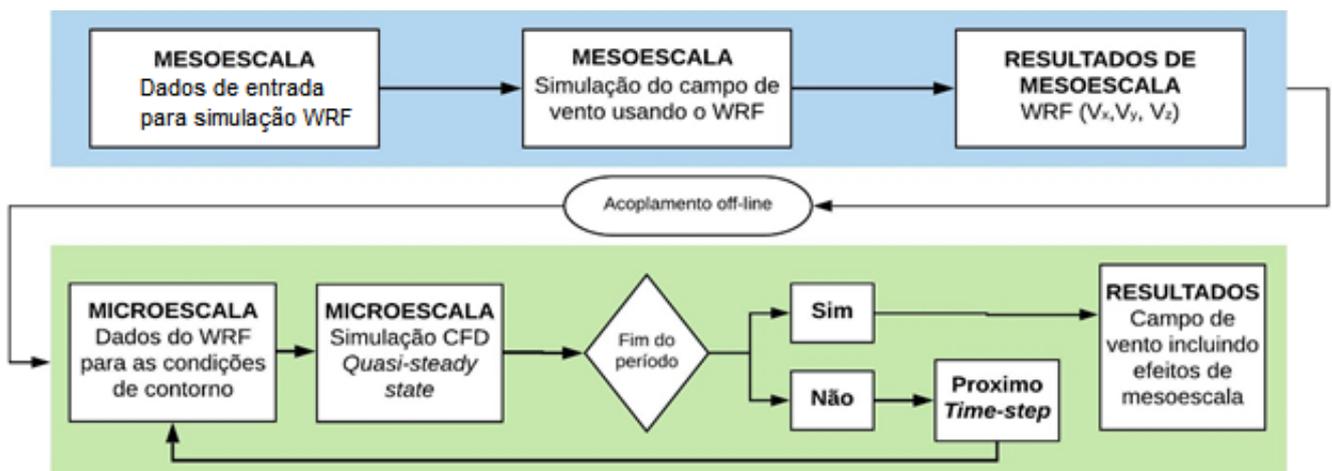


Figura 10 – Esquema da metodologia de acoplamento entre dados da modelagem de WRF de mesoescala em modelagem CFD de microescala onde são indicados as principais etapas da modelagem WRF e da modelagem CFD bem como a estratégia de interação entre os modelos. Fonte: O autor.

O código implementado em linguagem C, faz a leitura de arquivos de dados provenientes da modelagem WRF para cada ponto correspondente as faces do domínio como mostrado anteriormente na Figura 8. Em posse dos arquivos, a função *DEFINE_PROFILE()* da biblioteca *udf.h* do ANSYS FLUENT é utilizada para alocar os valores das componentes de velocidade para o respectivo tempo de escoamento. A função *DEFINE_PROFILE()* permite definir um perfil que pode variar em função de coordenadas espaciais ou temporais, e pode ser utilizada para customização de uma série de variáveis na entrada do domínio como velocidade, pressão, temperatura, energia cinética turbulenta, entre outras.

A cada *time-step* da simulação de microescala, diferentes valores das componentes velocidade são atribuídos às entradas do domínio computacional. Dados horários de velocidade e direção do vento são exportados do WRF e tratados por meio da ferramenta Matlab, que já exporta os valores como componentes de velocidade (*U*, *V* e *W*) para arquivos de texto que são fornecidos ao solver de CFD e atribuídos às faces laterais e superior do domínio computacional.

3.4.2. Acoplamento CFD com dados medidos

Conforme citado anteriormente, além de dados do WRF na modelagem CFD, também é realizada a aplicação desta metodologia com dados provenientes da estação meteorológica fixa localizada no aeroporto de Vitória. Esta configuração será designada como CFD-AERO e é utilizada para avaliar a precisão do acoplamento considerando um dado real medido no mesmo período da configuração CFD-WRF (acoplamento entre CFD e o WRF). As componentes de velocidade do vento medidas por esta estação a 10 metros do solo são usadas como condições de entrada no domínio CFD. Em geral, os dados da estação do aeroporto são mais precisos (em relação ao WRF), e podem fornecer uma melhor representação de características do campo de vento na região.

A Figura 11 mostra a localização da estação meteorológica fixa, identificada como PT-AERO, em relação ao bairro Jardim Camburi. A estação meteorológica é relativamente próxima ao limite oeste do bairro Jardim Camburi e relativamente afastada dos outros limites do domínio.



Figura 11 – Localização da estação meteorológica fixa do aeroporto de Vitória (PT-Aero) em relação ao bairro Jardim Camburi. O círculo vermelho indica a localização da estação meteorológica do aeroporto. Fonte: *GoogleEarth*.

Para cada intervalo de tempo, os valores de componentes de velocidade do vento são atribuídos para as quatro laterais do domínio. Certamente diferenças entre esses dados medidos na estação e os valores reais em pontos referentes as fronteiras do domínio CFD já são esperadas devido a consideração de apenas um ponto de medição e a distância para as faces. Adicionalmente,

foi assumido um perfil vertical de velocidade para as componentes U e V , aproximado a uma lei logarítmica para atmosfera neutra (eq. 22 e 23). Esta função também é implementada no código da UDF, possibilitando a construção do perfil vertical de velocidade na entrada do domínio.

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right) \quad (22)$$

$$V(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right) \quad (23)$$

Onde $U(z)$ e $V(z)$ são as componentes de velocidade média do vento na altura z , u_* é a velocidade de fricção, k é a constante de Von Kármán (0,40), z_0 é o comprimento característico da rugosidade do solo. O perfil de velocidade logarítmico apresenta a rugosidade como único parâmetro de descrição, e de acordo com as características de ocupação do terreno, o perfil vertical apresenta variações significativas. A equação logarítmica é largamente utilizada para construção do perfil vertical de velocidade em estudos que envolvem modelagem do campo de vento em ambientes urbanos reais e idealizados (TOMINAGA *et al.*, 2008; SANCHEZ *et al.*, 2017; SANTIAGO *et al.*, 2017; SOULHAC *et al.*, 2012).

3.4.3. Condições de contorno

A descrição de todas as condições de contorno usadas nas simulações é apresentada na Tabela 3. Para uma determinada face, quando a velocidade do vento tem o sentido para dentro do domínio computacional, a condição de velocidade prescrita é utilizada com a condição de contorno (condição *velocity-inlet* do ANSYS FLUENT), caso contrário (velocidade tem o sentido para fora do domínio), a condição de contorno é definida como derivadas normais a fronteira nulas (condição *outflow* do ANSYS FLUENT). Esta modificação é feita por meio de um código em linguagem *Scheme* acoplado ao ANSYS FLUENT, que identifica o sentido do vetor velocidade e modifica a condição de contorno. As faces inferiores referentes ao terreno, ruas e as edificações são definidos como condição de parede (*wall*).

A condição de escorregamento livre, ou *free slip*, é adotada para o topo do domínio para o caso CFD-AERO. Essa condição garante que as componentes do campo de velocidade que são normais a fronteira sejam iguais a zero, mas as componentes tangenciais não sofrem restrições dividindo a superfície. Em outras palavras, a condição *free slip* desconsidera efeitos verticais no campo de vento na fronteira específica. Na atmosfera essas trocas de momentum verticais certamente ocorrem, e podem influenciar no campo de vento até zonas mais próximas.

Tabela 3 - Condições de contorno para os limites do domínio CFD de microescala utilizados nos casos simulados.

Localização	Condição de contorno
Faces laterais (98 faces)	<i>Velocity Inlet</i> – Se a velocidades do ar for entrando no domínio. <i>Outflow</i> – Se o fluxo de ar for saindo do domínio.
Parede Vale	<i>Wall, no-slip</i> : Condição de parede não escorregamento.
Parede Oceano	$\bar{U} = \bar{V} = \bar{W} = 0$
Parede Aeroporto	
Parede Ruas	
Prédios	<i>Wall, no-slip</i> : Parede com condição de não escorregamento.
Topo (12 faces)	CFD-WRF: <i>Velocity Inlet</i> - Condição de entrada. Velocidades variam de acordo com os dados de mesoescala. CFD-AERO: <i>Free slip</i> : $u_z = 0$; $\frac{du_z}{dz} = 0$.
<i>Time step</i>	3600 segundos

3.5. Avaliação da precisão dos resultados

Foi realizada uma campanha experimental de campo no período de 26/04/2018 a 12/05/2018, com 03 estações meteorológicas portáteis (modelo DR1A-0111) posicionadas no interior do dossel urbano, conforme indicado na Figura 12. Cada estação meteorológica usada nas campanhas de campo, possui um anemômetro de copo e um sensor de direção do vento. O conjunto de dados de saída da estação fornece valores de velocidade média do vento, velocidade instantânea/rajada e direção do vento dada em graus, além de outras informações de parâmetros meteorológicos que não são usadas neste projeto. O equipamento possui uma faixa de operação de zero a 180 km/h, e precisão de +/- 10% para velocidades inferiores a 18 km/h. O conjunto de dados completo fornecido pela estação contém valores de velocidade média do vento, velocidade instantânea / rajada e direção do vento dados em graus.

Todos os três pontos de monitoramento, são localizados dentro do dossel urbano com altura máxima de até 5 metros do solo, conforme indicado na Figura 13. O ponto de medição PT-01, é localizado na estação de monitoramento do IEMA. Na escolha dos pontos, procura-se também evitar locais próximos a obstáculos (ex: árvores, placas de propaganda e outros) que possam atrapalhar ou mascarar a correta leitura dos dados.

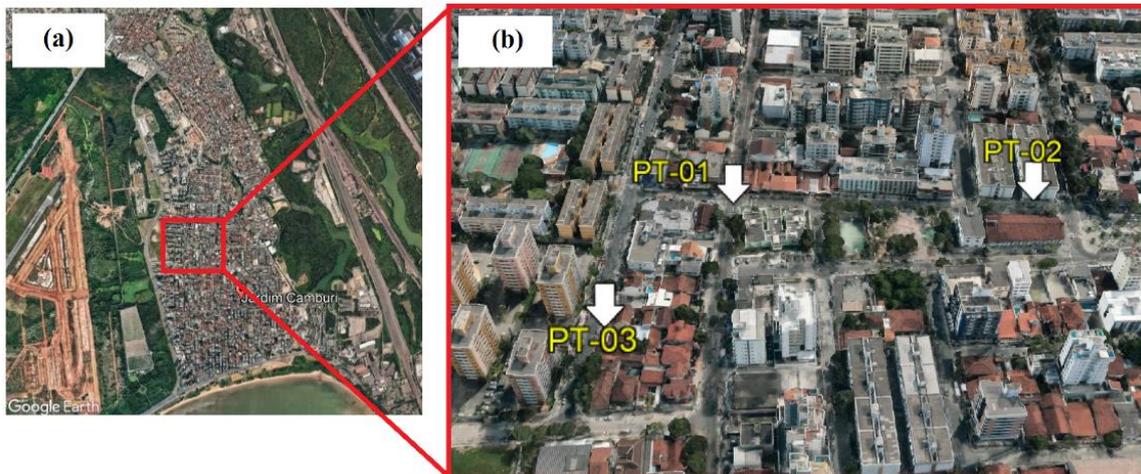


Figura 12 - (a) Região do bairro onde estão localizadas as estações de monitoramento dos dados; (b) Posição específica dos pontos de monitoramento PT-01, PT-02 e PT-03. Fonte: Modificado de *Google Earth*



Figura 13 - Detalhes dos três pontos de monitoramento de dados meteorológicos no bairro Jardim Camburi. Ponto PT-01 (estação do IEMA), Ponto PT-02, e Ponto PT-03. Fonte: O autor.

Para avaliar a precisão dos resultados obtidos, os valores de intensidade e direção do vento obtidos pelas simulações com as configurações CFD-AERO e CFD-WRF são comparados com dados medidos em campo pelas 03 estações meteorológicas. São utilizadas métricas estatísticas para quantificar o desempenho das configurações estudadas: média, desvio padrão (σ_s), erro quadrático médio (RMSE), erro quadrático médio normalizado (NMSE), erro bruto (*Gross Error - GE*), tendência ou viés (MB), tendência ou viés fracional (FB), tendência ou viés geométrica (MG), e o coeficiente de determinação (r^2) que são utilizados por autores como Hanna (2004), Santiago (2005), e Liu *et al.*, (2012).

- Média SIM (Simulado) e média OBS (Observado):

$$Média = \frac{1}{n} \sum_1^n (\phi_{OBS,SIM}) \quad (24)$$

- Erro quadrático médio (RMSE): Esta quantidade representa o desvio padrão dos resíduos (erros de previsão), e indica o quanto espalhado os resíduos estão. Possui a mesma unidade de medida da variável estudada.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (\phi_{SIM} - \phi_{OBS})^2} \quad (16)$$

O RMSE é uma boa medida geral do desempenho do modelo. No entanto, está métrica é afetada quando ocorrem grandes erros em uma pequena sub-região que podem produzir a um grande RMSE, embora os erros possam ser pequenos e bastante aceitáveis em outros lugares (EMERY, 2001).

- Tendência ou viés (MB): Esta métrica calcula o erro médio do modelo. Quando os valores simulados excedem as observações o MB é positivo, e em caso de valores simulados subestimados o MB é negativo.

$$MB = \frac{1}{n} \sum_1^n (\phi_{SIM} - \phi_{OBS}) \quad (17)$$

- Erro quadrático médio normalizado (NMSE) é basicamente uma medida de dispersão entre observado e simulado, e reflete tanto erros sistemáticos (tendência de registro de valores

sistematicamente abaixo ou acima do valor real) quanto não-sistemáticos (randômicos). O valor ideal para NMSE = 0.

$$NMSE = \frac{\overline{(\phi_{SIM} - \phi_{OBS})^2}}{\overline{\phi_{SIM}} * \overline{\phi_{OBS}}} \quad (18)$$

- Tendência ou viés fracionário (FB): É uma medida de viés de média e indica apenas erros sistemáticos que levam a sempre subestimar ou superestimar os valores medidos. FB é baseado em uma escala linear e refere-se basicamente a diferença aritmética entre observado e simulado, como definido na equação abaixo. O valor ideal desta expressão é FB=0.

$$FB = \frac{(\overline{\phi_{OBS}} - \overline{\phi_{SIM}})}{0,5(\overline{\phi_{OBS}} + \overline{\phi_{SIM}})} \quad (28)$$

- Viés da média geométrica (MG): Similarmente a FB, esta métrica também indica avalia a tendência a erro sistemático, mas neste caso, a expressão é baseada em escala logarítmica. O valor ideal para esta variável é MG=1.

$$MG = \exp(\overline{\ln \phi_{OBS}} - \overline{\ln \phi_{SIM}}) \quad (29)$$

- Coeficiente de determinação (r^2): Este parâmetro indica relação linear entre observado e simulado quando assume valor igual a 1. A não correlação entre dados ocorre quando r^2 é igual 0.

$$r^2 = \left(\frac{(\overline{\phi_{OBS}} - \overline{\phi_{OBS}})(\overline{\phi_{SIM}} - \overline{\phi_{SIM}})}{\sigma_{OBS}\phi_{OBS}\sigma_{SIM}\phi_{SIM}} \right)^2 \quad (30)$$

Obviamente, os dados provenientes da modelagem de mesoescala WRF, usados nas simulações CFD, já possuem um erro associado. Sendo assim, a precisão das simulações WRF também é avaliada por meio de comparação com os dados observados pela estação meteorológica fixa do aeroporto Eurico Salles Aguiar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no presente trabalho, incluindo resultados obtidos pela simulação com o acoplamento entre o modelo de mesoescala e o modelo CFD de microescala (CFD-WRF) e pela simulação com o acoplamento entre os dados meteorológicos medidos e o modelo CFD de microescala (CFD-AERO). Além dos resultados obtidos com as configurações CFD-WRF e CFD-AERO, são também apresentados os resultados provenientes diretamente do modelo de mesoescala WRF, com o objetivo de mostrar o maior detalhamento a precisão dos resultados obtidos com o uso dos modelos de microescala.

O capítulo está dividido em duas partes principais. Na primeira parte, Seção 4.1, são apresentadas as características gerais do campo de ventos obtidos no interior do dossel urbano da região de estudo, enfatizando as diferenças nos padrões de escoamento obtidas pelas configurações CFD-WRF e CFD-AERO. Na Seção 4.2, os resultados obtidos pelas configurações CFD-WRF e CFD-AERO são comparados com os dados medidos pelas estações meteorológicas portáteis, empregando os indicadores estatísticos apresentados no Capítulo 3.

4.1. Características gerais do campo de ventos obtidos no interior do dossel urbano da região de estudo

A Figura 14 apresenta uma visão global de todo o domínio computacional para o caso CFD-WRF, com campo de velocidade do vento às 12 horas do dia 03/05/2018. O campo vetorial é apresentado em um plano horizontal a 3 metros do solo, o que é a altura aproximada em que foram instaladas as estações meteorológicas portáteis. O retângulo vermelho indica a região do bairro onde foram instaladas as estações meteorológicas, sendo que as Figuras 15, 16, 17 e 18 detalham os campos de vento nesta região.

Como forma de ilustrar as características dos escoamentos obtidos, as Figuras 15 e 16 mostram uma visão mais detalhada do campo de velocidade do vento na região destacada em vermelho da Figura 14, para as simulações CFD-WRF e CFD-AERO, respectivamente. A formação de zonas de recirculação, aceleração e desaceleração do escoamento podem ser observadas ao longo de todo a área detalhada. É possível notar que, em ambas configurações (CFD-WRF e CFD-AERO), o modelo consegue capturar o efeito da canalização do escoamento causada pela presença física das edificações e intersecções. Além disso, existe uma significativa alteração da direção do vento no interior das ruas em relação à direção do vento na estação do Aeroporto que é uma área

livre de edificações. Outra característica relevante é a diferença entre os campos de vento obtidos nas configurações CFD-WRF e CFD-AERO. Estas diferenças serão discutidas posteriormente.

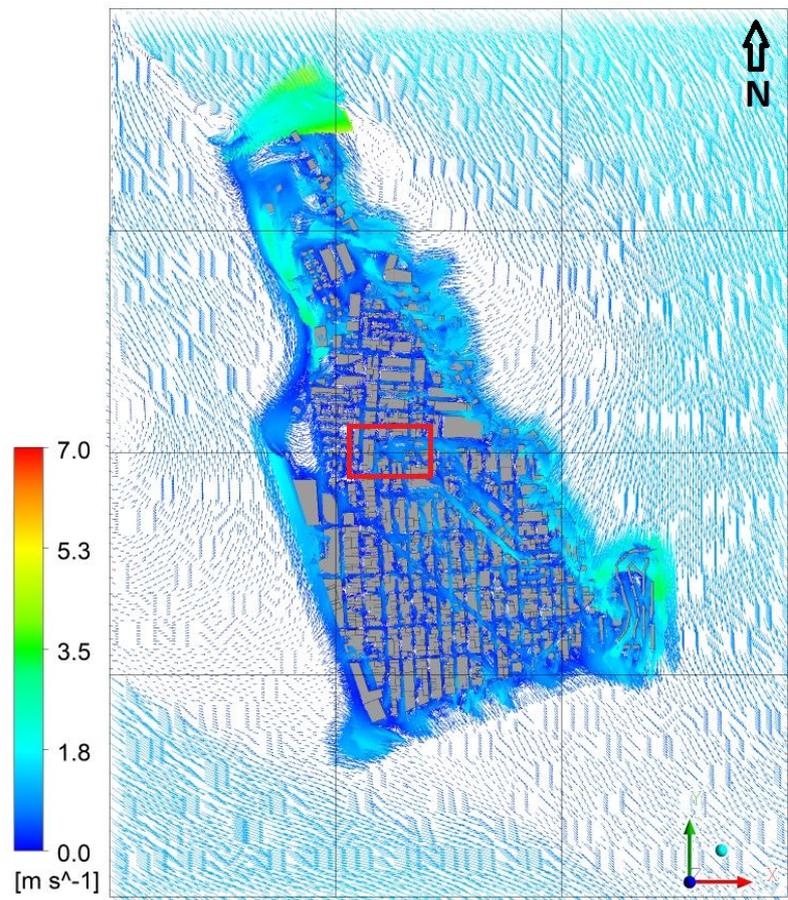


Figura 14 - Visão global do campo de vento gerado pelo acoplamento entre escalas para o caso CFD-WRF às 12:00 do dia 03/05/2018. O retângulo vermelho indica a região no domínio onde estão localizados os pontos de monitoramento.

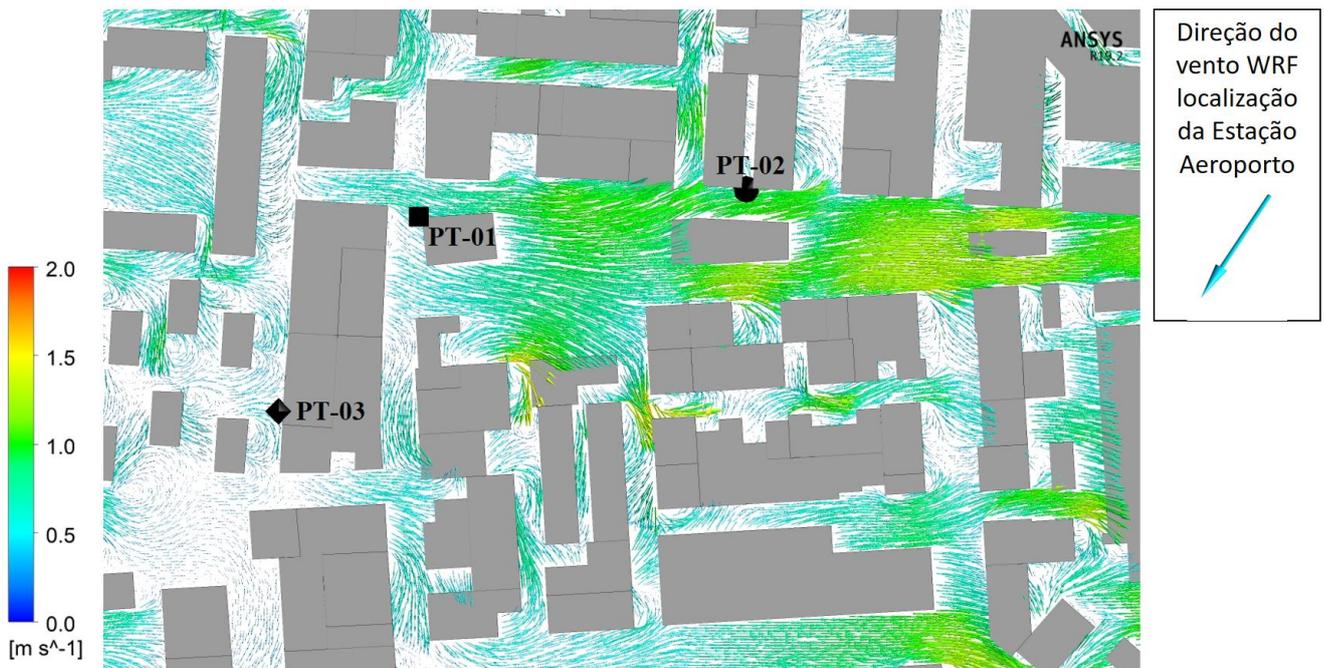


Figura 15 – Campo vetorial simulado na região das estações meteorológicas (área demarcada em vermelho na Figura 14) para o caso CFD-WRF às 12:00 do dia 03/05/2018.

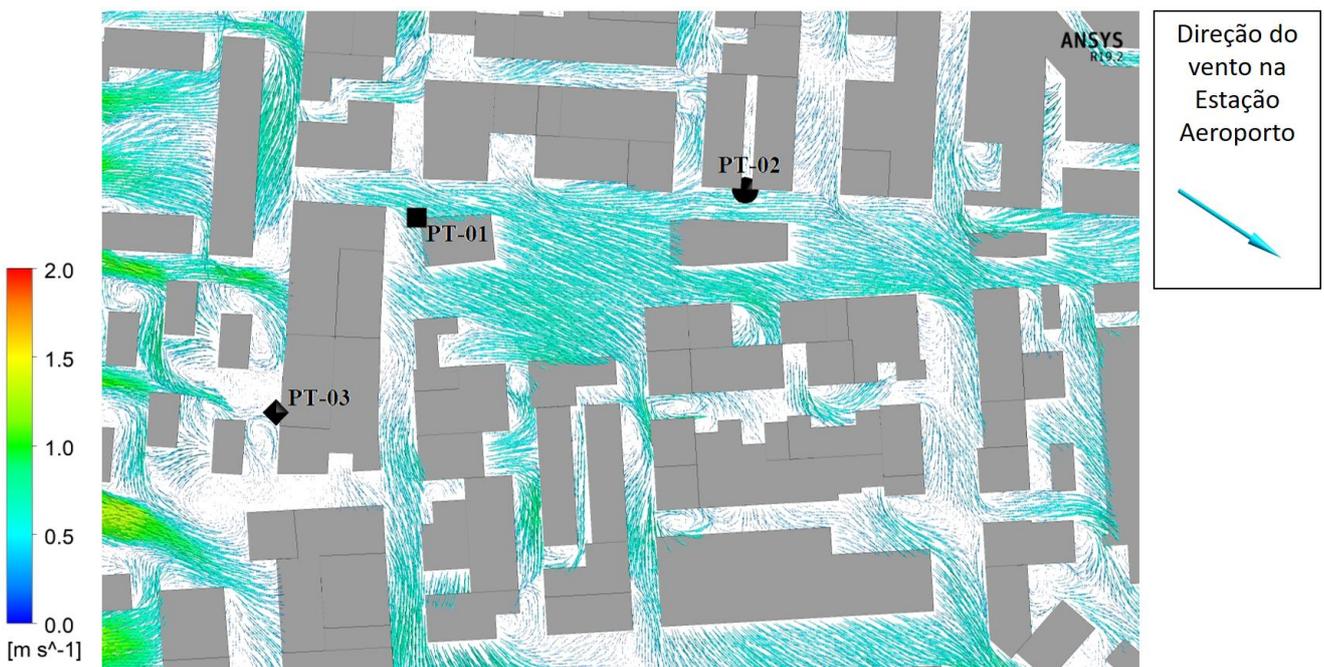


Figura 16 – Campo vetorial simulado na região das estações meteorológicas (área demarcada em vermelho na Figura 14) para o caso CFD-AERO às 12:00 do dia 03/05/2018.

As Figura 17 e Figura 18 mostram o campo de velocidade do vento em um plano vertical passando sobre PT-03, conforme indicado na Figura 19. É possível observar as características tridimensionais do escoamento, principalmente as regiões de recirculação atrás dos edifícios mais elevados e as regiões de escoamento descendente geradas à montante dos prédios, principalmente em edificações mais elevadas. Conforme descrito por Goulart *et al.* (2019), os movimentos

ascendentes a jusante dos prédios mais elevados e o escoamento descendente à montante dos prédios pode contribuir para uma redução dos níveis de concentração de poluentes no nível da rua, visto que tais movimentos contribuem para trazer ar mais limpo das camadas superiores (escoamento descendente á montante) e filtrar os poluente emitidos no interior do dossel (escoamento ascendente a jusante). Além disso, a complexidade do escoamento gerado contribui para aumentar os níveis de turbulência na região, ampliando o fluxo turbulento de poluente para fora do dossel urbano mesmo em regiões mais a jusante das edificações mais elevadas.

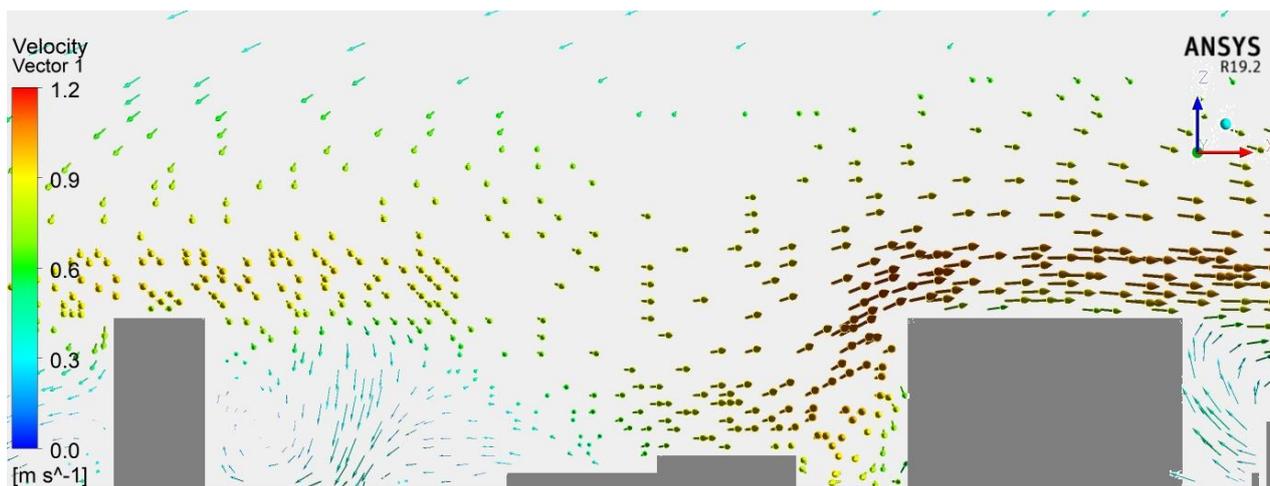


Figura 17 - Campo de velocidade do vento em um plano vertical passando sobre PT-03 indicado na Figura 19, para a configuração CFD-WRF.

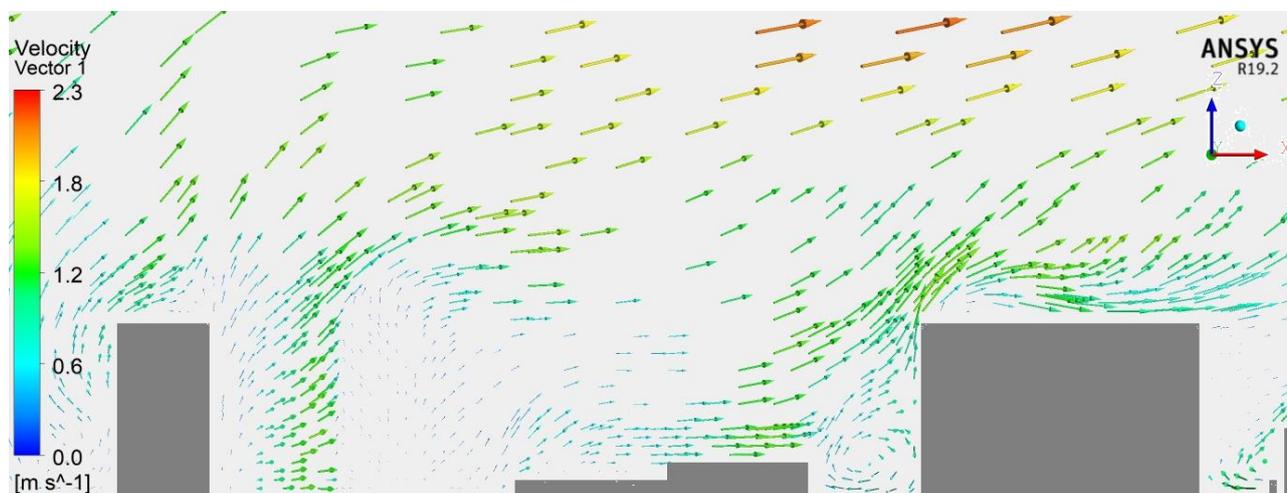


Figura 18 - Campo de velocidade do vento em um plano vertical passando sobre PT-03 indicado na Figura 19, para a configuração CFD-AERO.

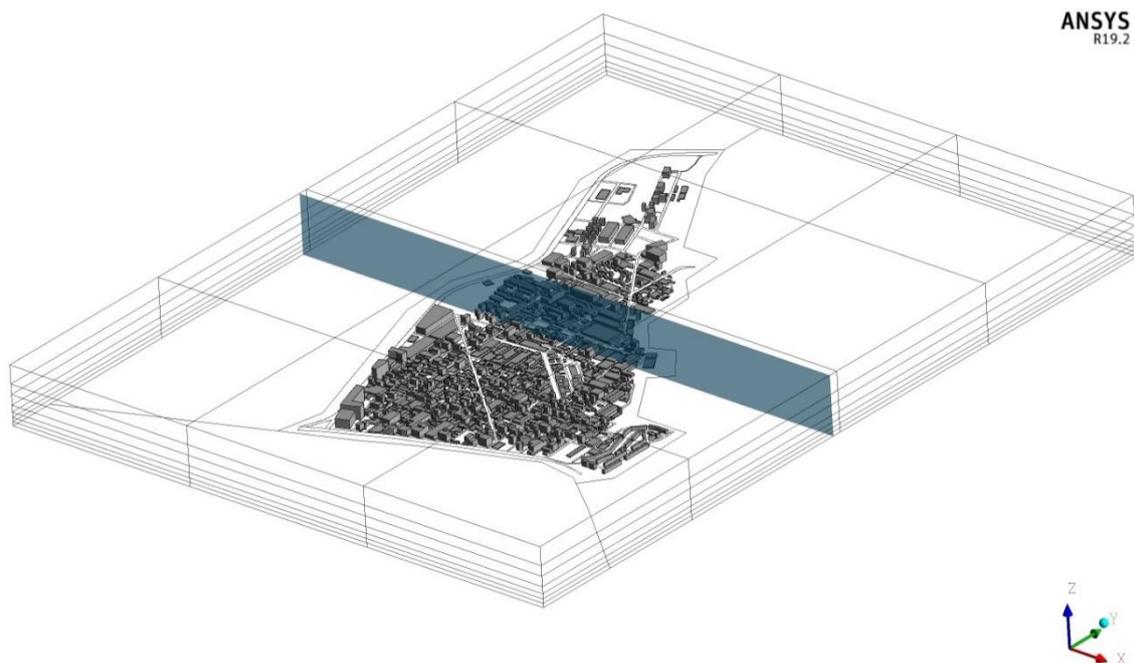


Figura 19 – Representação esquemática da localização do plano do plano vertical passando sobre PT-03, empregado para plotar o campo vertical de velocidades nas Figuras 4 e 5.

A Figura 20 e Figura 21 mostram a evolução temporal do campo de vento obtidos em intervalos de 12 horas para os dias 03/05/2018 e 04/05/2018, ou seja, 16h do dia 03/05/2018, 04h do dia 04/05/2018 e 16h do dia 04/05/2018, para as simulações CFD-WRF e CFD-AERO, respectivamente. Apesar das diferenças entre os resultados, em ambas configurações a influência das condições de contorno transientes nas entradas do domínio computacional, bem como o seu efeito local dentro da área do dossel urbano, mostra-se claramente representativa. No decorrer da evolução temporal, observa-se variações consideráveis tanto na intensidade da velocidade quanto na direção do vento para os dois casos. É interessante observar que algumas condições de direção e velocidade do vento incidente geram algumas regiões com velocidade do vento muito baixa no interior do domínio, que podem levar a situações de acúmulo de concentrações de poluente. Um exemplo desta situação é a praça localizada entre PT-01 e PT-02, onde o campo de vento da simulação CFD-AERO no dia 04/05/2018 04:00h mostra velocidades bem próximas de zero.

Apesar de ambas as configurações apresentarem padrões de escoamento bastante similares às características tridimensionais apresentadas na literatura científica para esta classe de problemas, pode-se observar que os campos de ventos obtidos para o mesmo intervalo de tempo são significativamente diferentes para os mesmos intervalos de tempo. Tal diferença é principalmente explicada pela discrepância entre a direção do vento medida no Aeroporto, que é usada para construir as condições de contorno na configuração CFD-AERO, e os resultados de WRF, que são

utilizados para construir as condições de contorno na configuração CFD-WRF. A Figura 22 mostra a diferença em módulo das velocidades e direções simuladas por WRF (S) e observadas (O) na estação meteorológica do Aeroporto, apresentando a diferença entre a direção do vento observada e a direção do vento simulada, Figura 22(a), e diferença entre a velocidade do vento observada e a velocidade do vento simulada, Figura 22(b). A diferença mostrada indica o menor ângulo formado entre os vetores velocidade predito e observado para aquele ponto e período específico. Em alguns casos, as diferenças de direção do vento chegam próximo a 180° , e apresentam grande oscilação ao longo da evolução temporal. Já entre as velocidades do vento oscilam em grande maioria entre 0,0 e 4,0 m/s, chegando ao pico máximo próximo a 10 m/s entre as 116 h e 137 h. Nota-se também que uma considerável parte dos dados apresentam diferenças de velocidade abaixo da faixa dos 2 m/s, e até menores em alguns pontos, o que indica uma melhor previsão desta variável.

Neste sentido, as séries de evolução temporal, para a velocidade e direção do vento, indicam que estas quantidades não são precisamente preditas pela modelagem de mesoescala WRF para o período em estudo, ficando evidente uma grande variabilidade nas séries e dados. Esta diferença é evidenciada principalmente para a direção do vento. É importante salientar que as diferenças entre os dados observados e simulados apresentados podem traduzir-se em maiores erros nos resultados do caso CFD-WRF.

Estas diferenças podem ser melhor analisadas na Seção 4.2, que compara os resultados de velocidade e direção do vento provenientes das modelagens e de medidas de campo, apresentando indicadores estatísticos para permitir a avaliação das previsões.

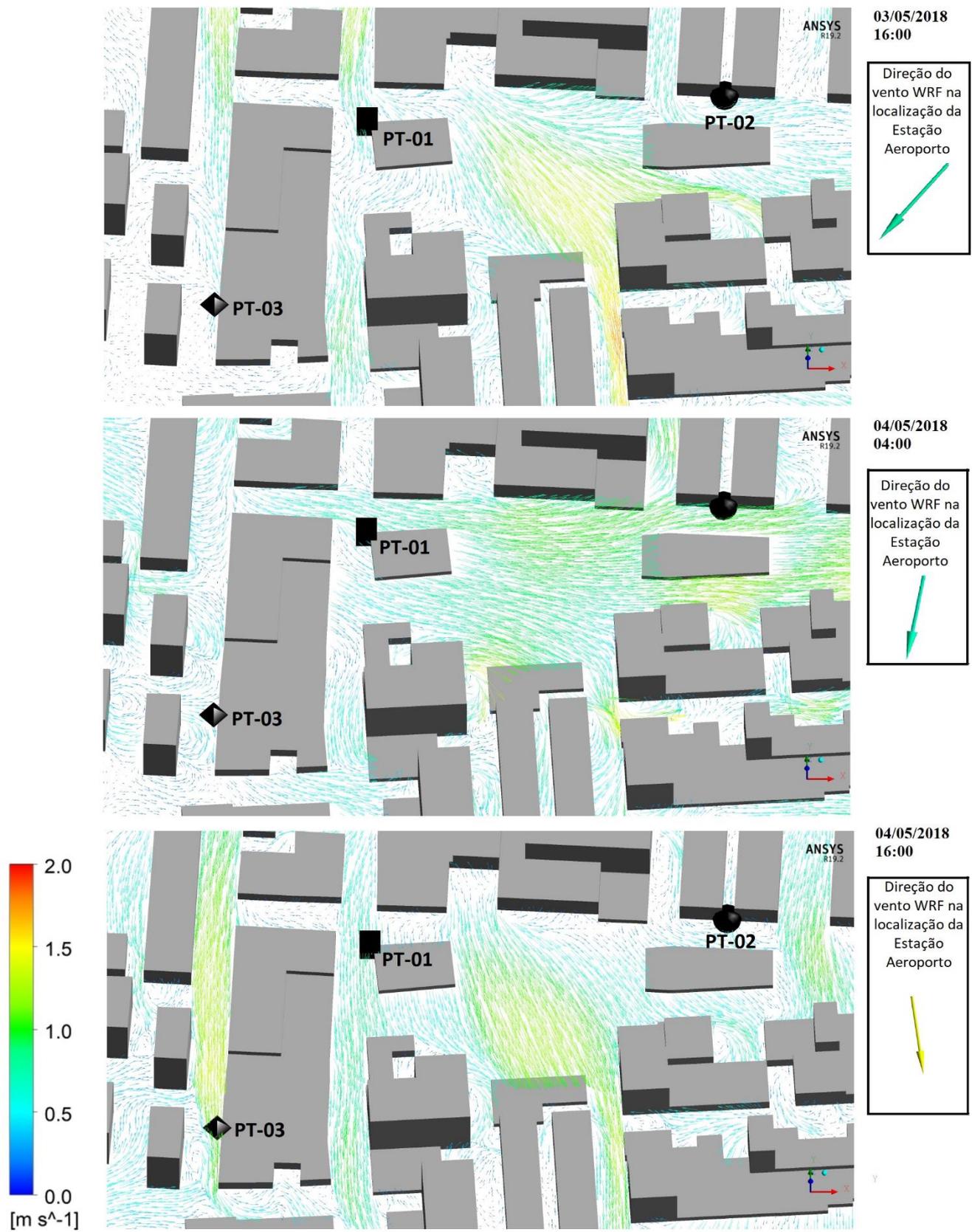


Figura 20 – Evolução do campo de vento simulado ao redor das estações meteorológicas para o caso CFD-WRF em intervalos de 12 horas a partir das 16h do dia 03/05/2018. O quadro ao lado indica a direção do vento na estação meteorológica do Aeroporto no mesmo instante de tempo.

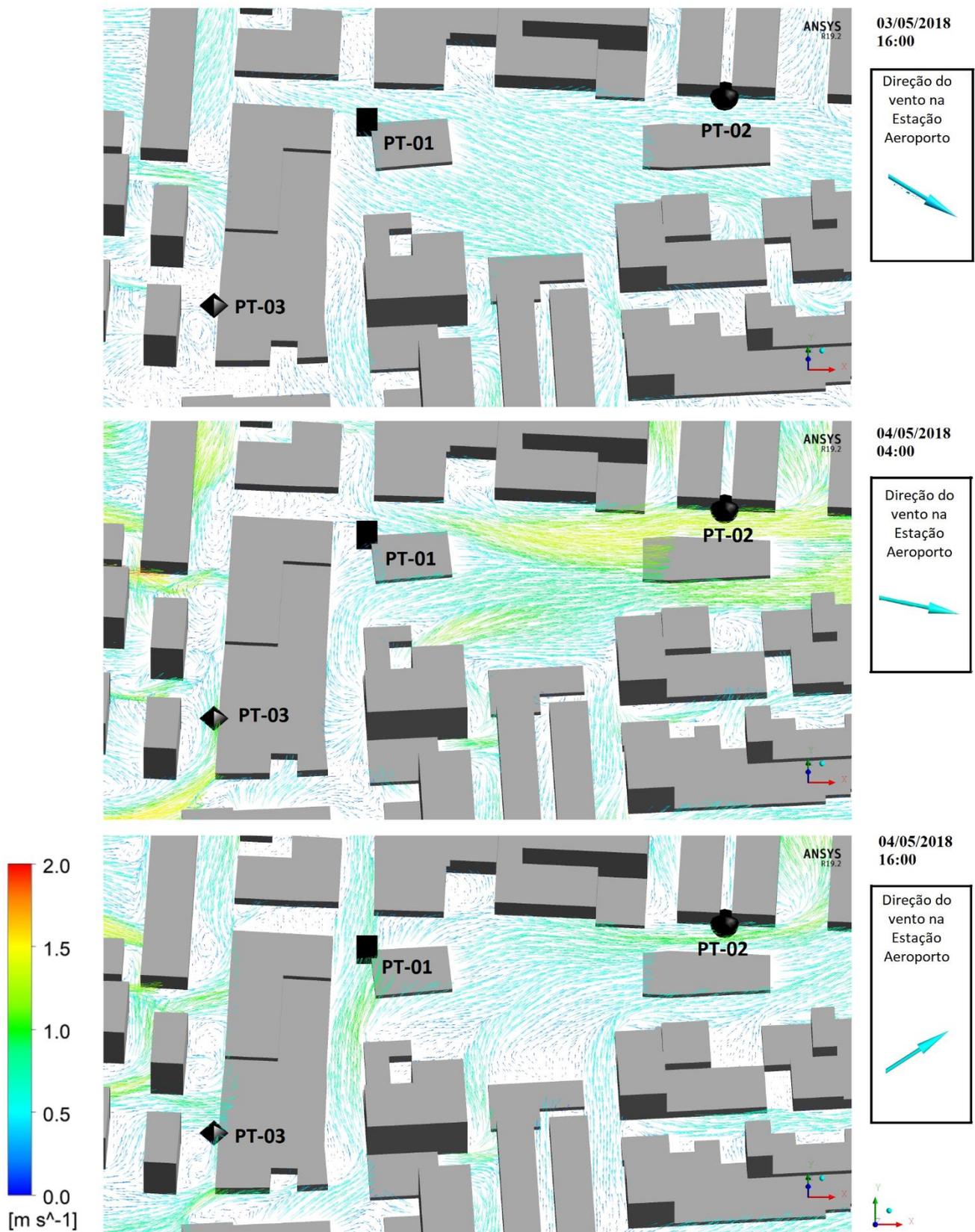


Figura 21 – Evolução do campo de vento simulado ao redor das estações meteorológicas para o caso CFD-AERO em intervalos de 12 horas a partir das 16h do dia 03/05/2018. O quadro ao lado indica a direção do vento na estação meteorológica do Aeroporto no mesmo instante de tempo.

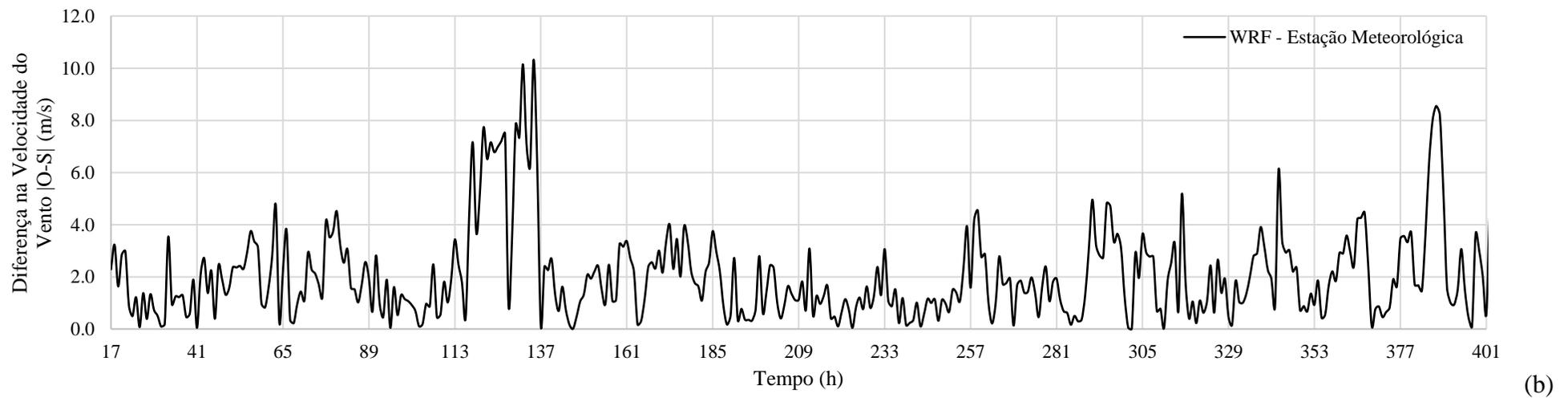
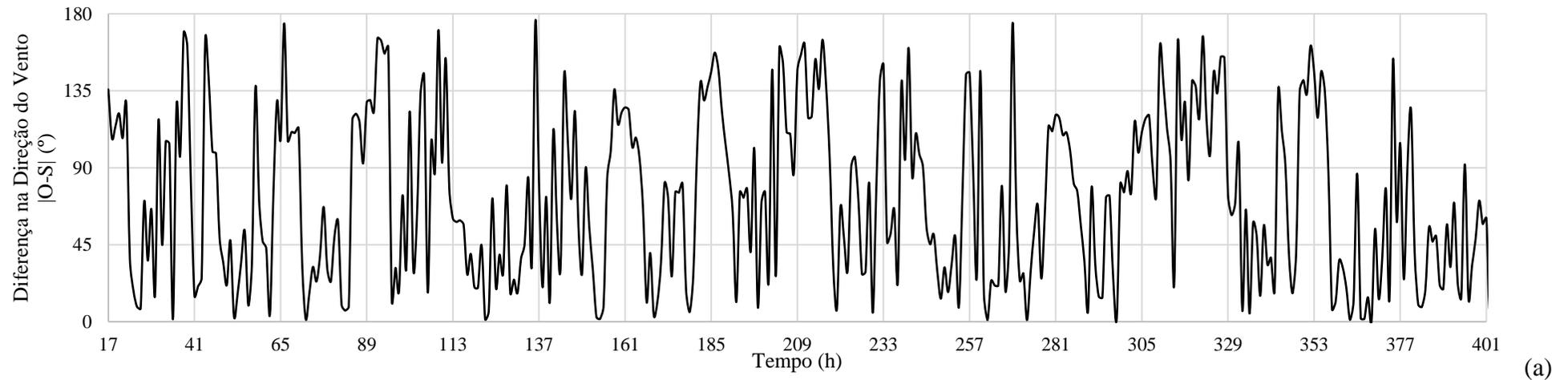


Figura 22 – Evolução temporal da diferença entre os valores observados pela estação meteorológica do aeroporto de Vitória (O) e os resultados preditos modelagem de mesoescala WRF (S): (a) Diferença entre as direções do vento ($^{\circ}$): menor ângulo formado entre os vetores velocidade; (b) Módulo das diferenças entre velocidade do vento (m/s).

4.2. Comparações com os dados observados pelas estações no interior do dossel urbano e as simulações CFD-WRF e CFD-AERO

As Figura 23 e 24 mostram respectivamente os resultados das séries temporais de direção e velocidade do vento para o caso CFD-WRF em comparação com as medições obtidas pelas estações meteorológicas nos pontos PT-01, PT-02 e PT-03, durante o período analisado.

Observando a evolução temporal dos resultados para a configuração CFD-WRF (Figura 23 e 24), fica clara a diferença entre os valores das estações de monitoramento e os resultados da simulação. Nos três pontos de monitoramento, as estações meteorológicas registram grande variabilidade principalmente na direção do vento. De uma forma geral, a modelagem CFD-WRF prediz um comportamento que pode ser considerado uniforme em alguns trechos da série temporal, com presença de alguns períodos em que a direção do vento permanece quase constante apresentando apenas poucas oscilações. Esse comportamento parece estar de acordo com os dados usados como condições de entrada (dados da modelagem WRF). Entretanto, os resultados das medições com as estações meteorológicas apresentam um comportamento com maior variabilidade e maiores oscilações nas direções do vento. Em alguns trechos da série de dados medidos no ponto PT-01, por exemplo, Figura 23a, é possível observar uma evolução temporal constante da direção do vento, mas na maioria dos casos em ângulos diferentes que os preditos pelo acoplamento CFD-WRF, como por exemplo nos trechos 46-57h, 72-81h, 168-178h, 238-275h. Mesmo com grandes diferenças entre observados e simulados, em alguns períodos os resultados da modelagem apresentam certa concordância com o medido em campo. Isto pode ser evidenciado por exemplo na Figura 23a nos períodos 39h-55h, 96h-110h, na Figura 23b nos períodos 40h-60h, 74h-83h, 144h-157h e na Figura 23c no período 33h-46h. Estes períodos coincidem com pontos em que o modelo WRF apresenta melhor acurácia na predição.

A comparação entre as velocidades do vento observadas em campo e simuladas por CFD-WRF são mostradas na Figura 2524. Entretanto, observa-se que as diferenças observadas são relativamente menores ao que aquelas encontradas para a direção do vento, com os resultados do modelo CFD-WRF conseguindo captar de maneira aproximada as tendências de variação da velocidade do evento, com algumas exceções bastante claras em alguns episódios. Por comparação direta, observa-se que os valores preditos são, de forma geral, maiores que os medidos pelas estações meteorológicas. Nos três pontos de monitoramento, os valores de magnitude de velocidade permanecem baixos em todo o período de monitoramento, com a maioria dos pontos oscilando entre 0 m/s e 1,5 m/s, e os valores preditos pela modelagem CFD-WRF chegam a uma faixa um pouco maior com a presença de alguns picos alcançando até 4 m/s em pontos específicos. Estes picos de velocidade, bem como a magnitude dos valores de velocidade ao longo da evolução

temporal, apesar de variarem dos valores medidos pelas estações meteorológicas dentro do bairro, acompanham a mesma tendência da série de dados do modelo WRF usadas como dados de entrada.

As Figura 25 e Figura 26 mostram respectivamente os resultados das séries temporais de direção e velocidade do vento para o caso CFD-AERO em comparação com as medições obtidas pelas estações meteorológicas. Em contraste com os resultados CFD-WRF, é possível observar que apesar de parte dos dados medidos não coincidirem exatamente com a curva de resultados simulados, entretanto há uma considerável similaridade no comportamento da evolução temporal da direção do vento para a configuração CFD-AERO. Além disso, nota-se que os resultados do modelo tendem a acompanhar melhor a tendência dos dados medidos para as 03 estações de monitoramento. Para os pontos de monitoramento PT-01 e PT-02 percebe-se uma maior concordância entre os valores de direção medida e simulada.

O ponto de monitoramento PT-02 está localizado entre edificações maiores (3 a 5 pavimentos), que de certa forma caracterizam um cânion urbano mais definido orientado aproximadamente na direção Leste-Oeste. Neste ponto, há uma grande concordância entre as direções do vento, principalmente em ângulos próximos a 90° e 270° (ventos lestes e oeste), aproximadamente paralelos a rua.

Em PT-03, Figura 25c, apesar de algumas regiões dos gráficos indicarem coincidência entre os valores, maiores diferenças são observadas nas direções observadas e simuladas. Estas discrepâncias podem estar relacionadas ao posicionamento do ponto PT-03, que se encontra em área com edificações de alturas variáveis e espaços vazios, não configurando um cânion bem definido. Isto traduz-se em um maior grau de liberdade possibilitando a maior variabilidade direcional. Lembrando que na modelagem CFD, toda área ocupada corresponde somente a edificações, não incluindo árvores, muros, placas, e outros elementos urbanos que podem influenciar o escoamento.

As velocidades previstas na configuração CFD-AERO apresentam considerável concordância entre os valores observados registrados na evolução temporal desta variável nos três pontos. É importante destacar que os três pontos da Figura 26 registram velocidades muito baixas em alguns períodos de medição (inferiores a 0,5 m/s e em alguns períodos), principalmente na estação de monitoramento no ponto PT-03. Sendo assim, a grande variabilidade dos valores de direção do vento medidos pode estar relacionada às baixas velocidades observadas. Este comportamento pode estar relacionado ao fato de que anemômetros do tipo *cup-and-vane*, como os utilizados neste estudo, não possui boa capacidade de detecção da direção do vento em baixas velocidades, podendo assim registrar valores que não condizem com a realidade. Esta hipótese pode ser comprovada através da observação das evoluções temporais em períodos de baixa ou nula velocidade, como por exemplo entre 71-83h, 95-107h e 119-131h na Figura 26c que neste caso particularmente

correspondem a períodos noturnos. Observando a direção do vento nesses períodos de velocidade baixa percebe-se variabilidade, com os dados medidos apresentando comportamento mais randômico. O mesmo pode ser observado em alguns períodos de baixa velocidade nos pontos de monitoramento PT-01 e PT-02.

É importante salientar que devido a disponibilidade de apenas uma estação meteorológica fixa como fonte de dados de entrada para o caso específico (CFD-AERO), os dados de entradas nos quatro lados do domínio computacional são os mesmos obtidos de um mesmo ponto. Na prática isto já atribui um certo erro nos resultados, uma vez que a chance de os valores reais serem exatamente os mesmos para os quatro lados do domínio é baixa. Levando em consideração este fato, em uma primeira análise as diferenças entre medido e simulado ainda podem ser consideradas aceitáveis uma vez que a tendência observada nas evoluções temporais é semelhante.

Comparando com o desempenho do caso CFD-AERO com o caso CFD-WRF, fica evidente que o uso de dados provenientes da estação meteorológica para alimentar o modelo CFD produz resultados muito mais satisfatórios, mesmo considerando o mesmo valor para os 4 lados do domínio. Este comportamento está provavelmente relacionado a melhor representação do escoamento incidente no bairro com o emprego dos dados oriundos da estação meteorológica fixa do Aeroporto de Vitória. De fato, o modelo WRF tanto para velocidade quanto para direção do vento indica consideráveis diferenças em relação aos dados medidos. Esta observação mostra que a acurácia da modelagem CFD para o dossel urbano é bastante sensível à qualidade dos dados de entrada. É interessante notar que quando condições de contorno mais realistas (CFD-AERO) são empregadas, o modelo de microescala baseado em CFD é capaz de representa de maneira bastante adequada a direção e velocidade do vento no interior do dossel urbano nos pontos de medição.

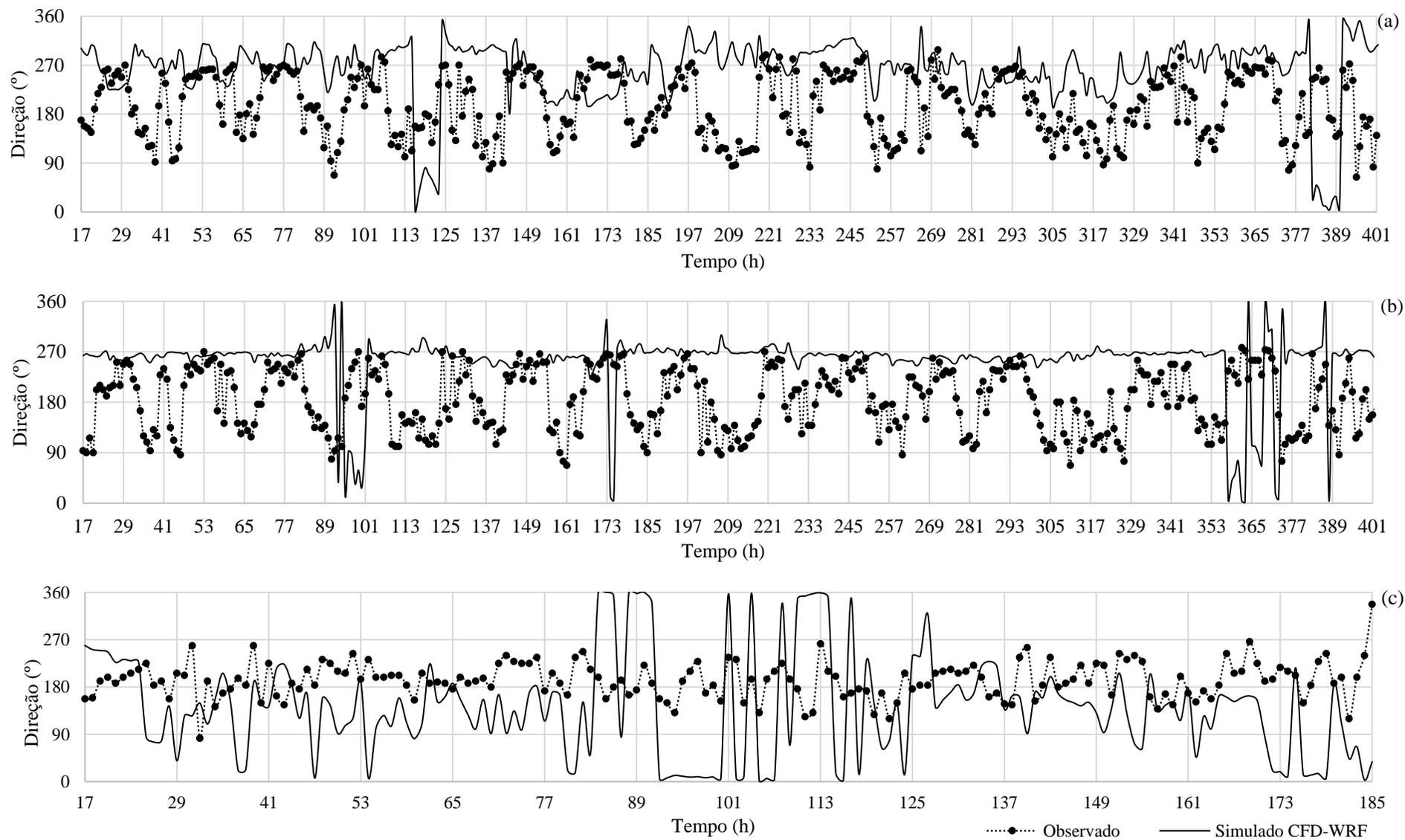


Figura 23 - Comparação entre a direção do vento (0° a 360°) observada nos pontos de monitoramento e os resultados preditos CFD-WRF: (a) Ponto PT-01, (b) Ponto PT-02 e (c) Ponto PT-03.

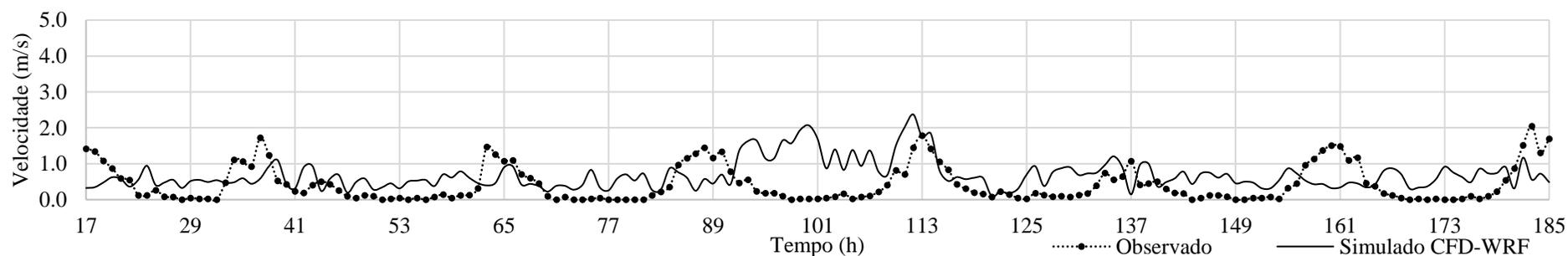
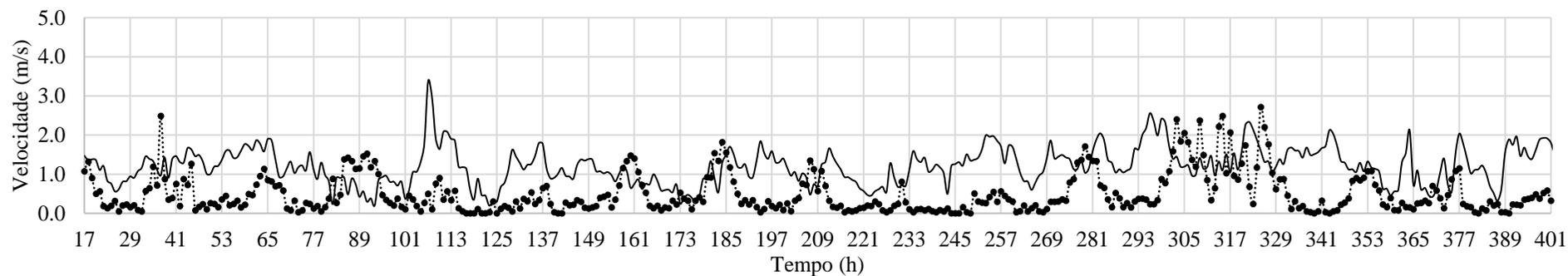
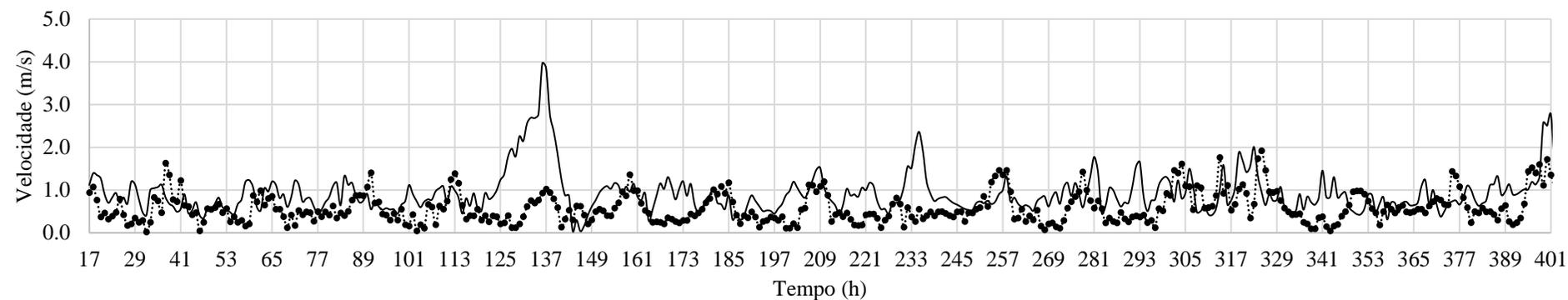


Figura 24 - Comparação entre a velocidade do vento observada nos pontos de monitoramento e os resultados preditos por CFD-WRF: (a) Ponto PT-01, (b) Ponto PT-02 e (c) Ponto PT-03.

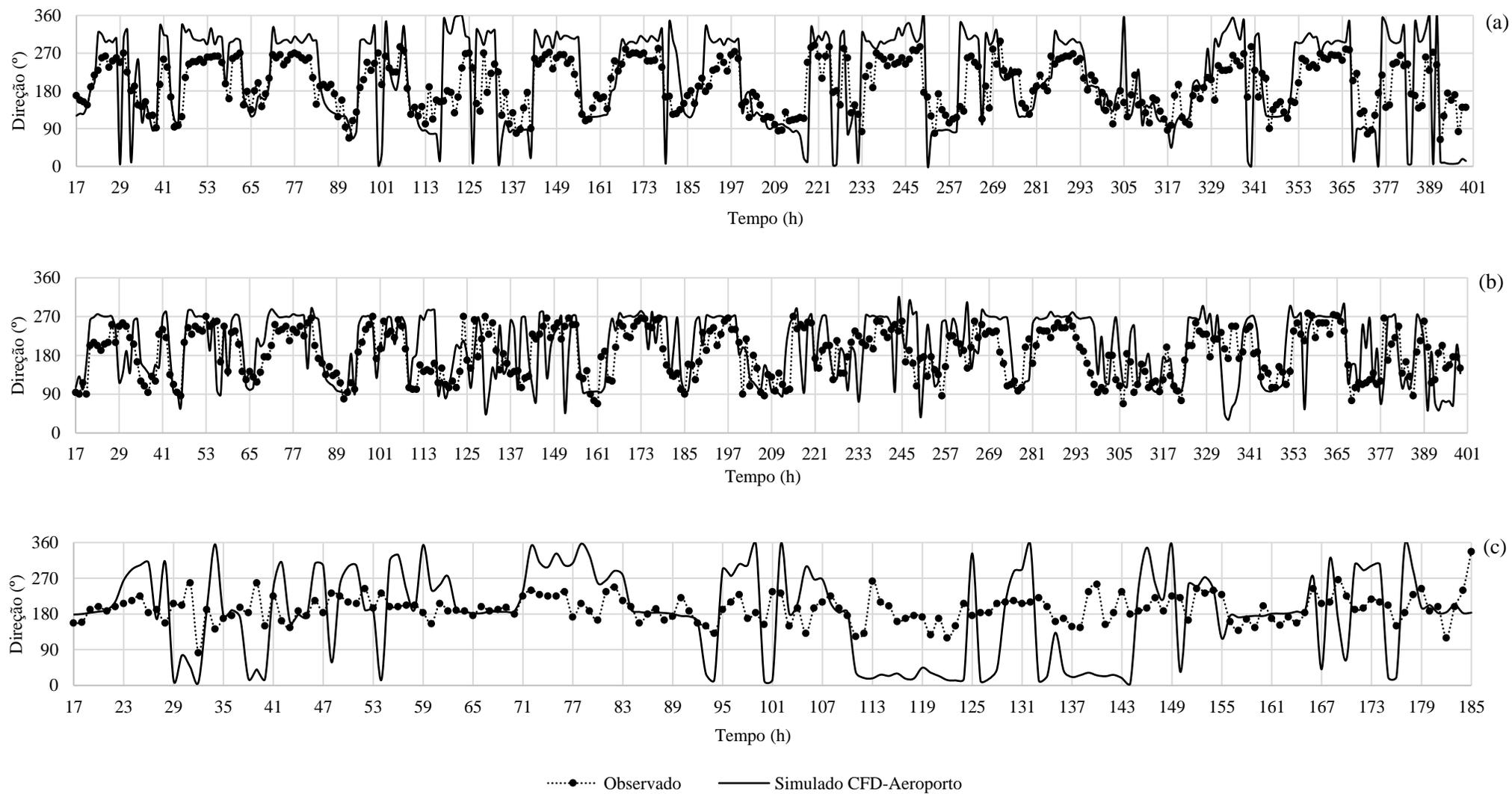


Figura 25 - Comparação entre a direção (0° a 360°) observada nos pontos de monitoramento e os resultados preditos por CFD-AERO: (a) Ponto PT-01, (b) Ponto PT-02 e (c) Ponto PT-03.

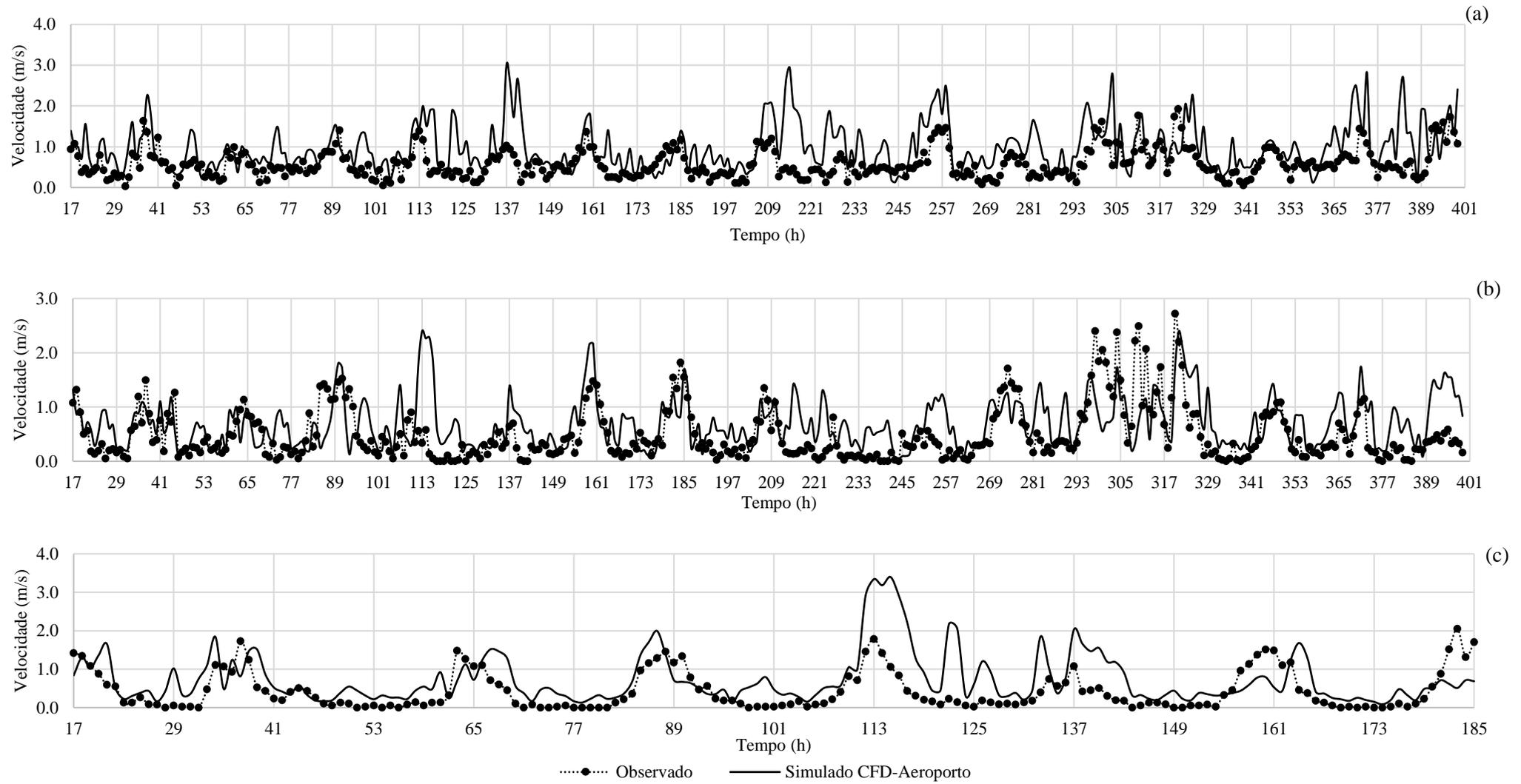


Figura 26 - Comparação entre a velocidade do vento observada nos pontos de monitoramento e os resultados preditos por CFD-AERO: (a) Ponto PT-01, (b) Ponto PT-02 e (c) Ponto PT-03.

As métricas erro quadrático médio normalizado (NMSE), desvio fracionário (FB), média geométrica (MG), variância geométrica (VG), tendência ou viés (MB) e erro quadrático médio (RMSE) são comumente utilizadas para a avaliação de variáveis meteorológicas (ZHANG et al, 2014). A Tabela 4 apresenta os critérios estatísticos de avaliação propostos por Emery *et al.*, (2001) e Hanna *et al.* (2004) para intervalos de aceitação aplicados à modelagem da velocidade e direção do vento (*benchmarks*). Estes limites são utilizados neste trabalho como critérios de referência para aceitação dessas métricas estatísticas. Não havendo *benchmarks* específicas para escomentos no interior de dosseis urbanos, os critérios mostrados aqui são baseados em valores diferentes considerando terrenos com relevo simples ou plano e terrenos com relevo complexo mais acidentado (EMERY *et al.*, 2001).

Tabela 4 - Critérios de aceitação utilizados para avaliação da precisão da modelagem (*benchmarks*).

Métrica	Velocidade	Direção	Critério
NMSE	< 4	< 4	(HANNA et al. 2004)
FB	-0.3 < FB < 0.3	-0.3 < FB < 0.3	(HANNA et al. 2004)
MG	0.7 < MG < 1.3	0.7 < MG < 1.3	(HANNA et al. 2004)
	<u>Terreno simples</u>	<u>Terreno complexo</u>	
MB	-0.5 < MB < 0.5	-1.5 < MB < 1.5	(EMERY <i>et al.</i> , 2001)
	< 2		(EMERY <i>et al.</i> , 2001)
RMSE		<2.5	(EMERY <i>et al.</i> , 2001)

Para os três pontos de monitoramento, os indicadores estatísticos foram calculados com dados em intervalos de 24h começando no dia 26/04/2018 as 17:00 até o dia 12/05/2018. Sendo assim, cada ponto mostrado nos gráficos das métricas estatísticas representam um intervalo de 24 horas. A Figura 27 mostra os resultados dos indicadores utilizadas como critérios de aceitação calculados para velocidade do vento do WRF, CFD-WRF e CFD-AERO. Os pontos dentro da área delimitada pelo retângulo obedecem os critérios de aceitação mostrados na Tabela 4, sendo o retângulo verde baseado no critério de Emmery et al. (2001) para relevo plano, retângulo laranja baseado no critério de Emmery et al. (2001) para relevo complexo e o retângulo cinza baseado no critério de Hanna et al. (2004).

A baixa precisão da predição do modelo WRF para velocidade e direção do vento também podem ser observadas nas métricas estatísticas para estas variáveis. As menores velocidades medidas nas estações meteorológicas traduzem-se em mais períodos com valores de MB e RMSE fora dos limites de aceitação do modelo. A dispersão contabilizada por NMSE também apresenta

valores fora dos limites, mas ainda existe um considerável número de pontos dentro dos intervalos de aceitação indicando que apesar de apresentarem erros, os valores ainda suficientemente próximos do ponto de vista da dispersão. As métricas indicadoras de tendência para avaliar a direção do vento também apresentam um considerável número de pontos fora dos limites de aceitação, mas alguns dentro da zona de aceitação. Isto indica que apesar da variabilidade observada na evolução temporal, considerando os intervalos de 24h as variações de direção seguem tendência similar em alguns períodos e erram em outros. De forma geral, as métricas e a evolução temporal das médias indicam baixa previsibilidade do modelo WRF, com períodos intercalados com resultados aceitáveis e não aceitáveis.

Para o caso CFD-WRF (Figura 27c e 27d), é observada uma melhora significativa nos indicadores estatísticos. É possível observar que para os indicadores MB e RMSE, os dados são considerados aceitáveis para o critério de terreno complexo, e grande parte dos intervalos também fica dentro da área verde que delimita o critério de aceitação para terreno simples. Mesmo com baixa qualidade dos dados do WRF, a metodologia de acoplamento com o modelo de microescala apresenta resultados com uma precisão significativamente melhorada para velocidade do vento dentro do dossel urbano. As métrica de dispersão estatística também apresenta melhora com apenas dois intervalos da estação PT-02 fora do retângulo de aceitação. Nas Figura 27e e 27f, para o caso CFD-AERO, é possível observar que os valores das métricas são ainda melhores com praticamente todos os pontos de MB, RMSE e NMSE considerados aceitáveis. Apesar de valores provenientes de apenas um ponto (estação meteorológica do Aeroporto) terem sido utilizados para esta modelagem, a maior qualidade dos dados de entrada acoplada ao modelo de microescala promove resultados consideravelmente melhores para velocidade do vento nos pontos de monitoramento.

Analogamente, para os indicadores estatísticos para a direção do vento o mesmo comportamento é observado. Os valores mais afastados dos critérios de aceitação são produzidos pelo modelo WRF, como mostradas nas Figura 28a 28b. A metodologia de acoplamento promove melhora tanto com a utilização do acoplamento CFD-WRF quanto do CFD-AERO. De forma geral, a modelagem fornece resultados de direção do vento com menor acurácia comparado aos obtidos para velocidade, mas ainda é possível observar a melhora significativa dos valores preditos utilizando os modelos acoplados, principalmente para o caso CFD-AERO, onde foram utilizados dados de entrada de melhor qualidade. O maior ganho é observado nas métricas indicadoras de dispersão e tendência (NMSE e FB) que mostram valores mais próximos e dentro dos limites do critério aceitação para os casos CFD-WRF e CFD-AERO. Sendo assim, apesar das variabilidades observadas, os indicadores estatísticos apresentam valores aceitáveis para os resultados dos modelos acoplados.

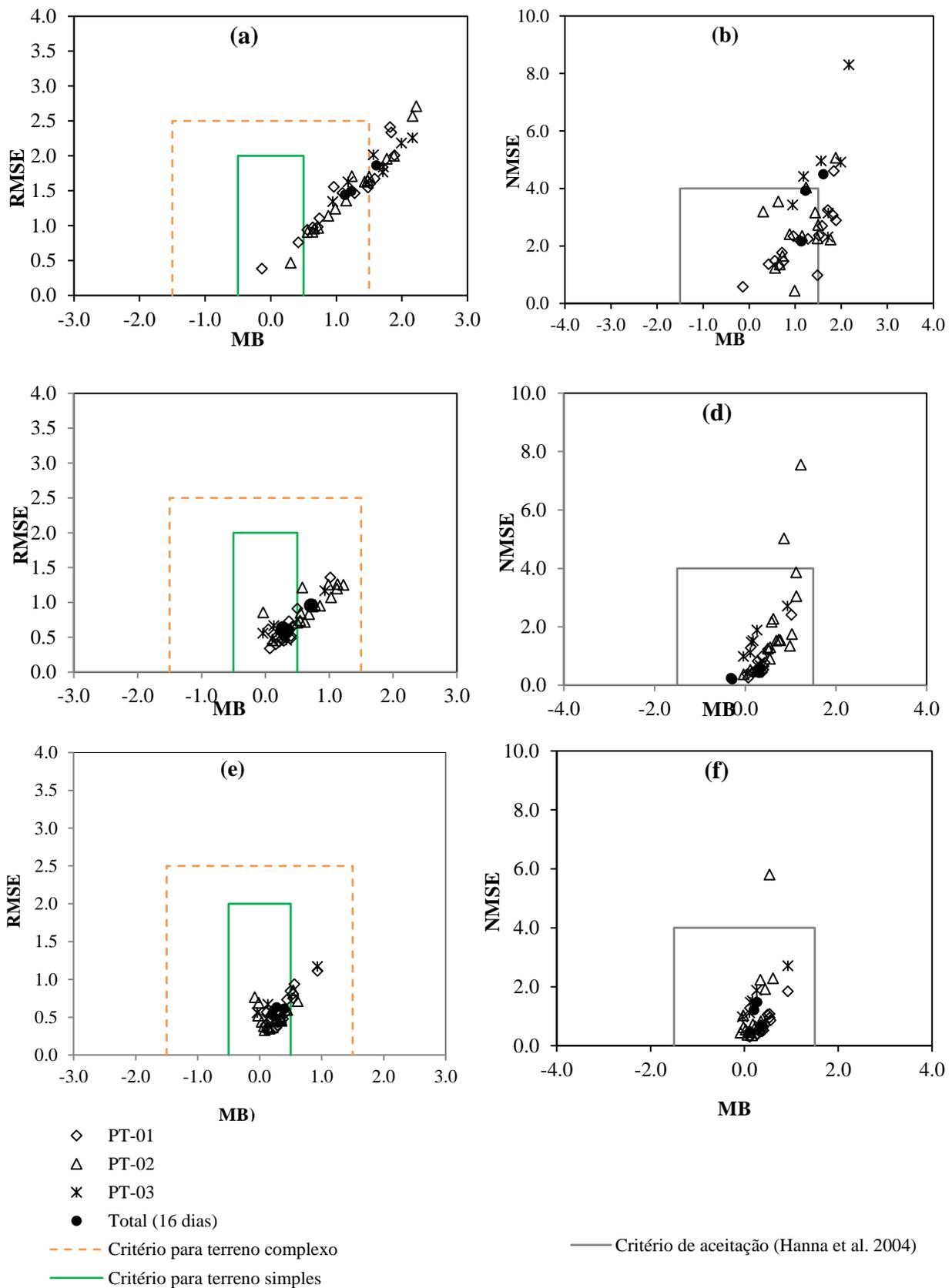


Figura 27 - Métricas estatísticas para a velocidade do vento com dados horários, com cada ponto representado um intervalo de 24 horas. A região delimitada pelo retângulo indica o intervalo de aceitação. (a) e (b) WRF, (c) e (d) CFD-WRF e (e) e (f) CFD-AERO.

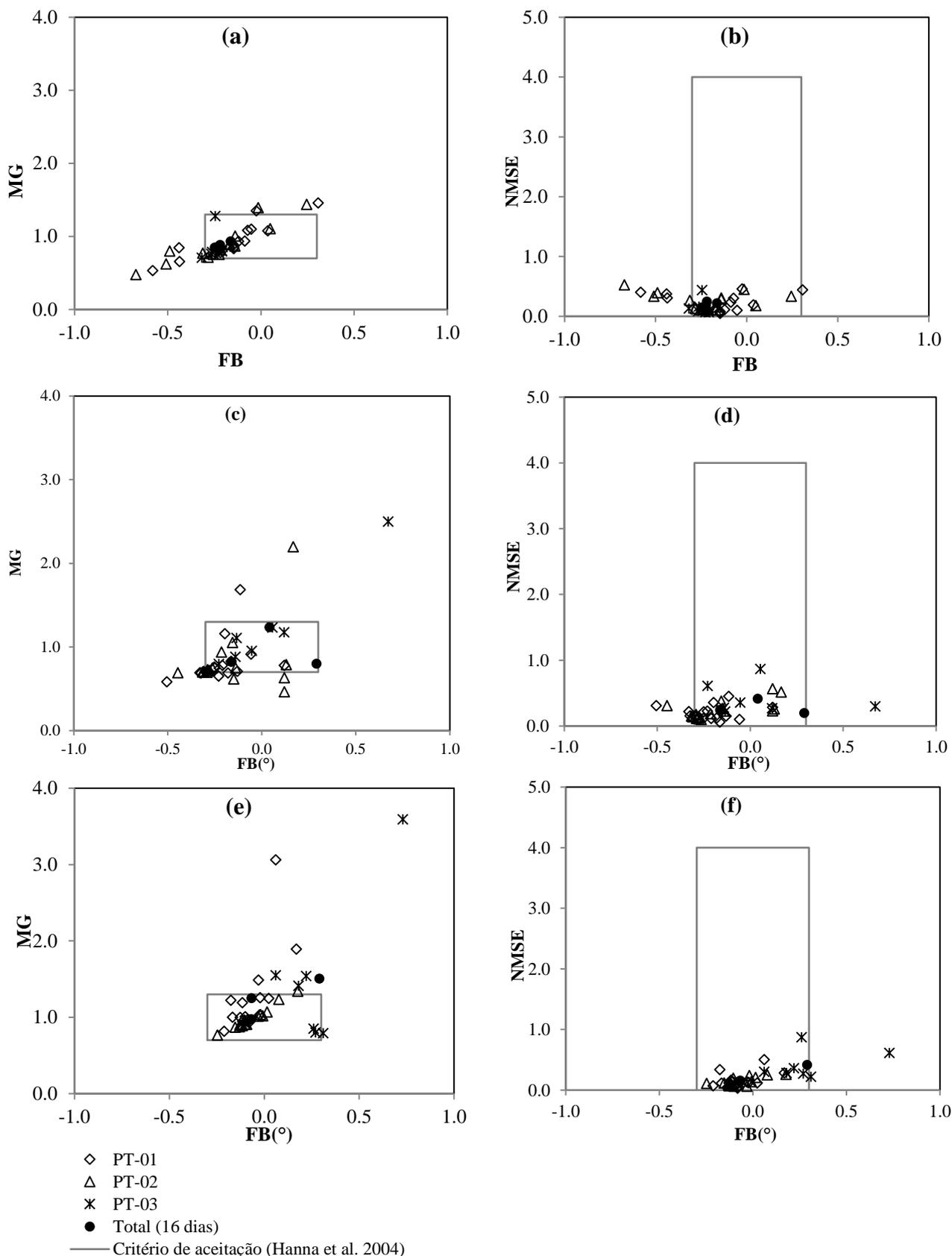


Figura 28 - Métricas estatísticas para a direção do vento com dados horários, com cada ponto representado um intervalo de 24 horas. A região delimitada pelo retângulo indica o intervalo de aceitação. (a) e (b) WRF, (c) e (d) CFD-WRF e (e) e (f) CFD-AERO.

A métrica MB indicadora de acurácia e NMSE indicadora de dispersão dos dados são mostrados nas Tabelas 5 e 6 para direção e velocidade do vento respectivamente. Os valores foram calculados referentes ao período total de medição, entre 26 de abril de 2018 até 12 de maio de 2018, para PT-01 e PT-02 e 9 dias para PT-03. Os valores do erro (MB) para direção do vento apresentam-se todos fora dos limites de aceitação ($-20^{\circ} < MB < 20^{\circ}$) para os três casos. No entanto, fica clara a redução do erro nos casos CFD-WRF e principalmente no CFD-AERO, comparando com o resultado do WRF. O NMSE e o coeficiente de determinação r^2 para as distribuições estatísticas, também indicam melhora para os casos CFD-WRF e CFD-AERO. Para a velocidade do vento mostrada na Tabela 6, a melhora nas métricas é mais significativa. O desvio médio MB reduz significativamente dos resultados do WRF para os casos CFD-WRF e CFD-AERO, as séries temporais para velocidade do vento acompanham a tendência dos dados medidos, reduzindo a dispersão entre os dados NMSE. Isto também reflete nas distribuições dos dados, de forma que os valores de r^2 também são mais próximos de 1 para estes casos.

Os resultados do WRF para o período estudado não fornecem dados com qualidade elevada para a modelagem de microescala. Este modelo tende a acertar melhor nas médias das variáveis no período, e fornece dados horários com baixa precisão. Mesmo com esta característica, a modelagem CFD de microescala utilizando dados do WRF promove uma melhora significativa nos resultados, principalmente para a variável velocidade do vento. Com dados de entrada de melhor qualidade, como no caso CFD-AERO, a modelagem CFD consegue capturar melhor as mudanças de velocidade e direção do vento, trazendo resultados mais precisos. Esta característica indica que a metodologia é robusta, mas muito sensível à precisão das condições de contorno, trazendo resultados melhores para condições de maior qualidade dos dados de entrada.

Tabela 5 - Comparação entre métricas estatística para as modelagens WRF, CFD-WRF e CFD-AERO para direção do vento nos três pontos de monitoramento considerando o período total de medição.

Métrica para Direção do vento	Caso	PT-01	PT-02	PT-03
MB	WRF	-48.88	53.53	54.56
	CFD-WRF	-55.70	48.34	-49.43
	CFD-AERO	15.46	14.40	-10.65
NMSE	WRF	0.22	0.25	0.15
	CFD-WRF	0.20	0.25	0.42
	CFD-AERO	0.15	0.14	0.29
r^2	WRF	0.780	0.780	0.700
	CFD-WRF	0.873	0.880	0.860
	CFD-AERO	0.970	0.972	0.890

Tabela 6 – Comparação entre métricas estatística para as modelagens WRF, CFD-WRF e CFD-AERO para **velocidade** do vento nos três pontos de monitoramento considerando o período total de medição.

Métrica para Velocidade do vento	Caso	PT-01	PT-03	PT-03
MB	WRF	1.1	1.2	1.6
	CFD-WRF	0.3	0.7	0.3
	CFD-AERO	0.4	0.2	0.3
NMSE	WRF	2.2	3.9	4.5
	CFD-WRF	0.7	2.2	1.5
	CFD-AERO	0.7	1.2	1.2
r ²	WRF	0.897	0.895	0.776
	CFD-WRF	0.93	0.91	0.89
	CFD-AERO	1.00	0.97	0.93

A Figura 29 mostra os gráficos Quantil-Quantil normalizadas comparando as distribuições de probabilidade de normalizadas para valores medidos nos pontos de monitoramento e simulados por WRF, CFD-WRF e CFD-AERO. A normalização é feita tanto para valores medidos quanto simulados utilizando a expressão $Z = (\phi - \bar{\phi})/\sigma_s$, onde σ_s = desvio padrão amostral. Este gráfico é útil para verificar a adequação da distribuição de frequência dos dados medidos e dos resultados dos modelos. Sendo assim, no caso de distribuições idênticas todos os pontos dos gráficos estariam dispostos exatamente sobre a linha de referência de 45°, ou seja, quanto mais próximo desta referência, mais semelhantes são as distribuições de frequência dos dois conjuntos de dados.

Comparando os dados de velocidade e direção do vento simulados por WRF com as medições observa-se uma forte oscilação dos pontos ao longo da linha de referência de 45°. É possível observar que os pontos formam curvas com concavidade negativa cruzando a linha de referência, o que indica que os valores se acumulam mais em um lado da distribuição do que em outro, além de apresentarem uma dispersão relativamente alta, como foi observado anteriormente nas séries temporais e indicadores estatísticos.

Para os resultados CFD-WRF, observa-se maior oscilação dos pontos ao longo da linha de referência de 45° para a variável direção do vento nos três pontos de monitoramento principalmente nas estações PT-02 e PT-03. No entanto, é evidente que o uso dos dados do WRF acoplados com modelo de microescala baseado em CFD produz distribuições mais semelhantes aos dados medidos comparado ao resultado do modelo WRF sozinho. O mesmo ocorre para a velocidade do vento calculada por CFD-WRF, de forma que mesmo com a considerável variabilidade, as distribuições são melhores comparadas com o resultado anterior. No ponto PT-02, os dados de velocidade apresentam maior semelhança entre as distribuições. Esta maior acurácia pode estar relacionada a características deste ponto, sendo localizado entre edificações maiores, configurando um cânion

urbano com prédios relativamente altos nos dois lados da rua, o que de certa forma canaliza o escoamento neste ponto.

A Figura 29c mostram os gráficos Quantil-Quantil para a configuração CFD-AERO CFD-AERO. Para a direção do vento, a distribuição dos dados nos pontos de monitoramento PT-01 e PT-02, mostram um bom acompanhamento da linha de referência de 45°. Isto indica que a distribuição estatística dos dados preditos pelo modelo é semelhante à distribuição dos dados observados em campo. Em partes do gráfico, é possível observar certa não linearidade dos pontos, o que sugere maior diferença entre as distribuições dos dados e maior variabilidade entre as amostras, principalmente para o ponto PT-03, mas no geral as duas séries apresentam distribuições muito semelhantes. Para os dados de velocidade do vento observados e simulados, observa-se uma maior concordância dos dados com a linha de referência de 45° nos três pontos de monitoramento. O ponto PT-02 apresenta maior concordância, seguindo a mesma tendência da linha de 45° e em alguns pontos coincidindo exatamente sobre esta linha, tanto para velocidade como direção do vento. De maneira geral, é evidente a melhora nos resultados utilizando a metodologia de acoplamento tanto CFD-WRF quanto CFD-AERO.

Devido a maior qualidade dos dados de entrada, a simulação com configuração CFD-AERO mostra resultados com distribuições de frequência bastante similares aos dados experimentais, principalmente para a velocidade do vento. A maior semelhança entre as distribuições de probabilidade desta variável certamente também está associada a menor magnitude da diferença entre as velocidades medidas e simuladas. Mesmo com baixa precisão dos dados de entrada, observa-se um avanço significativo na precisão dos resultados simulados por CFD-WRF comparando com os dados somente do modelo de mesoescala. Isto demonstra a capacidade promissora da metodologia de acoplamento de dados de mesoescala em modelagem CFD de microescala para predição do campo de vento dentro do dossel urbano. No entanto, a qualidade dos resultados é fortemente dependente da qualidade dos dados de entrada.

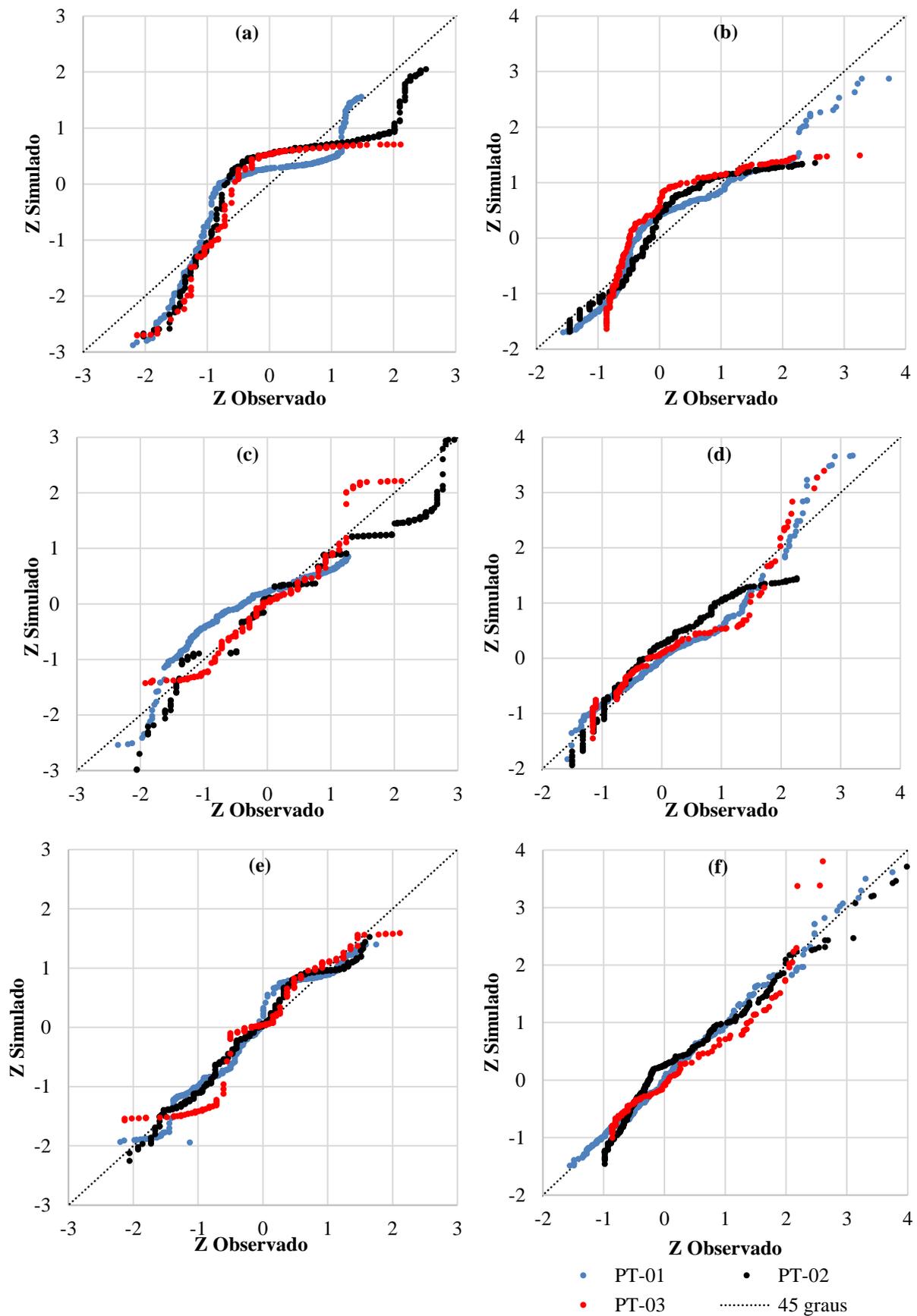


Figura 29 - Gráfico Quantil-Quantil para direção e velocidade do vento observada em campo e simulada por CFD-AERO nos três pontos de monitoramento, com $Z = (\phi - \bar{\phi})/\sigma_s$, (σ_s = desvio padrão amostral). (a) Direção WRF, (b) Velocidade WRF, (c) Direção CFD-WRF, (d) Velocidade CFD-WRF, (e) Direção CFD-AERO, (f) Velocidade CFD-AERO.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Foi evidenciada a viabilidade da aplicação de CFD associado ao acoplamento de dados meteorológicos provenientes do modelo de mesoescala WRF e de estação de medição de campo para o estudo do escoamento de ar dentro de um dossel urbano em escala real. A campanha de medição em com estações meteorológicas portáteis para determinação de velocidade e direção do vento dentro do dossel urbano possibilita a avaliação da acurácia da modelagem. As métricas estatísticas são usadas para comparação das séries temporais de dados da modelagem com os dados medidos em campo.

De forma geral, por meio da análise dos resultados é possível concluir que a avaliação dos resultados provenientes da metodologia de acoplamento e da campanha de medição em campo demonstram robustez da modelagem CFD do campo de vento dentro da área urbana em estudo. Apesar de certa variabilidade dos resultados, no geral as tendências das evoluções temporais da velocidade e direção do vento são semelhantes para os casos com acoplamento de dados na modelagem de microescala.

Pela comparação direta dos dados e análise de parâmetros estatísticos, a variável velocidade do vento é melhor predita pela modelagem, tanto para o caso de acoplamento CFD-AERO quanto para CFD-WRF. Por outro lado, a variável direção do vento apresenta maior variabilidade, principalmente em períodos onde observa-se maiores diferenças entre as velocidades medidas e os resultados das simulações de WRF nas proximidades da região estudada.

Com a avaliação dos resultados por meio de métricas estatísticas foi possível confirmar o observado nas comparações direta dos gráficos de evolução temporal. Para o caso CFD-AERO as métricas apresentaram valores dentro dos limites dos critérios de aceitação utilizados, indicando boa concordância com os dados experimentais. Além disso, os gráficos Quantil-Quantil para esses casos mostraram semelhante distribuição estatística dos dados.

Avaliando as séries temporais e as métricas estatísticas, fica evidente a considerável melhora dos resultados preditos por CFD-WRF comparando com resultados do modelo WRF para as coordenadas dos pontos de monitoramento dentro do bairro. A modelagem de microescala tende a prever melhor o comportamento do escoamento considerando a complexidade da área urbana, que não é considerada pelo modelo WRF. A qualidade dos dados do WRF mostra-se como um limitador para a modelagem CFD-WRF, com resultados sensíveis aos dados de entrada.

Os dados provenientes do modelo de WRF apresentam erros de predição consideráveis comparados com dados reais da estação meteorológica fixa do Aeroporto. Para o caso do acoplamento CFD-WRF, a baixa qualidade dos dados do WRF retorna uma pior correlação entre os resultados da modelagem comparando com dados medidos em campo. De forma geral, os

resultados das simulações são sensíveis à qualidade dos dados de entrada, e isso foi confirmado pela observação de pontos de menor erro em períodos de melhor qualidade dos dados do WRF.

Mesmo com certa variabilidade para o caso do acoplamento WRF-CFD, os gráficos Quantil-Quantil demonstram boa concordância entre as distribuições de probabilidade da variável velocidade (simulada e medida). Para esta quantidade, a magnitude dos dados simulados, é semelhante aos medidos em campo, com a evolução temporal permanecendo entre 1 a 4 m/s na maior parte do período analisado. Além disso, o formato da série temporal dos resultados de velocidade simulada é bastante semelhante ao formato das séries de dados de entrada.

O estudo em microescala de uma área urbana em escala real utilizando condições de contorno transiente demonstra ser viável. No entanto, a modelagem de áreas urbanas maiores pode ser limitada pela viabilidade dos recursos computacionais disponíveis, uma vez que o número de elementos da malha computacional para geometrias reais costuma ser muito grande, requerendo maior poder de processamento.

A aplicação de condição de contorno transiente para inclusão da dinâmica atmosférica em estudo de microescala é também verificada com o desenvolvimento desta pesquisa. Esta técnica se mostrou de grande importância e potencial aplicabilidade para estudos de fluidodinâmica do escoamento do ar, bem como estudos de dispersão de poluentes em ambientes urbanos. A utilização de *User Defined Function* para acoplamento de dados meteorológicos ao modelo CFD de microescala, apresentou performance satisfatória refletindo na robustez da modelagem para obtenção de resultados de velocidade e direção do vento dentro do dossel urbano. Esta mesma técnica tem grande potencial para aplicação em estudos de dispersão de poluentes, considerando o efeito transiente de fontes e a dinâmica atmosférica.

Conclui-se por meio desta pesquisa, a viabilidade da utilização do acoplamento de dados meteorológicos de modelagem de mesoescala e dados de estações de medição para estudos do campo de vento em microescala por meio de CFD. Contudo, a qualidade dos resultados da metodologia de acoplamento é fortemente dependente da qualidade dos dados provenientes do monitoramento ou da modelagem de mesoescala. A utilização de acoplamento de dados de modelos de mesoescala em modelagem CFD de microescala é importante principalmente em áreas onde não há disponível estações de medição meteorológica. Neste sentido, fica disponível a possibilidade de utilização de modelos como o WRF para geração de dados de entrada para estudos do escoamento do ar em maiores detalhes dentro do dossel urbano por meio de CFD. Este tipo de abordagem é importante para aplicação em estudos de dispersão de poluentes em áreas urbanas, possibilitando levar em consideração a dinâmica transiente da atmosfera, além de viabilizar esse tipo de estudo mesmo onde não dispõe-se de estações de medição meteorológica.

Como recomendação para trabalhos futuros, propõe-se:

- Aprofundamento dos estudos das parametrizações e entradas de dados do modelo WRF empregado para a região, de maneira a tentar obter resultados mais precisos, reduzindo a diferença entre os dados simulados e os dados de medição.
- Otimização da técnica de acoplamento por meio investigação do tratamento de turbulência mais apropriado para condições de contorno transite.
- Avaliação do efeito de diferentes condições de estabilidade atmosférica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, K.; M. KHARE; K. K. CHAUDHRY. Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections—a review. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 93, no. 9: 697-717, 2005.

Air pollution. Retrieved from: <<https://www.who.int/airpollution/en/>>. 25 de Fevereiro de 2019.

ALLWINE, K. J. *et al.*, Overview of URBAN 2000: A multiscale field study of dispersion through an urban environment. **Bulletin of the American Meteorological Society** 83, no. 4: 521-536, 2002.

ALLWINE, K. J.; FLAHERTY, J. E. Urban dispersion program overview and MID05 field study summary. **Pacific Northwest National Laboratory** (PNNL), Richland, WA (US), 2007.

ANSYS, Inc. ANSYS Fluent Theory Guide. v. 15317, n. November, p. 724–746, 2013.

ANTONIOU, N. *et al.*. CFD and wind tunnel analysis of outdoor ventilation in a real compact heterogeneous urban area: Evaluation using “air delay. **Building and Environment**, v. 126, p. 355-372, 2017.

AYLAS, G. Y. R. **Análise da Influência da Especificação do uso e ocupação do solo e do uso da Técnica de Assimilação de Dados Meteorológicos na Performance do Modelo WRF**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental-UFES, 2017.

BALOGH, M.; PARENTE, A. Realistic boundary conditions for the simulation of atmospheric boundary layer flows using an improved k- ϵ model. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, n. 144, p. 183-190. 2015.

BEELLEN, *et al.*,. Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicenter ESCAPE project. **The Lancet** 383, no. 9919: 785-795, 2014.

BEEVERS, S. D., KITWIROON, N., WILLIAMS, M. L., & CARSLAW, D. C.. One way coupling of CMAQ and a road source dispersion model for fine scale air pollution predictions. *Atmospheric environment*, 59, 47-58, 2012.

BERCHET, ANTOINE *et al.*. A cost-effective method for simulating city-wide air flow and pollutant dispersion at building resolving scale. *Atmospheric Environment*, v. 158, p. 181–196, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.030>>.

BLOCKEN, B; TOMINAGA, Y; STATHOPOULOS, T. CFD simulation of micro-scale pollutant dispersion in the built environment. **Building and Environment**, v64, p225-230, 2013

BRITTER, R. E.; HANNA, S. R. Flow and dispersion in urban areas. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 35, n. 1, p. 469-496, 2003.

CABLE, M. **An evaluation of turbulence models for the numerical study of forced and natural convective flow in Atria**. Dissertação de mestrado em engenharia mecânica, Queen's University Kingston, Ontario, Canadá, maio, 2009.

CARPENTIERI, M, HAYDEN, P, ROBINS, A G. Wind tunnel measurements of pollutant turbulent fluxes in urban intersections. **Atmospheric Environment**, v46, p669-674, 2012.

CARPENTIERI, M; HAYDEN, P; ROBINS. Influence of urban morphology on airflow over building arrays. **J Wind Eng Ind Aerodyn**, v145, p61-74, 2015.

CASTRO, I. P. *et al.*, Measurements and computations of flow in an urban street system. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 162, n. 2, p. 207-230, 2017.

CHANG, C.; MERONEY, R. N. Concentration and flow distributions in urban street canyons: wind tunnel and computational data. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 91, n. 9, p. 1141-1154, 2003.

COCEAL, O. *et al.*. Mean flow and turbulence statistics over groups of urban-like cubical obstacles. **Boundary-Layer Meteorology** 121:491–519, 2006.

COCEAL, O, GOULART, E V., BRANDFOD, S, THOMAS, T. G. **Flow structure and near-field dispersion in arrays of building-like obstacles**. **J. Wind Eng Ind Aerod**, v125, p52-68, 2014.

Coirier, William J., Sura Kim, Fei Chen, and M. Tuwari. "Evaluation of urban scale contaminant transport and dispersion modeling using loosely coupled CFD and mesoscale models." In 6th symposium on the urban environment. **American Meteorological Society**, Atlanta, GA. 2006.

COSTA, I. B. **Avaliação de desempenho do modelo de turbulência k-w sst para dispersão de poluentes ao redor de obstáculos em diferentes condições de estabilidade atmosférica**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, UFES. 2016.

CUI, P.; LI, Z.; TAO, W. Wind-tunnel measurements for thermal effects on the airflow and pollutant dispersion through different scale urban areas. **Building and Environment**, v. 97, p. 137-151, 2016.

EHRHARD, J., I. A. KHATIB, C. WINKLER, R. KUNZ, N. MOUSSIOPOULOS, G. ERNST. "The microscale model MIMO: development and assessment." **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics** 85, no. 2: 163-176., 2000.

ELIASSON, I. *et al.*. Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 1, p. 1-16, 2006.

Emery C, Tai E, Yarwood G. Enhanced meteorological modeling and performance evaluation for two Texas episodes. In: Corp International, editor. **Report to the Texas Natural Resources Conservation Commission**, p.b.E; 2001.

GROSZ, B. *et al.*, Use of WRF result as meteorological input to DNDC model for greenhouse gas flux simulation. **Atmospheric Environment**, v. 122, p. 230-235, 2015.

GOULART, E. V., REIS JR, N. C., LAVOR, V. F., CASTRO, I. P., SANTOS, J. M., & XIE, Z. T. (2019). Local and non-local effects of building arrangements on pollutant fluxes within the urban canopy. **Building and Environment**, 147, 23-34.

GOUSSEAU, P., BLOCKEN, B., STATHOPOULOS, T., & VAN HEIJST, G. J. F.. CFD simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: a case study by LES and RANS for a building group in downtown Montreal. **Atmospheric Environment**, 45(2), 428-438, 2011.

- HAGISHIMA, A *et al.*, Aerodynamic parameters of regular arrays of rectangular block with various geometries. **Boundary Layer Meteorology**, v132 (2), p 315-337, 2009.
- HANNA, S.R., HANSEN, O.R., DHARMAVARAM, S.,. FLACS CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations. *Atmospheric Environment* 38, 4675–4687, 2004.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>>. Consulta realizada em 11 de Março de 2019.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Previsão do tempo. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=sm_previsao_tempo>. Consulta realizada em: Consulta realizada em 11 de Março de 2019.
- KOLMOGOROV, A.N. **The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers**. v. 30, p. 301-305, 1941.
- KOLMOGOROV, A.N. **Equations of turbulent motion in an incompressible fluid**. *Izv. Akad. Nauk. SSSR ser. Fiz.* 6, 56-58, 1942.
- KUMAR, P. *et al.*, The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. **Environment international**, v. 75, p. 199-205, 2015.
- KUNZ, R., I. KHATIB, NICOLAS, M.. "Coupling of mesoscale and microscale models—an approach to simulate scale interaction." **Environmental Modelling & Software** 15, no. 6-7 (2000): 597-602.
- KWA, S. M.; SALIM, S. M. Fluctuating Inlet Flow Conditions for Use in Urban Air Quality CFD Studies. **Dynamics (CFD)**, v. 5, p. 7, 2014.
- KWA, S. M.; SALIM, S. M. Numerical Simulation of Dispersion in an Urban Street Canyon: Comparison between Steady and Fluctuating Boundary Conditions. **Engineering Letters**, v. 23, n. 1, 2015.
- KWAK, K. *et al.*, Urban air quality simulation in a high-rise building area using a CFD model coupled with mesoscale meteorological and chemistry-transport models. **Atmospheric Environment**, v. 100, p. 167-177, 2015.
- Li, L., Hu, F., Jiang, J., & Cheng, X.. An application of the RAMS/FLUENT system on the multi-scale numerical simulation of the urban surface layer—A preliminary study. **Advances in Atmospheric Sciences**, 24(2), 271-280, 2007.
- LIN, M.; HANG, J.; LI, Y., SANDBERG, M.. Quantitative ventilation assessments of idealized urban canopy layer with various urban layouts and the same building packing density. **Building and Environment**, v.79, p.152-167, 2014.
- LIU, Y. S. et al. Study on micro-atmospheric environment by coupling large eddy simulation with mesoscale model. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 107–108, p. 106–117, 2012.
- LIU, S.; PAN, W.; ZHANG, H.; CHENG, X.; LONG, Z.; CHEN, Q.. CFD simulations of wind distribution in an urban community with a full-scale geometrical model. **Building and Environment**, 117, 11-23, 2017.

- Luo, K., Yu, H., Dai, Z., Fang, M., & Fan, J.. CFD simulations of flow and dust dispersion in a realistic urban area. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, 10(1), 228-242, 2016.
- MAVROIDIS, I., GRIFFITHS, R., JONES, C.; BILTOFT, C. Experimental investigation of the residence of contaminants in the wake of an obstacle under different stability conditions. **Atmospheric Environment**, v. 33, p. 939-949. 1999.
- MEDINA, J. F.. **Avaliação das parametrizações físicas do modelo wrf para a camada limite atmosférica para a região metropolitana da grande vitória**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, UFES. 2017.
- MISHRA, P., & AHARWAL, K. R. A review on selection of turbulence model for CFD analysis of air flow within a cold storage. In **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** (Vol. 402, No. 1, p. 012145). IOP Publishing, 2018.
- POPE, S. B. **Turbulent Flows**. 1ª ed. Cambridge University Press, 770p, 2000.
- POUR B. A. *et al.*, Satellite Cloud Assimilation in the Weather Research & Forecasting (WRF) Model and its Impact on Air Quality Simulations. In: **EGU General Assembly Conference Abstracts**. 2017. p. 10641.
- POWERS, J. G. *et al.*. The Weather Research And Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future directions. **American Meteorological Society**, p. 1717-1736, 2017.
- RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation flow for different isolated building configurations: validation with wind tunnel measurements and analysis of physical and numerical diffusion effects. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 104, p. 408-418, 2012.
- RAMPONI, R.; BLOCKEN, B.; LAURA, B.; WENDY, J.. CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths. **Building and Environment** 92: 152-166, 2015.
- RICCI, A. *et al.*, Wind tunnel measurements of the urban boundary layer development over a historical district in Italy. **Building and Environment**, 111, pp.192-206, 2017.
- SALIM, S.M. *et al.*, Numerical simulation of atmospheric pollutant dispersion in an urban street canyon: comparison between RANS and LES. **J Wind Eng Ind Aerodyn**, v99, p103-113, 2011.
- SANCHEZ, *et al.*, Modelling NOX concentrations through CFD-RANS in an urban hot-spot using high resolution traffic emissions and meteorology from a mesoscale model. **Atmospheric Environment** 163: 155-165, 2017.
- SANTIAGO, A. M.. **Formação e transporte de material particulado na região metropolitana da Grande Vitória/ES: Utilização e avaliação de desempenho do modelo CMAQ**, Vitória: s.n., 2015
- SANTIAGO, J. L. *et al.*, Evaluation of a CFD-based approach to estimate pollutant distribution within a real urban canopy by means of passive samplers. **Science of the Total Environment**, v. 576, p. 46-58, 2017.

- SAPIAN, A. R.. Validation of the computational fluid dynamics (CFD) method for predicting wind flow around a high-rise building (HRB) in an urban boundary layer condition. *Journal of Construction in Developing Countries*, 14(2), 1-20, 2009.
- SATO, T. *et al.*, A study on accuracy of particle image velocimetry in a wind tunnel simulating airflow around building scale model. ***AIJ Journal of Technology and Design***, v. 23, n. 54, p. 567-572, 2017.
- SHEN, J. *et al.*, An investigation on the effect of street morphology to ambient air quality using six real-world cases. ***Atmospheric Environment***, v. 164, p. 85-101, 2017.
- SOULHAC, L. *et al.*, The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion; PART II, validation of the model on a real case study. ***Atmospheric environment*** 49: 320-337, 2012.
- SOUZA, J. F. A. Uma revisão sobre a Turbulência e sua Modelagem. ***Revista Brasileira de Geofísica***, v. 29, n.1, p. 21-41, 2011.
- STULL, R. B. ***An Introduction to Boundary Layer Meteorology***. Vol. 13. Springer Science & Business Media, 1988.
- TAJ, O.; Kirby, R. M.; Berzins, M.. Performance Optimization Strategies for WRF Physics Schemes Used in Weather Modeling. ***International Journal of Networking and Computing***, 8(2), 301-327, 2018.
- TEWARI, M. *et al.*, Impact of coupling a microscale computational fluid dynamics model with a mesoscale model on urban scale contaminant transport and dispersion. ***Atmospheric Research***, v. 96, n. 4, p. 656-664, 2010.
- TOPARLAR, Y. *et al.*, CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam. ***Building and Environment***, v. 83, p. 79-90, 2015.
- TOMINAGA, Y., *et al.*, AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. ***Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*** 96, no. 10-11: 1749-1761, 2008.
- TOMINAGA, Y.; STATHOPOULOS, T. CFD modeling of pollution dispersion in a street canyon: Comparison between LES and RANS. ***Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics***, v. 99, n. 4, p. 340-348, 2011.
- TOMINAGA, Y. Flow around a high-rise building using steady and unsteady RANS CFD: Effect of large-scale fluctuations on the velocity statistics. ***Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics***, v. 142, p. 93-103, 2015.
- TSANG, C.W; KWOK, K.C.S; HITCHCOCK, P.A. Wind tunnel study of pedestrian level wind environment around tall buildings: effects of buildings dimensions, separation and podium. ***Building and Environment***, v49, p82-94, 2012.
- UYGUN, M.; ONBASIOGLU, S.; SUAT, A. V. C. I. ***Turbulence Modeling for Computational Fluid Dynamics, Part I: Conceptual Outlook***. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, Vol. 1, No. 4, p. 19-26, 2004.

- VAN HOOFF, T.; BLOCKEN B.. "Full-scale measurements of indoor environmental conditions and natural ventilation in a large semi-enclosed stadium: possibilities and limitations for CFD validation." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 104 (2012): 330-341.
- VARDOULAKIS, S. *et al.*,. Modelling air quality in street canyons: a review. **Atmospheric Environment** (37), 155-182, 2003.
- Versteeg, H. K. e Malalasekera W.. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Pearson Education, 2007.
- WANG, T. *et al.*, Regional Pollutant Dispersion Characteristics of Weather Systems. **In: International Conference on Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystems**. Springer, Singapore. p. 572-578, 2016.
- WANG, YANG, YING, Z., JIAN, Z., RAUFDEEN, R.. "A computational fluid dynamic (CFD) simulation of PM10 dispersion caused by rail transit construction activity: a real urban street canyon model." **International journal of environmental research and public health** 15, no. 3: 482., 2018.
- YOSHIE, R. *et al.*, Cooperative Project for CFD prediction of pedestrian Wind environment in the Architectural Institute of Japan. **J Wind Eng Ind Aerodyn**, v95, p1551-1578, 2007.
- ZAKI, S.A, *et al.*,. Aerodynamic parameters of urban building arrays with random geometries. **Bound-Layer Meteorology**, 138, p99-120, 2011
- TSANG, Y *et al.*, Effect of real-time boundary wind conditions on the air flow and pollutant dispersion in an urban street canyon—large eddy simulations. **Atmospheric environment**, v. 45, n. 20, p. 3352-3359, 2011.
- ZHANG, H., CHEN, G., HU, J., CHEN, S. H., WIEDINMYER, C., KLEEMAN, M., & YING, Q.. Evaluation of a seven-year air quality simulation using the Weather Research and Forecasting (WRF)/Community Multiscale Air Quality (CMAQ) models in the eastern United States. **Science of the Total Environment**, 473, 275-285, 2014.

APÊNDICE I – Teste de Sensibilidade de malha

Para a criação da geometria e malha computacional foram utilizados o AutoCad 3D e ferramentas de geração de malha ANSYS 19.2. Um teste de independência de malha é conduzido para identificar a configuração (refinamento e número de elementos) mais adequada considerando a precisão dos resultados e viabilidade computacional. Para o teste, foram selecionadas três malhas com diferentes resoluções para simular o escoamento em regime transiente por um período de 6 horas com velocidade de entrada constante de 5 m/s no sentido positivo do eixo x.

A função *face sizing* do ANSYS *Meshing*, possibilita fixar o tamanho dos elementos adjacentes a um determinado elemento da geometria que compõe o domínio. Esta função foi usada para construção das malhas, em que foram variados os tamanhos dos elementos próximos a determinadas faces, e fixados um limite máximo de tamanho para os elementos. Esta estratégia possibilita a geração da malha com uma maior densidade de elementos em regiões do domínio onde deseja-se observar detalhes do escoamento, e uma redução da quantidade de elementos em regiões do domínio afastadas das áreas de maior interesse. Principalmente para um domínio computacional em escala real, onde há uma tendência de grande quantidade de elementos, esta técnica é importante para evitar um número excessivo de células que pode aumentar significativamente o esforço computacional requerido pelo *solver* para obtenção dos resultados.

Foram construídas 3 malhas com os tamanhos dos menores elementos próximos aos prédios de 3 m, 1,5 m e 1 m para as malhas 1, 2 e 3 respectivamente. As três configurações de malhas são mostradas na Tabela 10. Para as simulações, dados do primeiro intervalo dos modelos de mesoescala são utilizados, e a simulação são conduzidas para um total de 6000 iterações em regime permanente, modelo de turbulência *k - ε standart*. Foram analisados resultados dos perfil de velocidade em 3 pontos aleatórios no domínio como mostrados na Figura 30.

Os perfis verticais de velocidade simulados pelas malhas 02 e 03 mostram-se consideravelmente semelhantes, para toda a extensão da altura do domínio, como mostrado na Figura 31. A malha 01, no entanto, apresenta maior variabilidade e valores diferentes dos resultados das malhas mais refinadas. Isto indica maior independência das malhas 2 e 3, não apresentando resultados diferentes dado ao aumento do número de elementos.

Além da independência dos resultados, o tempo de simulação também é avaliado, como mostrado na Tabela 10. Com a malha 2 de cerca de 19,2 milhões de elementos, a simulação requer 14460 segundos para finalizar, pouco menos que a metade do tempo requerido pela malha 03 que possui por volta de 41 milhões de elementos. Esses resultados justificam a escolha da malha 02 para as simulações dos casos deste trabalho.

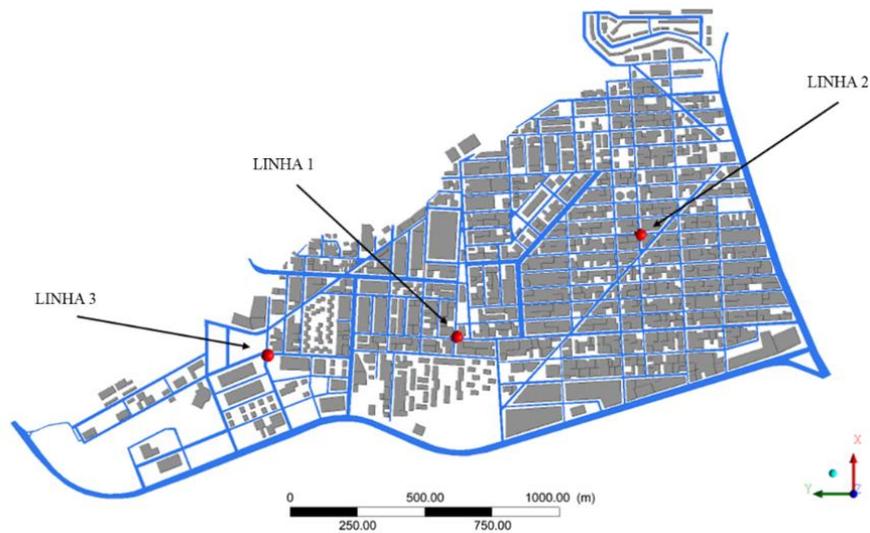


Figura 30 – Posição dos pontos de amostragem para o teste de sensibilidade de malha. Cada ponto indica a localização de uma linha vertical que se estende até o topo do domínio computacional.

Tabela 7 - Configurações das malhas 1, 2 e 3 construídas para o teste de independência de malha bem como o tempo requerido para convergência das simulações para cada malha.

Malha	NUMERO DE ELEMENTOS	SIZING	Tempo
01	6.072.085	3 m	5340 s
02	19.242.345	1,5 m	14460 s
03	41.076.586	1 m	32160 s

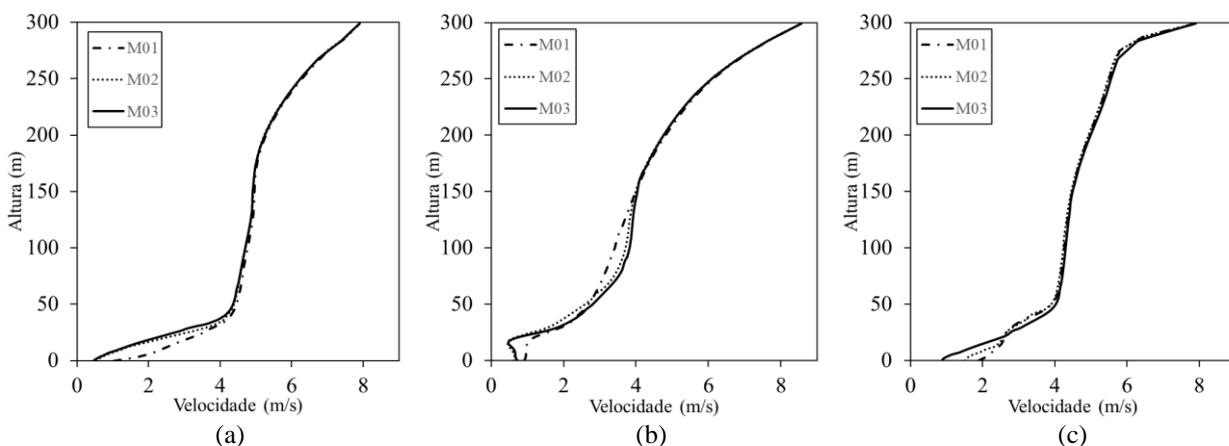


Figura 31 – Coparação dos perfis de velocidade vertical ao longo das linhas indicadas na Figura 30 para diferentes tamanhos de malha computacional teste de malhas (a) Linha 1, (b) Linha 2, (c) Linha 3.

APÊNDICE II -Teste de sensibilidade do *time step* e do critério de convergência

Para a utilização de dados dependentes do tempo, simulações transientes são conduzidas, e o tamanho do *time step* pode influenciar significativamente nos resultados. Baseado na metodologia *Quasi-Steady* de Tewari *et al.*, 2010, o intervalo de tempo é definido relativamente grande, de forma que para cada *time step* é necessário um número de iterações suficiente para atingir o critério de convergência, funcionando assim com uma simulação em regime permanente. A performance de três diferentes *time steps*, 3600, 1800 e 900 segundos, é testada. Os casos são configurados de forma similar aos do teste de sensibilidade de malha, e os perfis de velocidade gerados também são comparados para o mesmo ponto.

Os perfis de velocidade mostrados na Figura 32 apresentaram-se semelhantes para os três tamanhos de intervalos de tempo. Entretanto, o Δt de 3600 segundos foi escolhido para este trabalho considerando a menor demanda computacional requerida, como mostrado na **Error! Reference source not found.**

Tabela 8 – Tempo gasto para finalização de cada teste para os três diferentes tamanhos de intervalo de tempo, bem como o tempo gasto para convergência de cada intervalo de tempo Δt .

Δt (segundos)	Duração do teste (hh:mm:ss)	Duração de cada Δt (hh:mm:ss)
900	05:45:26	01:55:09
1800	04:17:00	01:25:40
3600	03:18:36	01:06:12

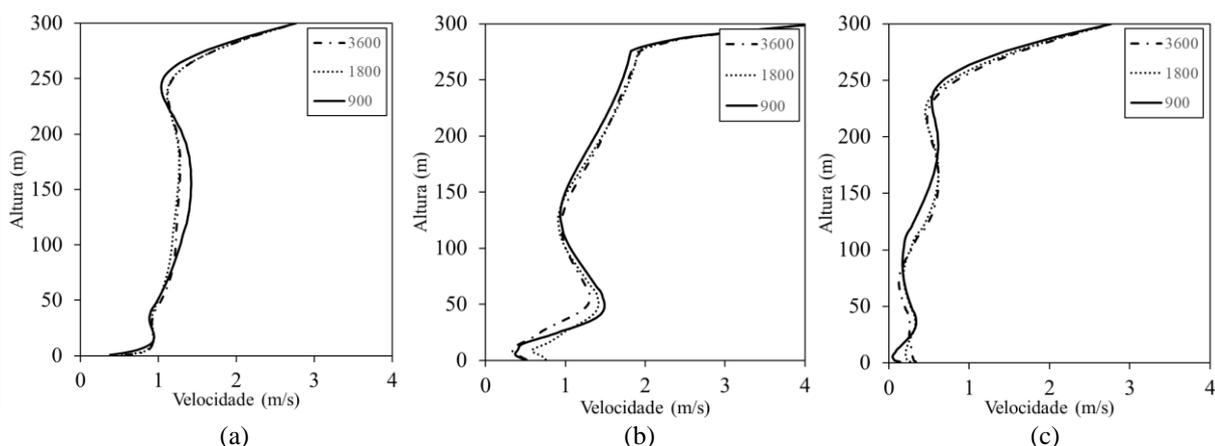


Figura 32 - Perfis verticais de velocidade na localização das linhas indicadas na Figura 30 para cada configuração de Δt . (a) Linha 1, (b) Linha 2, e (c) Linha 3.