

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE NUMÉRICA DO ESCOAMENTO TURBULENTO EM ÁREA URBANA
EMPREGANDO SIMULAÇÃO DE GRANDES ESCALAS

por

CAREN REJANE DE FREITAS FONTELLA

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, maio de 2014

ANÁLISE NUMÉRICA DE ESCOAMENTO TURBULENTO EM ÁREA URBANA
EMPREGANDO SIMULAÇÃO DE GRANDES ESCALAS

por

CAREN REJANE DE FREITAS FONTELLA

Licenciada em Física

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: ENERGIA

Orientador: Prof. Dr. Adriane Prisco Petry

Aprovada por:

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula

URI Erechim

Prof. Dr. Francis H. Ramos França

PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Rogério José Marczak

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 26 de maio de 2014

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas e instituições colaboraram para que este trabalho pudesse ser desenvolvido, gostaria de agradecer a todos. É muito difícil não esquecer alguém no momento em que escrevo esta página, peço desculpas se cometer esta injustiça.

Primeiramente gostaria de expressar minha gratidão ao CNPq pela bolsa de mestrado. Ao CESUP pelo serviço de apoio ao usuário e pela disponibilização dos recursos computacionais. À minha professora orientadora, Adriane Prisco Petry, pelo empenho, amizade e dedicação. Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul por transmitirem seus conhecimentos durante o curso das disciplinas. Aos membros da banca examinadora, por construtivas sugestões. Aos colegas e amigos sem os quais esta experiência não teria sido possível, e em especial aos colegas de mestrado Guilherme Eismann Velasco e Isaias M. Machado e ao colega do doutorado Gustavo Fleck, pelo auxílio incansável e momentos de descontração. Por fim, à minha família pelo apoio incondicional e noivo Fernando Coelho, pelo incentivo, paciência e confiança.

RESUMO

A crescente demanda de energia dos dias de hoje, aliada aos graves problemas ambientais advindos da sua produção tem estimulado a procura de formas alternativas de energia. Dentre as diversas fontes de energia, as renováveis ganham expressão particularmente significativa. Neste contexto, a energia eólica revela-se uma aposta correta, a nível econômico, energético e ambiental. Por outro lado, a microprodução é apontada como uma das soluções para os problemas supracitados. Assim, a combinação de ambas as áreas tem sido alvo de especial interesse. Este trabalho visa caracterizar o vento em ambiente urbano, com particular interesse na possibilidade de seu aproveitamento energético. Um dos principais aspectos para determinar a viabilidade técnica e econômica de uma instalação eólica é a avaliação precisa da distribuição das velocidades de vento na área de aproveitamento. A instalação de turbinas eólicas em áreas urbanas tem determinado a necessidade de aprimorar a metodologia de previsão do campo de velocidades do vento visando à melhor determinação da distribuição dos equipamentos e aproveitamento do potencial existente. Neste contexto, esta dissertação apresenta um estudo sobre a aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional - CFD para avaliação do potencial eólico e o comportamento do vento sobre um modelo de área urbana. Resultados numéricos com diferentes alternativas de modelagem do problema são comparados com dados de um experimento em túnel de vento e dados obtidos com CFD publicados na literatura, visando determinar uma metodologia adequada para avaliação do problema proposto. As simulações numéricas do escoamento de ar em área urbana são realizadas com o uso do programa ANSYS Fluent 13.0, que utiliza o método de volumes finitos para a solução das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS) e Simulação de Grandes Escalas (LES). O estudo é dividido em dois casos. No primeiro caso, a simulação da área em questão é realizada com as médias de Reynolds de forma a validar o modelo criado. No segundo caso, a simulação é realizada com o método de grandes escalas, cujos resultados serão explorados e comparados com o método RANS. Os resultados obtidos mostram essencialmente duas realidades, a primeira diz respeito à intensidade do recurso eólico e a segunda a sua particular complexidade.

Palavras-chave: Energia Eólica; Simulação Numérica; Turbulência; Dinâmica de Fluidos Computacional; Área Urbana.

ABSTRACT

The growing demand for today's energy, combined with the serious environmental problems of its production, has stimulated the demand for alternative forms of energy. Among the various forms of energy, those that are based on renewable sources have been gaining a particularly significant space for discussion. In this context, the wind energy has proved to be a reliable source, energetically, economically and environmentally speaking. Furthermore, the micro production has been appointed as one of the solutions for the aforementioned problems. Thus, the combination of both these areas has particular interest. This work aims to characterize the wind in the urban environment, with particular interest for the possibility to carry out its energy. In this context this work presents a study on the application of computational fluid dynamics to evaluate the wind potential and the behavior of the wind on urban area. Numerical results with different alternatives for modeling the problem are compared with data from an experiment in wind tunnel and CFD simulation to determine one appropriate methodology for evaluation of the problem. The numerical simulations of the air flow over urban area are performed using the ANSYS Fluent 13.0 which uses the finite volumes method for solving the Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) and Large-Eddy Simulation (LES). The study is divided in two cases. In the first one, the simulation of the area is performed with the Reynolds Averaged Navier-Stokes to validate the model created. In the second case, the simulation is performed with the Large-Eddy Simulation, which will be explored and compared with the results with RANS method. The results obtained show essentially two realities, the first is related to the intensity of wind resource and the second due to its high complexity. It was noted that in the urban areas turbulence intensity is significantly higher than in the rural environment. The non-horizontal flow components showed a high dependence on geometry of the building. The brief comparison of results obtained by simulation software shows an acceptable approach to the wind velocity field. In terms of turbulence intensity, it's over estimated by the software. It is concluded from the results obtained that the energy use in urban environment provides a delicate task, due to the low wind intensity and complexity of the resource.

Keywords: Wind Energy; Numerical Simulation; Turbulence; Computational Fluid Dynamics; Urban Area.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Motivação | 1 |
| 1.2 | Justificativa..... | 2 |
| 1.3 | Objetivos..... | 2 |
| 2 | FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... | 3 |
| 2.1 | Origem do vento | 3 |
| 2.2 | Potência do vento | 4 |
| 2.2.1 | Potência máxima de extração (limite de Betz) | 5 |
| 2.3 | Movimento dos fluidos..... | 10 |
| 2.4 | A camada limite e a variação do vento em função da altura | 11 |
| 2.5 | Perfil de velocidades..... | 13 |
| 2.6 | Turbulência..... | 14 |
| 2.6.1 | Características da turbulência..... | 15 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 3.1 | Desenvolvimento sustentável | 17 |
| 3.2 | Recurso eólico | 18 |
| 3.3 | Intensidade do recurso | 21 |
| 3.4 | Potencial eólico brasileiro | 22 |
| 3.5 | Capacidade instalada e adicionada | 23 |
| 3.6 | Turbinas eólicas integradas a edificações..... | 24 |
| 3.7 | Características do vento em áreas urbanas | 27 |
| 3.7.1 | Vento em torno de edifícios | 28 |
| 3.8 | CFD para avaliação do potencial eólico | 30 |
| 3.8.1 | Modelagem da turbulência | 31 |
| 3.9 | Experimentos com túnel de vento | 34 |
| 3.10 | Aspectos ambientais | 35 |
| 3.10.1 | Emissão de gases | 35 |
| 3.10.2 | Emissão de ruído | 37 |
| 3.10.3 | Impacto visual | 38 |
| 3.10.4 | Impacto sobre a fauna..... | 39 |
| 4 | MODELAGEM NUMÉRICA E MATEMÁTICA..... | 41 |
| 4.1 | Equações fundamentais | 41 |
| 4.2 | Metodologia RANS | 42 |
| 4.2.1 | Modelo k-ε Realizable..... | 44 |
| 4.3 | Simulação de grandes escalas..... | 45 |
| 4.3.1 | Equações governantes..... | 48 |
| 4.3.2 | Equações de conservação filtradas | 48 |
| 4.4 | Modelos de Submalha | 49 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.4.1 | Modelo submalha de Smagorinsky..... | 50 |
| 4.4.2 | Modelo submalha Smagorinsky-Lilly | 52 |
| 4.5 | Método dos volumes finitos | 54 |
| 5 | ESTUDO DE CASO E PARÂMETROS DO PROJETO | 57 |
| 5.1 | Trabalho experimental de referência | 57 |
| 5.2 | Parâmetros do projeto | 61 |
| 5.2.1 | Metodologia..... | 61 |
| 5.2.2 | Descrição | 62 |
| 5.2.3 | Critérios de convergência | 63 |
| 5.3 | Modelagem em CFD | 63 |
| 5.3.1 | Representação geométrica dos obstáculos..... | 63 |
| 5.3.2 | Dimensões do domínio computacional..... | 64 |
| 5.3.3 | Geração de malha | 65 |
| 5.3.4 | Definição das condições de contorno | 67 |
| 5.3.4.1 | Condições de entrada..... | 67 |
| 5.3.4.2 | Condições de saída | 69 |
| 5.3.4.3 | Condições laterais e de topo | 69 |
| 5.3.4.4 | Condições de solo | 69 |
| 5.3.5 | Discretização do domínio | 70 |
| 5.3.6 | Qualidade da malha | 70 |
| 5.4 | Descrição do experimento de referência | 71 |
| 5.4.1 | Túnel de vento | 72 |
| 5.4.1.2 | Medição e aquisição de dados | 73 |
| 5.4.1.3 | Instrumentação da Maquete..... | 73 |
| 5.4.2 | Comparação dos Resultados..... | 75 |
| 5.4.3 | Recurso computacional..... | 78 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 79 |
| 6.1 | Velocidade nos planos horizontais | 79 |
| 6.1.1 | Velocidade a uma altura de 30m | 79 |
| 6.1.2 | Velocidade a uma altura de 40m | 81 |
| 6.1.3 | Velocidade a uma altura de 50m | 82 |
| 6.1.4 | Velocidade a uma altura de 70m | 85 |
| 6.2 | Perfil de Velocidade e Intensidade de turbulência | 86 |
| 7 | CONCLUSÕES..... | 96 |
| 7.1 | Sugestões para trabalhos futuros | 99 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 100 |
| | ANEXO A..... | 111 |
| A.1 | Função definida pelo usuário para perfil de velocidade do vento na entrada do domínio..... | 111 |

| | |
|---|------------|
| APÊNDICE A | 112 |
| A.1 Geometria proposta - Prédios do entorno | 112 |
| A.2 Geometria proposta - Prédios principais..... | 113 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 2.1 | Distribuição geral dos ventos | 3 |
| Figura 2.2 | Incidência solar | 4 |
| Figura 2.3 | Tubo de corrente | 5 |
| Figura 2.5 | Escoamento (a) turbulento e (b) laminar..... | 11 |
| Figura 2.6 | Camada limite de um fluido viscoso..... | 12 |
| Figura 3.1 | Estimativa da demanda mundial de energia primária de 1990 a 2035..... | 17 |
| Figura 3.2 | O recurso eólico mundial – Total de 53.000 TWh/ano..... | 18 |
| Figura 3.3 | Evolução tecnológica das turbinas eólicas comerciais (D = diâmetro, P = potência, H = altura) entre 1982 e 2002..... | 19 |
| Figura 3.4 | Velocidades médias mensais obtidas com os anemômetros | 20 |
| Figura 3.5 | Velocidades médias anuais registradas pelo 8º DISME..... | 20 |
| Figura 3.6 | Complementaridade entre a geração hidrelétrica e eólica..... | 23 |
| Figura 3.7 | Capacidade instalada total mundial..... | 23 |
| Figura 3.8 | Histórico de capacidade instalada adicionada (MW)..... | 24 |
| Figura 3.9 | Crescimento anual da fonte eólica (%) | 24 |
| Figura 3.10 | World Trade Center em Bahrain | 25 |
| Figura 3.11 | Prédio do Instituto de sustentabilidade global da Universidade do Arizona | 25 |
| Figura 3.12 | Prédio da Universidade TU Delft..... | 26 |
| Figura 3.13 | Dependência da altura da camada limite com a rugosidade superficial..... | 27 |
| Figura 3.14 | Escoamento do vento em torno de um edifício..... | 29 |
| Figura 3.15 | Padrão do regime de vento em torno de edifício com topo plano..... | 29 |
| Figura 3.16 | Estimativa de morte anual de pássaros nos países baixos..... | 40 |
| Figura 4.1 | Espectro de energia em função do comprimento de onda para um escoamento turbulento. | 47 |
| Figura 4.2 | Parâmetros utilizados na simulação de grandes escalas..... | 56 |
| Figura 5.1 | Esquema do modelo usado na simulação em CFD no trabalho de referência. | 57 |
| Figura 5.2 | Inclinação dos edifícios estudados | 58 |
| Figura 5.3 | Esquema com as configurações nas quais os prédios foram simulados..... | 58 |
| Figura 5.4 | Complexo de prédios estudados e entorno..... | 59 |
| Figura 5.5 | Imagem aérea do local onde os edifícios são propostos..... | 60 |
| Figura 5.6 | Identificação dos edifícios (presente trabalho) | 61 |
| Figura 5.7 | Geometria proposta no presente trabalho..... | 63 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 5.8 | Porcentagem da área ocupada pelos edifícios em relação ao domínio (presente trabalho)..... | 64 |
| Figura 5.9 | Direção predominante do vento - Nottingham / UK..... | 64 |
| Figura 5.10 | Dimensões do domínio utilizado no presente trabalho..... | 65 |
| Figura 5.11 | Malha tetraédrica não estruturada (presente trabalho)..... | 66 |
| Figura 5.12 | Condições de entrada e contorno (presente trabalho)..... | 67 |
| Figura 5.13 | Velocidades do vento em Nottingham..... | 69 |
| Figura 5.14 | Relação entre as velocidades para cada malha analisada..... | 71 |
| Figura 5.15 | Esquema do túnel de vento (vista lateral)..... | 72 |
| Figura 5.16 | Esquema do túnel de vento (vista superior)..... | 72 |
| Figura 5.17 | Esquema dos equipamentos de medição e aquisição de dados..... | 73 |
| Figura 5.18 | Modelo posicionado na bancada de trabalho com túnel de vento (vista superior)..... | 74 |
| Figura 5.19 | Modelo posicionado na bancada de trabalho com túnel de vento (vista lateral)..... | 74 |
| Figura 5.20 | Simulação - (a) trabalho de referência e Simulação - (b) presente trabalho..... | 77 |
| Figura 6.1 | Distribuição de velocidades a 30 metros de altura – RANS..... | 80 |
| Figura 6.2 | Distribuição de velocidades a 30 metros de altura (edifícios principais) – RANS..... | 80 |
| Figura 6.3 | Distribuição instantânea da velocidade a 30 metros de altura (edifícios principais - instante de tempo final) – LES..... | 80 |
| Figura 6.4 | Distribuição de velocidades a 40 metros de altura – RANS..... | 81 |
| Figura 6.5 | Distribuição de velocidades a 40 metros de altura (prédios principais) – RANS..... | 81 |
| Figura 6.6 | Distribuição Instantânea de velocidades a 40 m de altura (prédios principais - instante de tempo final) – LES..... | 82 |
| Figura 6.7 | Distribuição de velocidades a 50 metros de altura – RANS..... | 83 |
| Figura 6.8 | Distribuição de velocidades a 50 m de altura (prédios principais) – RANS..... | 83 |
| Figura 6.9 | Distribuição Instantânea de velocidades a 50 metros de altura (instante de tempo final) – LES..... | 84 |
| Figura 6.10 | Distribuição Instantânea de velocidades a 50 metros de altura (prédios principais - instante de tempo final) – LES..... | 84 |
| Figura 6.11 | Distribuição de velocidades a 70 metros de altura – RANS..... | 85 |
| Figura 6.12 | Distribuição de velocidades a 70 metros de altura (instante de tempo final) – LES..... | 85 |
| Figura 6.13 | Perfil de velocidade do vento – RANS..... | 86 |
| Figura 6.14 | Perfil de velocidade média do vento – LES..... | 87 |
| Figura 6.15 | Intensidade de turbulência – RANS..... | 88 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 6.16 | Intensidade de turbulência – LES | 89 |
| Figura 6.17 | Perfis de velocidade para domínio vazio | 89 |
| Figura 6.18 | Comparativo entre as velocidades no ponto D-E..... | 90 |
| Figura 6.19 | Comparativo entre as velocidades no ponto E-F..... | 91 |
| Figura 6.20 | Comparativo entre as velocidades no ponto F-G | 91 |
| Figura 6.21 | Comparativo entre as intensidades de turbulência no ponto D-E | 92 |
| Figura 6.22 | Comparativo entre as intensidades de turbulência no ponto E-F..... | 93 |
| Figura 6.23 | Comparativo entre as intensidades de turbulência no ponto F-G | 93 |
| Figura 6.24 | Densidade de potência para análise LES..... | 94 |
| Figura 7.1 | Turbinas eólicas integradas aos edifícios..... | 97 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|--|----|
| Tabela 2.1 | Potência por unidade de área com vento constante e massa específica padrão.... | 10 |
| Tabela 3.1 | Emissão de CO ₂ em diferentes tecnologias de geração de energia elétrica | 37 |
| Tabela 5.1 | Parâmetros utilizados na simulação em CFD | 62 |
| Tabela 5.2 | Perfil de velocidades na entrada do domínio..... | 68 |
| Tabela 5.3 | Dados da análise de qualidade da malha | 71 |
| Tabela 5.4 | Medidas obtidas com túnel de vento para diferentes alturas..... | 75 |
| Tabela 5.5 | Medidas obtidas no trabalho de referencia com simulação em CFD para diferentes alturas | 75 |
| Tabela 5.6 | Medidas obtidas com simulação em CFD para diferentes alturas (presente trabalho). | 76 |
| Tabela 5.7 | Comparação entre os resultados obtidos e trabalho de referência..... | 76 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|---------|--|
| AIJ | Instituto de Arquitetura do Japão |
| CBEE | Centro Brasileiro de Energia Eólica |
| CESUP | Centro Nacional de Supercomputação da UFRGS |
| CFD | Computational Fluid Dynamic |
| CPU | Central Processing Unit |
| DNS | Direct Numerical Simulation |
| EWEA | European Wind Energy Association |
| GEE | Gases do efeito estufa |
| IEA | Agencia Internacional de Energia |
| LES | Large-EddySimulation |
| PROINFA | Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica |
| PROMECA | Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica |
| RAM | Random Access Memory |
| RANS | Reynolds averaged Navier–Stokes |
| RPM | Rotações por minuto |
| SBE | School of the Built Environment |
| SGE | Simulação de grandes escalas |
| SGS | Sub-gridscales |
| UNFCCC | United Nations Framework Convention on Climate Change |
| UFRGS | Universidade Federal do Rio Grande do Sul |
| WWEA | World Wind Energy Association |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------|--|
| A | Área, [m ²] |
| a | Coefficiente de Velocidade Induzida |
| A_T | Área varrida pelo rotor [Pa] |
| B | Capacidade nominal do desenvolvimento da energia eólica [MW] |
| CO_2M | Reduções de emissão de CO ₂ |
| C_p | Coefficiente de potência |
| D | Diâmetro [m] |
| E_v | Energia Cinética [J] |
| F | Força [N] |
| I_τ | Intensidade da turbulência [%] |
| L | Comprimento de referência [m] |
| m | Massa [kg] |
| P_m | Pressão antes do rotor [Pa] |
| P_j | Pressão depois do rotor [Pa] |
| P_1 | Pressão na entrada do tubo de corrente [Pa] |
| P_2 | Pressão na saída do tubo de corrente [Pa] |
| P_v | Potência instantânea do ar [W] |
| P | Campo de pressão [Pa] |
| P_{ex} | Potência extraída [w] |
| Re | Número de Reynolds $\left[\frac{\rho UL}{\mu} \right]$ |
| S_{ij} | Relação linear entre o tensor das taxas de deformação |
| t | Tempo [s] |
| \bar{U} | Média das velocidades [m/s] |
| u_i | Componentes da velocidade na direção x [m/s] |
| u_j | Componentes da velocidade na direção y [m/s] |
| V | Velocidade do escoamento [m/s] |
| V_T | Velocidade do vento na turbina [m/s] |
| $V(z)$ | Velocidade do vento à altura Z [m/s] |

| | |
|----------|--|
| $V(z_r)$ | Velocidade do vento à altura de referência [m/s] |
| V_1 | Velocidade do vento na entrada do tubo de corrente [m/s] |
| V_2 | Velocidade do vento na saída do tubo de corrente [m/s] |
| x_i | Coordenadas do referencial Cartesiano [m] |
| Z_o | Rugosidade superficial [μm] |
| Z_r | Altura de referência [m] |

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

| | |
|----------------|---|
| $\bar{\Delta}$ | Tamanho do filtro no nível de malha |
| ε | Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta |
| μ | Viscosidade dinâmica do fluido [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$] |
| ν | Viscosidade cinemática [m^2/s] |
| ρ | Massa específica do ar [kg/m^3] |
| σ | Desvio padrão |
| τ | Tensor das tensões |
| τ_{ij} | Tensões viscosas |

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de uma política de energia renovável tornou-se tarefa prioritária entre os pesquisadores e governantes de todo o mundo devido a questões como o aumento no consumo de energia, aumento dos preços dos combustíveis fósseis e eletricidade, mudança climática global e desastres ambientais [IEA, 2011; European Commission, 2011; Eurostat, 2011a; UNFCCC, 2011]. Quanto ao valor ambiental e às perspectivas econômicas, a geração de energia eólica é considerada uma das mais atraentes tecnologias devido à disponibilidade de recursos inesgotáveis, o potencial para reduzir emissões de CO₂, moderar o custo da eletricidade e diminuir a dependência de combustíveis fósseis [IEA, 2011]. A energia nuclear é adotada em muitos países da Europa. Após o acidente ocorrido na usina de Fukushima em 2011 no Japão, é agravada a preocupação com os riscos de sua utilização, bem como com os resíduos advindos desta fonte energética. Prova disto é o fato de em menos de três anos, as fontes limpas e renováveis crescerem 23% na Alemanha, depois da chanceler alemã Ângela Merkel anunciar em maio de 2011 o desligamento gradual das 17 usinas nucleares de seu país até 2022; para ela, é possível aos países crescer, criar empregos e possuir uma economia próspera com a capacidade energética focada em recursos renováveis [Vilicic, 2011]. Com isso, o investimento em fontes energéticas limpas, que possa gerar lucros sem consequências ambientais, é um caminho que tende ao sucesso. [Vasconcelos, 2011]. Desta forma, a ideia da utilização da energia eólica vem crescendo dentro do setor energético.

1.1 Motivação

De modo geral em área urbana, os edifícios são orientados a esmo, o que influencia no escoamento do ar, desta forma a velocidade do vento varia de um lugar para outro em torno de uma edificação. Esta variação pode ser observada por meio de medições no local, testes em túnel de vento, ou análise numérica utilizando códigos de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

A dinâmica de fluidos computacional é uma ferramenta altamente difundida na engenharia, que pode ser empregada para melhorar a estimativa de prognósticos de vento em terrenos complexos [Blocken et. al., 2012; Vermeir et. al., 2012; Hooff e Blocken., 2010] áreas urbanas(Blocken et. al., 2009; Cheung-Hu Hu & Fan Wang, 2005]. Isso se deve ao fato

de que esta ferramenta modela as características do escoamento complexo, como turbulência e recirculação. Entretanto, o uso da dinâmica dos fluidos computacional para análise da velocidade do vento com a finalidade de avaliar o potencial eólico de uma área específica é recente, especialmente porque os problemas envolvem grandes dimensões e exigem recursos computacionais avançados.

Dentre as principais motivações para a presente pesquisa estão a crescente demanda de energia, os graves problemas ambientais advindos da produção de energia e a necessidade de aprimorar a metodologia de previsão do campo de velocidades do vento em áreas urbanas.

1.2 Justificativa

Nos últimos anos, há um progresso significativo na aplicação de CFD para avaliar cargas de vento em edifícios e estruturas. O Instituto de Arquitetura do Japão (AIJ) e o European Cooperation in Science and Technology (COST) criaram grupos de trabalho para investigar a aplicabilidade prática de CFD nesta área.

Este trabalho apresenta um estudo do escoamento do ar em uma área urbana com prédios no entorno, empregando CFD e comparando os resultados com os dados de medições obtidas com túnel de vento e com simulação numérica. A turbulência é avaliada através da simulação de grandes escalas (LES).

1.3 Objetivos

A área em causa foi selecionada para avaliar a distribuição de velocidades ao redor dos prédios, para que a instalação de turbinas eólicas possa ser aprimorada, de forma obter a conversão de potência máxima. A pesquisa apresentada nesta dissertação tem como objetivos avaliar a metodologia LES/CFD como ferramenta para estudar o comportamento do vento em áreas urbanas, analisar o comportamento do escoamento do ar, avaliar a distribuição de velocidades entre os edifícios e analisar o perfil de intensidade de turbulência nos pontos entre os edifícios.

O campo de velocidades obtido é utilizado para avaliar a viabilidade da produção de energia elétrica no ambiente urbano, usando turbinas eólicas rentáveis. Além da realização de um estudo sobre a intensidade da turbulência em torno de edificações, visando avaliar a viabilidade da instalação de aerogeradores.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos necessários ao estudo da energia eólica para produção de eletricidade.

2.1 Origem do vento

Os ventos se originam da dinâmica da atmosfera terrestre, e são causados, principalmente, pelos gradientes de pressão da atmosfera aliados ao movimento de rotação terrestre, conforme mostra a Fig. 2.1

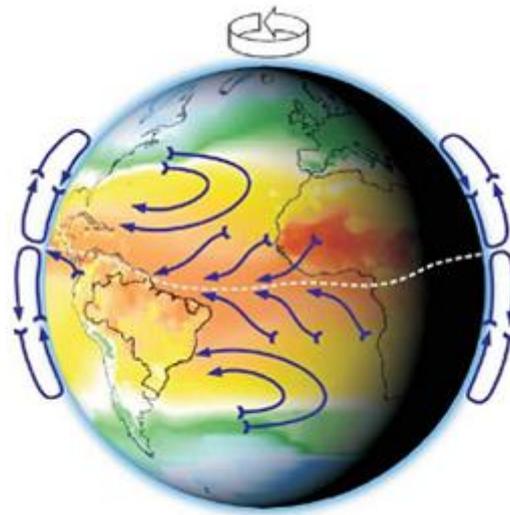


Figura 2.1 – Distribuição geral dos ventos (Amarante et. al., 2001)

Os gradientes de pressão são causados pelos gradientes de temperatura, resultantes do aquecimento diferenciado da superfície da Terra pelo Sol. A região próxima da linha do Equador recebe uma maior incidência de radiação solar, conforme pode ser visto na Fig. 2.2, em relação aos trópicos e aos pólos da Terra, originando os gradientes de temperatura que causam o movimento da atmosfera terrestre. Desta forma, a energia eólica tem origem na dinâmica do nosso planeta, e por isso é considerada uma fonte de energia renovável,

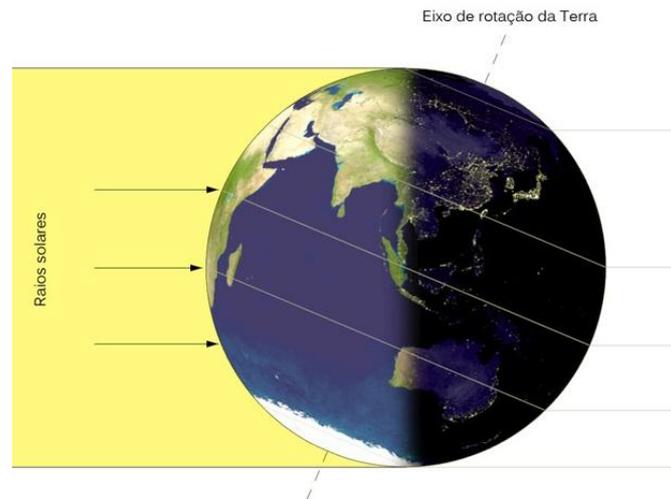


Figura 2.2 – Incidência solar (adaptado de <http://scijinks.jpl.nasa.gov/solstice/>)

2.2 Potência do vento

A energia eólica é a energia cinética (E_v) do ar em movimento (vento). Para uma massa de ar (m), com velocidade (V) a energia cinética pode ser expressa pela Eq. 2.1

$$E_v = \frac{1}{2} m V^2 \quad (2.1)$$

A potência da massa de ar em movimento (P_v) é definida pela Eq. 2.2, onde t representa o tempo

$$P_v = \frac{dE_v}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{dm}{dt} \right) V^2 \quad (2.2)$$

Considerando-se uma seção transversal da área A ao escoamento do ar, tem-se a expressão para a vazão mássica, dada pela Eq. 2.3

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho A V \quad (2.3)$$

onde ρ representa a massa específica do ar.

Substituindo a Eq. 2.3 na Eq. 2.2 obtêm-se a Eq. 2.4

$$Pv = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (2.4)$$

Considerando uma área circular de diâmetro D (área varrida pelo rotor da turbina eólica), tem-se a Eq. 2.5 para a potência disponível no vento

$$Pv = \frac{\pi}{8} \rho D^2 V^3 \quad (2.5)$$

2.2.1 Potência máxima de extração (limite de Betz)

Em 1929, o físico alemão Albert Betz demonstrou a existência de um limite teórico para a potencia extraída por uma turbina eólica, atualmente conhecido por limite de Betz para o coeficiente de potência.

O coeficiente de potência é definido como a razão entre a potência extraída do escoamento que passa pelo rotor de uma turbina eólica e a potência disponível em um escoamento de ar na área varrida pela turbina [Streeter,1977; Martinez, 2003].

Um tubo de corrente de ar que envolve um disco, conforme a Fig. 2.3. Na qual a vazão em massa é a mesma em I e II, em razão conservação de massa,

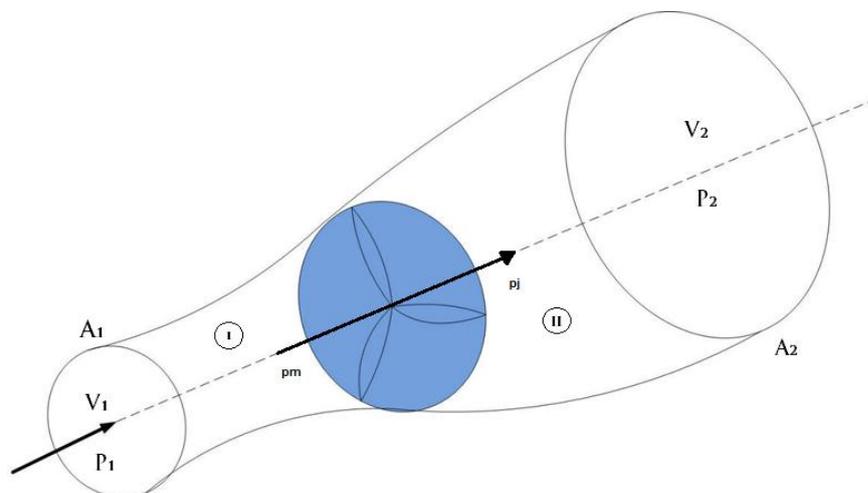


Figura 2.3 – Tubo de corrente

Após a massa de ar passar pelas pás do aerogerador, ocorre uma queda brusca da pressão. Esta pressão eleva-se novamente até o valor original após a turbina eólica. Portanto, tem-se que

$$P_1 = P_2 \quad (2.6)$$

A potência que a turbina poderá extrair do vento é dada pela Eq. 2.7

$$P_{ex} = FV_T \quad (2.7)$$

onde F é a força que o vento exerce sobre a turbina e V_T é a velocidade do vento na turbina.

A força exercida pelo vento sobre a turbina também pode ser igualada ao produto da diferença de pressões antes P_m , e depois P_j da turbina pela área varrida pelo rotor, conforme mostra a Eq. 2.8

$$F = (P_m - P_j) A_T \quad (2.8)$$

Para se determinar o valor desta diferença de pressões, considera-se o fluido invíscido, incompressível e sem rotação induzida pelo rotor. Com estas simplificações pode-se aplicar a equação de Bernoulli entre as seções 1 (região I), e a seção 2 (região II), conforme esquematizado na Fig. 2.3. A região I, considerando-se a linha de corrente horizontal, pode ser expressa pela Eq. 2.9

$$P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = P_m + \frac{\rho V_m^2}{2} \quad (2.9)$$

enquanto a região II, pode ser expressa pela Eq. 2.10

$$P_j + \frac{\rho V_j^2}{2} = P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} \quad (2.10)$$

e considerando-se $V_m = V_j = V_T$, se obtém a Eq. 2.11

$$(P_m - P_j) = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_2^2) \quad (2.11)$$

Substituindo a Eq. 2.11 na Eq. 2.8 obtêm-se a Eq. 2.12

$$F = \frac{1}{2}\rho A_T (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.12)$$

E substituindo na Eq. 2.7 obtêm-se a Eq. 2.13

$$P_{ex} = \frac{1}{2}\rho A_T V_T (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.13)$$

A velocidade do vento na turbina, V_T , não é a mesma velocidade do vento incidente, V_1 . Isso ocorre porque a turbina interfere no escoamento de ar. A turbina atua como um bloqueio ao escoamento, fazendo V_T ser menor que a velocidade do vento.

Uma maneira de demonstrar este efeito é através do Coeficiente de Velocidade Induzida, a , conforme Martinez, 2003 e Manwell et. al., 2002. Definindo a como sendo a fração da velocidade de vento incidente, que não chega às pás do rotor, conforme mostra a Eq. 2.14

$$a = \frac{V_1 - V_T}{V_1} \quad (2.14)$$

obtêm-se assim, a velocidade do vento na turbina eólica de acordo com a Eq. 2.15

$$V_T = V_1(1 - a) \quad (2.15)$$

A força sobre o aerogerador também pode ser calculada através da variação de *momentum* (quantidade de movimento linear) entre as seções de entrada (1) e de saída (2) do tubo de corrente, conforme mostra a Eq. 2.16

$$F = \dot{m}(V_1 - V_2) \quad (2.16)$$

Sendo a velocidade do ar que atravessa o aerogerador V_T , obtêm-se a Eq. 2.17

$$F = \rho A_T V_T (V_1 - V_2) \quad (2.17)$$

Igualando-se as Eqs; 2.12 e 2.17 obtêm-se a Eq. 2.18

$$V_T = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2.18)$$

Substituindo-se a Eq. 2.15 na Eq.2.18 a velocidade do vento no ponto de saída do rotor pode ser expressa pela Eq. 2. 19

$$V_2 = V_1(1 - 2a) \quad (2.19)$$

A Eq. 2.18 indica que a velocidade do vento na turbina é dada pela média entre as velocidades na entrada e na saída do tubo de corrente.

O coeficiente de velocidade induzida, a , nos permite perceber o quando a turbina interfere na passagem do vento. Quanto maior o valor de a , maior é o bloqueio que a turbina causa no escoamento, ou seja, quanto maior a , menor V_T e menor V_2 .

Quanto mais energia a turbina retirar do vento, menor será a velocidade após a turbina (V_2). No entanto, se V_2 diminuir muito, também diminuirá o valor de V_T , como pode ser percebido pela Eq. 2.18, fazendo que diminua a potência que a turbina consegue extrair do vento devido à redução do fluxo de massa de ar que atravessa as pás.

Percebe-se, assim, que existe um limite máximo de energia cinética disponível no vento que pode ser extraída por um aerogerador. Existe, portanto, um valor ótimo de a que fornece o máximo de potência extraída para um dado valor de velocidade do vento.

Este coeficiente de potência é calculado através da Eq. 2.20

$$C_p = \frac{P_{ex}}{P_v} \quad (2.20)$$

Substituindo as Eqs. 2.15 e 2.19 na Eq. 2.13, tem-se que a potência extraída do vento pode ser expressa pela Eq. 2.21

$$P_{\text{ex}} = 2\rho a A_T V_1^3 (1 - a)^2 \quad (2.21)$$

e substituindo-se as Eqs. 2.4 e 2.21 na Eq.2.20 chega-se a Eq. 2.22

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (2.22)$$

O valor máximo de C_p ocorre quando $a=1/3$, que é o valor de uma das raízes da derivada primeira de C_p em relação à a . Substituindo o valor de a na Eq. 1.22, chega-se ao valor teórico máximo do coeficiente de potência, $C_p=16/27=0,593$. Este valor é chamado de rendimento limite de Betz, o qual indica o valor máximo de rendimento que uma máquina eólica pode atingir. Na Fig.1.4, pode-se visualizar a curva C_p em função de a :

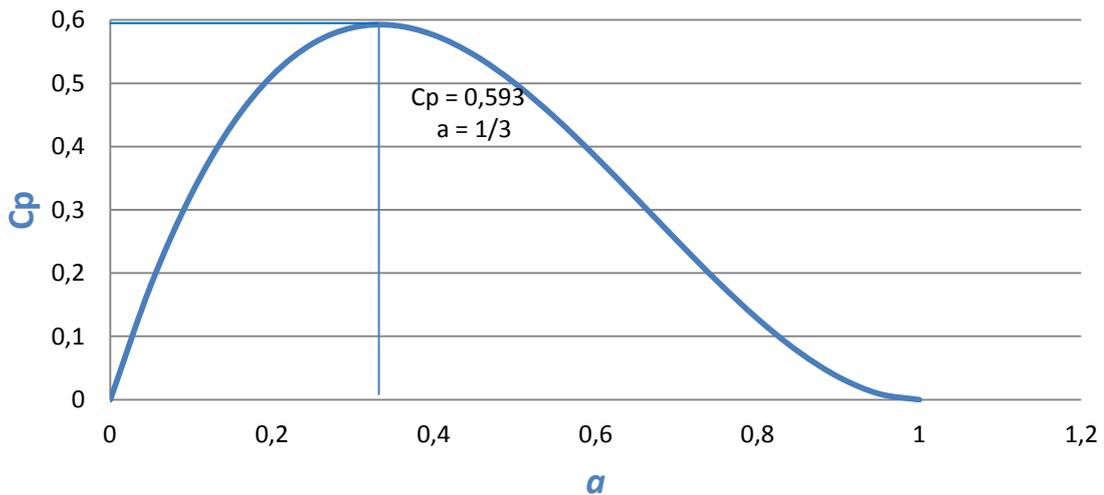


Figura 2.4 – Curva do coeficiente de potência e indicação do coeficiente de potência máximo de Betz

Portanto, o limite teórico para a extração de potência do vento é de 59,3% da energia contida naquele fluxo de massa de ar. Entretanto, cabe ressaltar que, além deste limite físico teórico do vento que foi descrito, existem restrições tecnológicas que fazem com que a potência máxima convertida seja inferior a este limite.

Sendo a potência eólica proporcional ao cubo da velocidade do ar, são apresentados na Tab. 2.1 alguns exemplos da potência disponível em função da velocidade do vento, de

maneira que destaca-se a importância da correta previsão da distribuição da velocidade do vento no ponto de instalação de uma turbina eólica.

Tabela 2.1 – Potência por unidade de área com vento constante e massa específica padrão
(Manwell *et. al.*, 2009)

| <i>Velocidade do vento (m/s)</i> | <i>Potência/Área (W/m²)</i> |
|----------------------------------|--|
| 0 | 0 |
| 5 | 80 |
| 10 | 610 |
| 15 | 2070 |
| 20 | 4900 |
| 25 | 9560 |
| 30 | 16550 |

A densidade de potência, dada pela Eq. 2.23 é obtida dividindo a Eq. 2.4 pela área varrida pelo rotor

$$Dp = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (2.23)$$

2.3 Movimento dos fluidos

Segundo Fox e McDonald, 2006, os dois aspectos da dinâmica dos fluidos mais difíceis de tratar são: (1) a natureza viscosa dos fluidos e (2) a sua compressibilidade. No presente trabalho, em função das baixas velocidades do vento, e os efeitos de compressibilidade são considerados desprezíveis. No âmbito desta dissertação, também é importante mencionarmos o regime de escoamento laminar e turbulento.

Um escoamento é dito laminar quando, nesse regime o fluido se desloca em lâminas ou camadas, não havendo, macroscopicamente, mistura entre camadas de fluidos adjacentes. Por outro lado, o escoamento é dito turbulento, quando não mais se desloca em camadas ou lâminas bem definidas, e essas passam a interagir entre si, resultantes de flutuações de alta frequência, em sua velocidade média, conforme a Fig. 2.5:

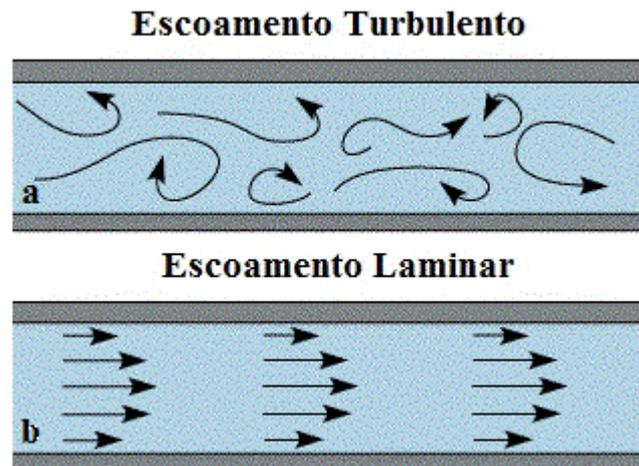


Figura 2.5 – Escoamento (a) turbulento e (b) laminar (adaptado de infoescola, 2014)

Os escoamentos turbulentos são caracterizados por altos números de Reynolds (Re), grandeza adimensional, que relaciona forças de inércia e forças viscosas, conforme Eq. 2.24

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (2.24)$$

onde V é a velocidade do escoamento, L o comprimento de referência e μ a viscosidade dinâmica do fluido.

Se o que define o regime de escoamento (laminar ou turbulento) é o número de Reynolds, a velocidade do fluido é o fator que determina se o escoamento é compressível ou incompressível.

2.4 A camada limite e a variação do vento em função da altura

A camada limite atmosférica (CLA) é uma camada de ar que cobre a terra na qual o escoamento de ar é influenciado pela viscosidade (atrito do fluido). Uma vez que a espessura da camada limite é determinada pela altura em que a superfície de fricção já não afeta o escoamento do ar em geral, a espessura da camada limite depende da forma e da condição da superfície. A sua descrição e modelagem são complexas, devido à interação de vários fatores, como a rotação terrestre, o aquecimento diferencial, a variabilidade das condições climáticas e a coexistência de escoamento turbulento de tipo convectivo e com origem nas tensões de

corrente. A definição de CLA sofreu alterações significativas ao longo dos anos. Stutton, em 1953, separava a CLA em duas regiões principais [Kaimal e Finnigal, 1994]:

- Uma camada superficial que se estende até 50~100m, onde as tensões cisalhantes são aproximadamente constantes e o escoamento não é influenciado pela rotação terrestre, mas exclusivamente pelo efeito de atrito e o gradiente vertical da temperatura.
- Uma camada que se estende a partir da camada superficial até 500~1000m, onde as tensões de corte evoluem até se anularem no topo da CLA e o escoamento é influenciado também pela rotação terrestre.

De acordo com a Teoria da Dinâmica dos Fluidos, um fluido, ao entrar em contato com uma superfície sólida, apresenta uma tendência de aderir e escoar muito próximo a essa superfície. Isto ocorre, principalmente, porque existem forças de atração que mantêm as moléculas do fluido unidas, forças estas conhecidas como "Forças de van der Waals" [Oliveira, 2008].

As camadas de ar afetadas pelos efeitos da viscosidade na superfície do corpo sólido com o qual interagem, vão sendo desaceleradas, tendo velocidade relativa à superfície de contato nula no ponto de contato com a superfície e aumentando à medida que a distância da superfície aumenta, até o ponto em que uma molécula de ar, mais afastada, não sofre mais a interação das moléculas de ar vizinhas que estão sendo desaceleradas pelas demais em função da viscosidade. Esta camada de escoamento perturbado, ilustrada na Fig. 2.6, denomina-se "camada-limite" (*boundary layer*),

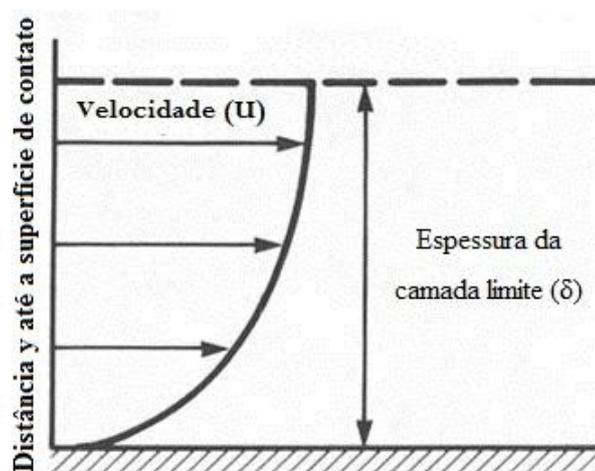


Figura 2.6 – Camada limite de um fluido viscoso (adaptado de Prandtl, 1904)

Portanto, o conceito de camada limite atmosférica, ajuda a explicar a variação da velocidade e da direção do ar em função da altura em relação ao solo e da rugosidade desta superfície.

A velocidade do vento em função da altura do solo é usualmente aproximada através de dois modelos de análise do comportamento da camada limite atmosférica: logarítmico (lei logarítmica) e exponencial (lei da potência).

2.5 Perfil de velocidades

Para o aproveitamento eólico, é necessária uma avaliação das velocidades em diferentes alturas em relação ao solo, para que seja determinado o tamanho da torre do aerogerador. Há dois métodos utilizados para determinar os perfis de velocidades do vento: o perfil logarítmico e a lei da potência, que apresentam com boa qualidade a distribuição de velocidades em terrenos planos.

Sabe-se que as características de rugosidade do terreno alteram o perfil de velocidade, rugosidade superficial é caracterizada pela altura de rugosidade, Z_0 , na lei logarítmica, conforma a Eq. 2.25

Perfil logarítmico

$$\frac{V(z)}{V(Z_r)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z_r}{Z_0}\right)} \quad (2.25)$$

onde $V(z)$ é a velocidade do vento à altura Z , $V(z_r)$ é a velocidade do vento à altura de referência e Z_r é a altura de referência.

A lei da potência, expressa pela Eq. 2.26, adota o expoente α para caracterizar a rugosidade do terreno.

Lei da potência

$$\frac{V(z)}{V(Z_r)} = \left[\frac{z}{Z_r}\right]^\alpha \quad (2.26)$$

onde o valor de α é determinado pelas relações dadas pelas Eqs. 2.27 e 2.28.

1) Função da rugosidade superficial

$$\alpha = 0,096 \log(Zo) + 0,016[\log(Zo)]^2 + 0,24 \quad (2.27)$$

para valores de Zo entre 1 mm e 10 m.

2) Função da velocidade e altura

$$\alpha = \frac{0,37 - 0,088 \ln V(Z_r)}{1 - 0,088 \ln \frac{Z_r}{10}} \quad (2.28)$$

2.6 Turbulência

Grande parte dos escoamentos encontrados na natureza e em aplicações práticas são turbulentos. Os movimentos turbulentos são caracterizados por flutuações instantâneas de velocidade, temperatura e outros escalares.

Como consequência destas flutuações, o escoamento turbulento em um fluido contribui significativamente no transporte de *momentum*, calor e massa na maioria dos escoamentos de interesse prático e, por isso, têm uma influência determinante nas distribuições destas propriedades no campo de escoamento.

De acordo com o "*Glossary of Oceanographic Terms*" [Baker et. al., 1966; Schwind, 1980], escoamento turbulento "é um estado de escoamento do fluido no qual as velocidades instantâneas exibem flutuações irregulares e aparentemente aleatórias tal que, na prática, apenas propriedades estatísticas podem ser reconhecidas e submetidas a uma análise".

A turbulência atmosférica é causada por diversos fatores, tais como, a instabilidade atmosférica, obstáculos, esteiras dos aerogeradores, rugosidade superficial e topografia [Martinez, 2003].

Para estimar um valor relativo à turbulência, define-se a intensidade da turbulência, I_t , conforme a Eq. 2.29

$$I\tau = \frac{\sigma}{\bar{U}} \quad (2.29)$$

onde σ é o desvio padrão dos dados e \bar{U} é a média das velocidades, sempre para intervalos menores ou iguais a 10 minutos para análise da turbulência atmosférica.

Os valores típicos de $I\tau$, para valores dentro da CLA encontram-se no intervalo entre 0,1 e 0,4, [Manwell, 2002]. Segundo Molly, 2005, esses valores estão em torno de 0,2 para áreas complexas e de 0,05 para áreas planas.

2.6.1 Características da turbulência

“A compreensão e a modelagem dos fenômenos turbulentos têm desafiado a imaginação e a criatividade dos cientistas e engenheiros por muito tempo. A própria definição de turbulência é um assunto em aberto, sendo-lhe usualmente atribuída uma série de características próprias para sua identificação” [Schulz, 2001].

Taylor e Karman, 1937, definem turbulência como sendo um movimento irregular que geralmente acontece em fluidos, gases ou líquidos, quando estes escoam próximos a superfícies sólidas ou mesmo quando camadas adjacentes de um mesmo fluido escoam umas sobre as outras. Para a ocorrência deste fenômeno, diferentes partes do fluido precisam ter movimentos também diferentes, com necessidade de o escoamento apresentar condições de irregularidade. Estas características de irregularidade impedem a descrição, em detalhes, do movimento de um escoamento turbulento como função do tempo e do espaço.

Contudo, é possível a descrição de variáveis do movimento do fluido, como por exemplo, velocidade, pressão e temperatura, em função de valores médios obtidos de suas flutuações. Desta forma, surge nova definição para turbulência: o movimento turbulento de um fluido é condição irregular do escoamento, no qual várias quantidades apresentam variação aleatória em tempo e espaço, mas das quais valores médios podem ser obtidos estatisticamente [Hinze, 1959].

Hunt et. al., 2001, apresentam uma revisão do desenvolvimento das pesquisas em turbulência nas últimas décadas, principalmente nos anos 90, baseada em trabalhos realizados no Isaac Newton Institute, Cambridge - UK, entre janeiro e junho de 1999.

Atualmente a forma mais usual de descrever a turbulência é a partir das suas características [Möller e Silvestrini, 2004].

- Irregularidade: é impossível realizar uma análise determinística, portanto trabalha-se com métodos estatísticos;
- Difusividade: produz a mistura do fluido, aumenta a transferência de calor e retarda a separação da camada limite;
- Altos números de Reynolds: a turbulência surge normalmente por uma instabilidade do escoamento laminar, quando o número de Reynolds cresce;
- Tridimensionalidade da vorticidade: a turbulência é rotacional e tridimensional, com flutuações tridimensionais da vorticidade;
- Dissipação: escoamentos turbulentos são sempre dissipativos e a viscosidade transforma o movimento turbulento de pequenas escalas em calor
- Meio contínuo: a menor escala da turbulência é maior que a escala molecular;
- “Escoamentos turbulentos, são escoamentos”: a turbulência é uma característica do escoamento e não do fluido.

A velocidade é a variável comumente trabalhada no estudo das propriedades da turbulência. Sua determinação vetorial (magnitude, direção e sentido) em vários pontos, combinada com ou mesmo obtida a partir de algum método de visualização do escoamento, permite uma boa descrição do movimento do fluido. A análise estatística do escoamento turbulento é usualmente empregada, definindo-se a flutuação da velocidade através da Eq. 2.30

$$v' = V - \bar{V} \quad (2.30)$$

onde v' é a flutuação de velocidade, V é a velocidade instantânea, e \bar{V} é a velocidade média, em um ponto do escoamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura publicada por especialistas aprofunda e dissemina experiências e desenvolvimentos sobre uma mesma área de conhecimento. Neste capítulo serão apresentados diversos artigos relacionados ao tema desta dissertação de mestrado conforme sua relevância e aplicação.

3.1 Desenvolvimento sustentável

De acordo com IEA, 2011, a demanda mundial de energia primária deverá dobrar entre o período de 1990-2035, conforme mostra a Fig. 3.1:

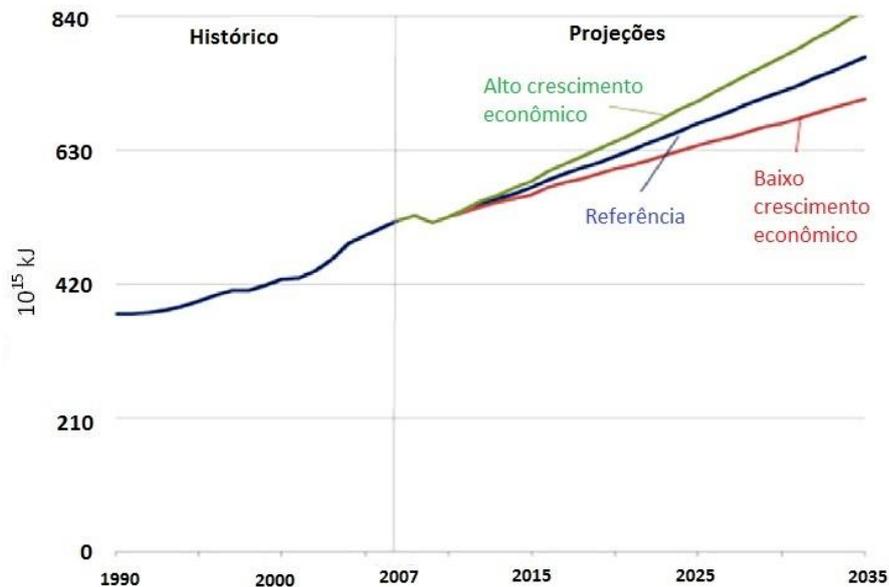


Figura 3.1 - Estimativa da demanda mundial de energia primária de 1990 a 2035 (IEA, 2011)

O conceito de desenvolvimento sustentável está baseado na proposta de garantir que gerações futuras tenham a mesma gama de opções e recursos que temos hoje, ou seja, a qualidade de água, alimentos, energia, recursos naturais, habitação, comunicações, transportes e principalmente recursos para manter os padrões ambientais desejados e qualidade de vida. As fontes de energia renováveis são um elemento fundamental para alcançar o desenvolvimento sustentável.

Diante do esgotamento das fontes tradicionais de energia (fóssil e de fissão nuclear), para satisfazer a demanda prevista, as fontes de energia devem ser exploradas, especialmente fontes de energia renováveis, a exemplo da energia eólica.

Em áreas urbanas, existe um fator de multiplicação da velocidade do vento devido à presença de construções. No entanto, a intensidade de turbulência e multi-direcionalidade do vento também aumentam intensamente, e este aspecto requer uma atenção especial. Outra vantagem da exploração de energia eólica em ambientes urbanos é a sua proximidade aos pontos de consumo [Silva et. al., 2013].

3.2 Recurso eólico

Com a crescente expansão do uso da energia eólica em todo o mundo, é importante se conhecer a disponibilidade do recurso vento.

Os estudos mostram de forma clara que o recurso mundial de energia eólica não será um fator limitante para a geração eólica de energia elétrica. O recurso eólico mundial está estimado em 53.000 TWh/ano [Grubb, 1994 *apud* Greenpeace, 1999] ao passo que o consumo mundial de energia elétrica em 1998, foi de 14.396 TWh/ano com previsão de crescimento para 27.326 TWh/ano em 2020 [IEA, 2011]. De acordo com o relatório da ONU sobre o desenvolvimento de recursos hídricos de 2014, o crescimento da energia eólica no mundo entre 2000 e 2010 foi de 27%, e a demanda de energia deve aumentar 70% até 2035. A Fig. 3.2 mostra a distribuição dos recursos eólicos no mundo,

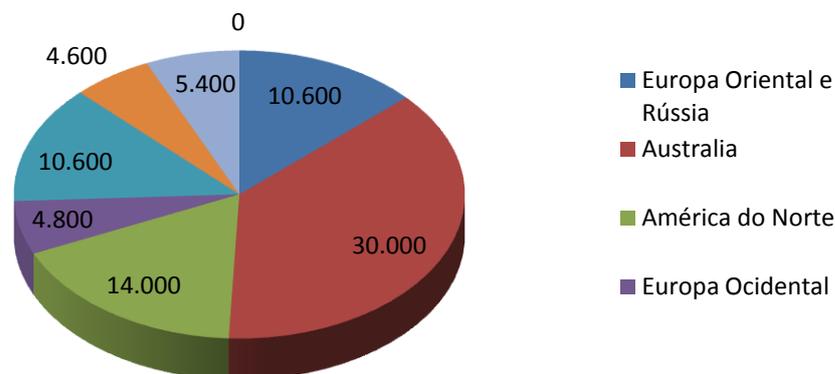


Figura 3.2 – O recurso eólico mundial – Total de 53.000 TWh/ano
(Grubb e Meyer, 1994)

Embora ainda haja divergências entre especialistas e instituições na estimativa do potencial eólico brasileiro, vários estudos indicam valores consideráveis. Até poucos anos, as estimativas eram da ordem de 20.000 MW. Hoje a maioria dos estudos indica valores maiores que 60.000 MW. Essas divergências decorrem principalmente da falta de informações e das diferentes metodologias empregadas.

A evolução tecnológica dos aerogeradores entre 1980 e 2002 pode ser observada na Fig. 3.3. Desde o início da década de 1990 o setor de energia eólica vem apresentando um crescimento acelerado em todo o mundo. A capacidade instalada total mundial de aerogeradores voltados à produção de energia elétrica atingiu 74223 MW ao final de 2006, apresentando um crescimento de mais de 20% em relação a 2005 [Global Wind Energy Council, 2006],

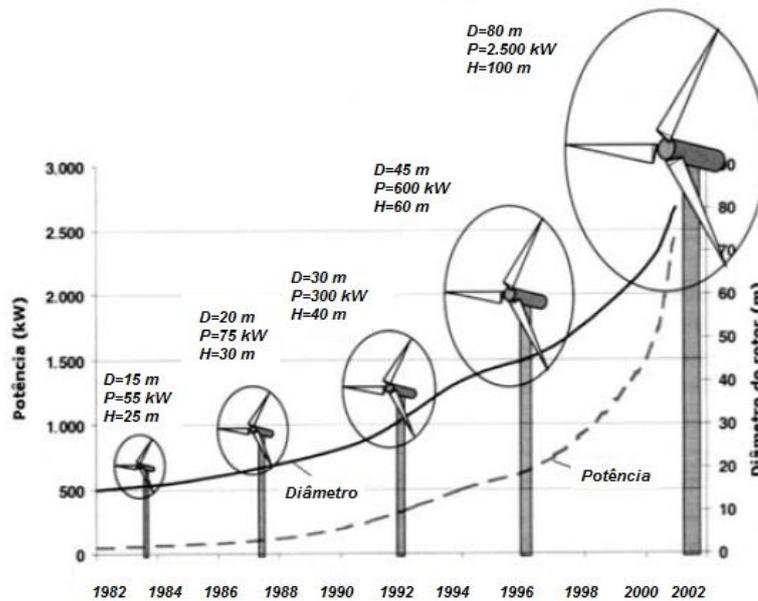


Figura 3.3 – Evolução tecnológica das turbinas eólicas comerciais (D = diâmetro, P = potência, H = altura) entre 1982 e 2002 (Gasch e Twele, 2002)

Com o auxílio de modelos atmosféricos e simulações computacionais, foram feitas estimativas para todo o país, dando origem ao Atlas Eólico Brasileiro. Segundo esses resultados, os melhores potenciais estão no litoral da região Nordeste do país, onde a velocidade média do vento, a uma altura de 50 m do solo, possui valores acima de 8 m/s. Entre outras regiões com grande potencial eólico destacam-se o Sudoeste do Paraná, o Vale São Francisco, e o Litoral do Rio Grande do Sul.

O artigo “Estudo da Implementação de Sistema Eólico em Prédio da Empresa Auxiliadora Predial” [Wenzel et. al., 2006] analisou o potencial eólico de um prédio. De acordo com o artigo, foi instalado um sistema anemométrico para medir as velocidades de vento, de forma a se obter uma estimativa do potencial eólico do local onde o prédio está inserido.

Com base nos dados obtidos no artigo a velocidade média no local, medida através do anemômetro, é de 3,7 m/s, com máxima de 6 m/s, conforme mostra a Fig. 3.4:

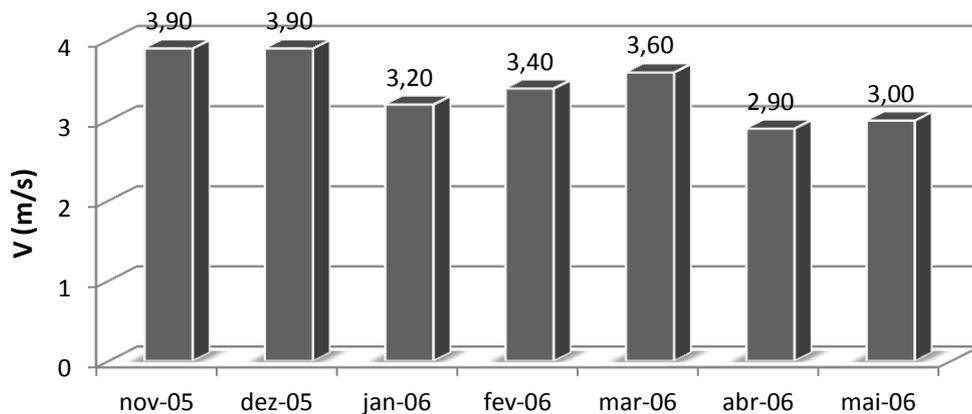


Figura 3.4 – Velocidades médias mensais obtidas com os anemômetros (Wenzel et. al., 2006)

As medições de vento feitas pelo 8º DISME, localizado em Porto Alegre estão demonstradas na Fig. 3.5, onde se observa as velocidades médias anuais registradas de 1999 a 2005,

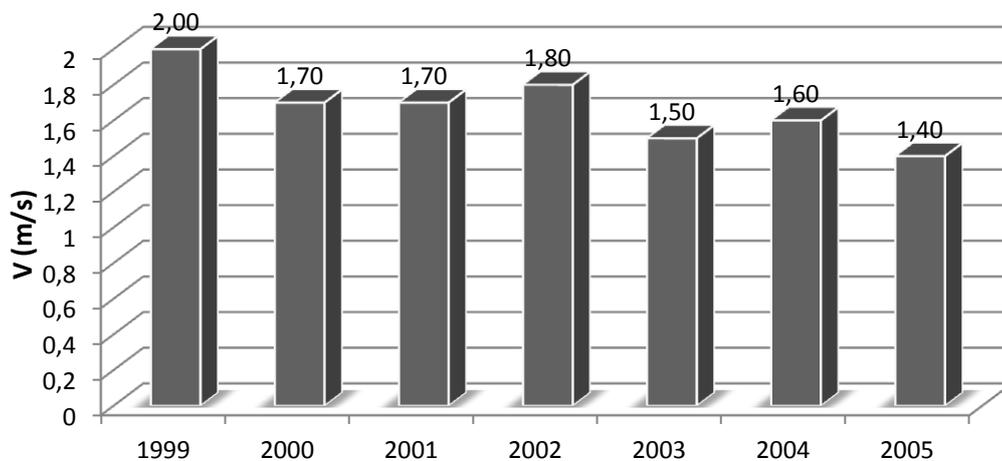


Figura 3.5 – Velocidades médias anuais registradas pelo 8º DISME

A diferença entre as velocidades pode ser atribuída a alguns fatores, tais como, altura, rugosidade do terreno, e principalmente à turbulência gerada pela estrutura do edifício. Um edifício pode gerar grandes níveis de turbulência devido a sua estrutura, ou um acréscimo no valor de sua velocidade [Campbell, 2001].

3.3 Intensidade do recurso

A intensidade do vento depende do tipo de geometria com a qual interage. Se por um lado, em colinas com inclinações suaves pode-se esperar um aumento da intensidade do vento, resultante de efeitos aceleradores e concentradores, por outro, no caso de escoamento em ambientes muito complexos como é o caso dos ambientes urbanos, é de esperar que a elevada rugosidade conduza a perdas energéticas que inevitavelmente traduzem-se numa redução da intensidade do vento. Esta menor intensidade do recurso suscita algumas questões quanto à viabilidade desta tecnologia. A questão da microprodução eólica não deve ser encarada de uma maneira simplista. A elevada complexidade do escoamento atmosférico em ambiente urbano exige uma postura séria e rigorosa no que diz respeito à sua caracterização. Ao contrário do que acontece em campo aberto (ambiente rural), onde por vezes é possível utilizar como recurso o atlas eólico para se ter uma aproximação às condições de vento, em ambiente urbano tal metodologia não é aconselhável.

Além da intensidade do vento, é necessário também conhecer-se a qualidade deste. O fato da velocidade média num dado local ser, por exemplo, 8 m/s, não é razão suficiente para que o aproveitamento energético seja viável. Num caso extremo, se essa média for majoritariamente composta por velocidades inferiores a 4 m/s e velocidades ocasionais de 30 m/s, será de prever que o aproveitamento energético é inviável pois as velocidades estão fora da gama de funcionamento dos aerogeradores. Podemos até ter um local onde, de fato, ao longo do ano a velocidade permanece em torno de 8 m/s, mas se as componentes verticais do vento forem muito acentuadas e a turbulência muito elevada, o aproveitamento torna-se também inadequado, pois há um maior desgaste e possibilidades de rupturas (fadiga estrutural), gerando maiores gastos com a manutenção das turbinas. Muitos outros cenários podem ser colocados de forma a demonstrar que a intensidade não é por si só sinônimo de potencial para exploração. A conjugação da intensidade com a qualidade é essencial para que se possa proceder à instalação de um aerogerador.

3.4 Potencial eólico brasileiro

O potencial eólico brasileiro para aproveitamento energético tem sido objeto de estudos e inventários desde os anos 1970 e o seu histórico revela um lento, mas progressivo descortinamento de um potencial energético natural de relevante magnitude existente no país. Embora o Brasil vivencie um grande desenvolvimento no setor eólico, o último documento oficial sobre o potencial para aproveitamento energético através dos ventos é o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001. Neste Atlas, foi estimado um potencial energético através da fonte eólica de 143,5 GW (272,2 TWh / ano), com base em medições a uma altura de 50 m do solo, dos quais 75 GW (144,3 TWh / ano) localizam-se apenas na região Nordeste. Entretanto, estudos mais atuais, porém ainda não oficiais, apontam para um potencial superior a 300 GW, dado que a tecnologia atual dos aerogeradores permite a instalação de torres com mais de 100 metros de altura, o que permite que as pás dos equipamentos varram uma área maior e em local de velocidades de ventos superiores e mais constantes.

Outro ponto importante a ser destacado refere-se não apenas ao expressivo potencial eólico no Brasil em virtude da qualidade dos seus ventos, mas também em função da sua complementaridade natural com a principal fonte de geração de energia elétrica do país, a hídrica. Através dos dados obtidos no Atlas do potencial eólico brasileiro, é possível observar que o período de maiores índices pluviométricos no Brasil ocorre entre os meses de dezembro e maio, enquanto o período de maiores velocidades médias de vento ocorre justamente no período oposto, de junho a novembro. A Fig. 3.6 corrobora os dados apresentados no atlas, ao apresentar um caso particular da vazão do Rio São Francisco frente à velocidade do vento típico do litoral do Nordeste. Estudos feitos por Bittencourt (1999) mostram que existe a possibilidade de complementaridade da oferta de energia elétrica de fonte hídrica com a energia eólica. Como pode ser visto na Fig 3.6, o período onde existe a menor vazão dos rios é quando ocorre as melhores incidências de vento,

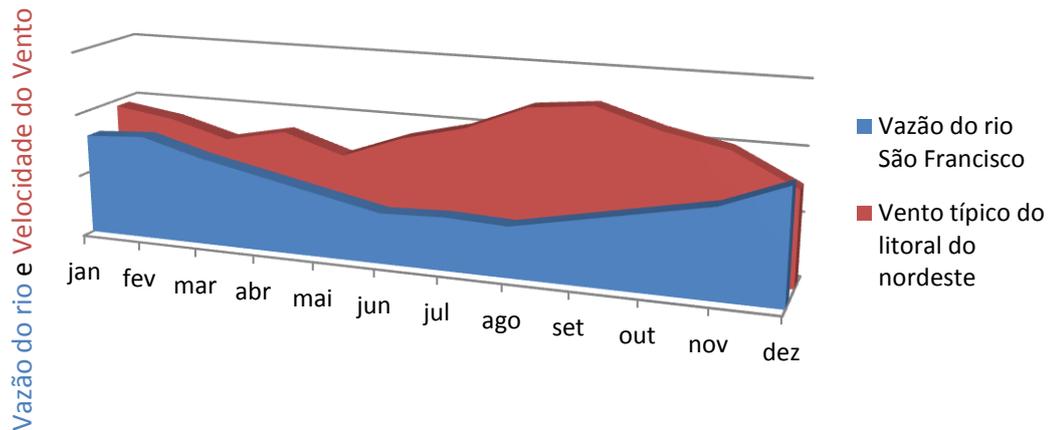


Figura 3.6 – Complementaridade entre a geração hidrelétrica e eólica
(Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE / UFPE, 2000)

3.5 Capacidade instalada e adicionada

No final do ano de 2011, a capacidade instalada mundial provinda da fonte eólica alcançou a marca histórica de 239.000 MW, o que atende atualmente cerca de 3% da demanda mundial de energia elétrica. Essa representatividade expressiva da potência originada pelos ventos foi atingida através de uma década de crescimento exponencial do setor. A Fig 3.7 apresenta a capacidade instalada no mundo entre os anos de 2001 e 2011,

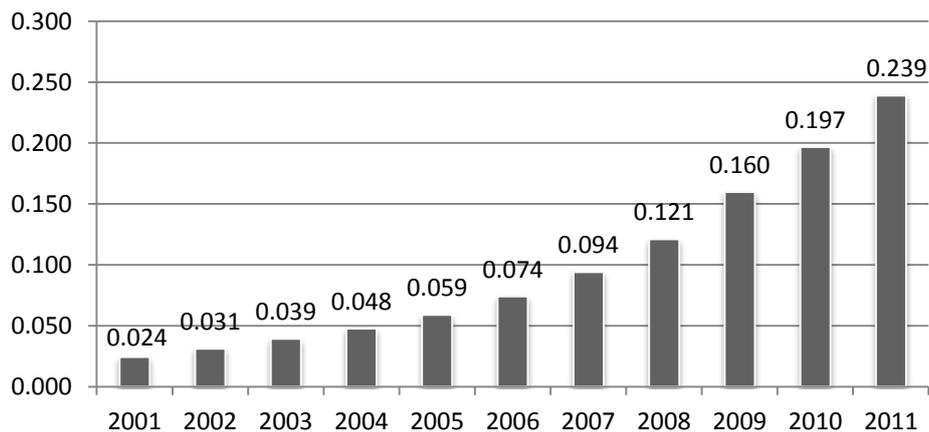


Figura 3.7 – Capacidade instalada total mundial (WWEA, 1999)

O mercado mundial de energia eólica instalou, apenas no ano de 2011, uma capacidade adicional de 42 GW, contra 37,6 GW instalados em 2010. A capacidade instalada

adicionada no ano de 2011 é uma marca histórica em termos de capacidade anual adicionada, conforme pode ser observado na Fig. 3.8:

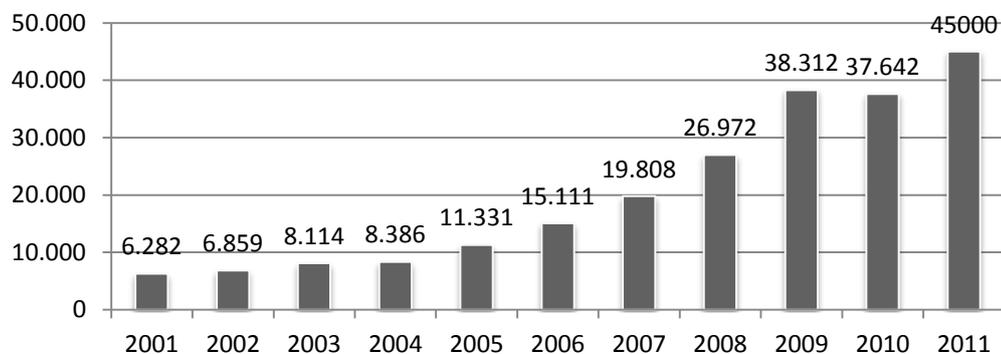


Figura 3.8 – Histórico de capacidade instalada adicionada (MW)
(WWEA, 1999)

A Fig. 3.9 apresenta as elevadas taxas de crescimento anual da fonte eólica. Observa-se que o setor sofreu, em 2010, os efeitos da crise econômica mundial iniciada no final de 2008. Entretanto, mesmo neste ano, embora com uma queda na taxa de crescimento em relação ao observado no ano anterior (2009), o setor manteve um grande dinamismo, uma vez que apresentou uma taxa de crescimento de 21,5%,

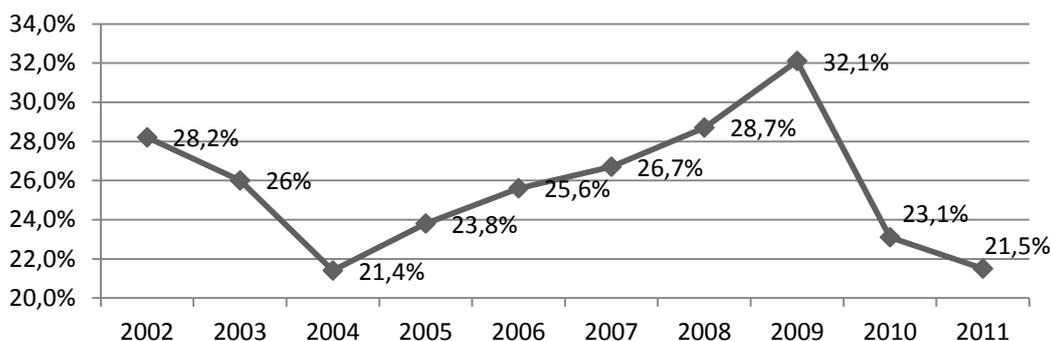


Figura 3.9 – Crescimento anual da fonte eólica (%) (WWEA, 1999)

3.6 Turbinas eólicas integradas a edificações

Embora a rugosidade do terreno em ambientes urbanos possa significar uma redução das velocidades de vento e maior turbulência em comparação a espaços abertos, a velocidade do vento em áreas urbanas também varia conforme a altura. Como destacado anteriormente, a

potência extraída é proporcional ao cubo da velocidade do vento, o que significa que se a velocidade do vento dobra, a potência extraída aumenta oito vezes. A montagem de turbinas em pontos altos como sobre prédios, por exemplo, pode fornecer uma oportunidade para a geração local de energia.

Apesar do grande impacto positivo, esta fonte de energia tem desvantagens, como por exemplo, o impacto visual e a emissão de ruído. Entretanto, os prédios urbanos e suas instalações auxiliares (chaminés e antenas) compartilham esse impacto visual com as turbinas, minimizando-o. Além disso, as turbinas eólicas podem ser arquitetonicamente integradas aos prédios, como por exemplo, as instalações apresentadas nas Figs. 3.10 e 3.11:



Figura 3.10 –World Trade Center em Bahrain (www.bahrainwtc.com, 2013)



Figura 3.11 – Prédio do Instituto de sustentabilidade global da Universidade do Arizona
(<http://sustainability.asu.edu/>, 2013)

Turbinas integradas a edifícios estão se tornando uma alternativa cada vez mais popular, por exemplo, o *Financial Services Cooperative* (edifício em Manchester) começou a instalação de 16 turbinas em seu telhado, sendo um dos primeiros mini-parques eólicos em um edifício no Reino Unido [Dayan, 2005].

Uma série de estudos têm sido realizados a fim de avaliar a viabilidade de implantar turbinas eólicas no ambiente construído.

Campbell et. al., 2001, centraram-se no desenvolvimento de técnicas para a integração da energia eólica à sistemas em áreas urbanas. Sua abordagem minuciosa incluía o equilíbrio entre estética, arquitetura, preocupações ambientais, aerodinâmicas e estruturais.

Abohela et. al., 2011, e Denoon et. al., 2008, enfatizaram em seus estudos o papel significativo da forma do edifício na produção de energia eólica, bem como a importância de uma completa avaliação de características de escoamento de ar no local proposto. A análise da disponibilidade de vento em determinados locais e sua utilidade para a produção de energia elétrica têm sido amplamente descritos em estudos de Alnaser et. al., 2000, e Glass et. al., 2011.

Alguns outros exemplos de desenvolvimento de turbinas integradas estão presentes na Holanda. Por exemplo, a empresa holandesa Ecofys BV tem desenvolvido uma série de turbinas para uso urbano, que não são sensíveis a mudanças na direção do vento e velocidade. A Universidade Técnica de Delft é também muito ativa nesta área e projetou um prédio com uma turbina integrada,



Figura 3.12 – Prédio da Universidade TU Delft (<http://www.tudelft.nl/>, 2013)

Turbinas eólicas integradas a edifícios estão sob uma crescente análise como parte de um grupo de tecnologias adequadas para uso doméstico e micro geração. Desta forma, é oportuno considerar a adequação de turbinas eólicas integradas a edifícios no ambiente urbano [Walker, 2011].

A maioria dos estudos sobre o potencial da energia eólica no ambiente urbano concluiu que a energia eólica pode fazer uma contribuição significativa para as necessidades energéticas de edifícios.

3.7 Características do vento em áreas urbanas

Em áreas urbanas, as características do vento são influenciadas pelas edificações do entorno. Mais perto da superfície da Terra o vento está desacelerando devido à força de atrito e na superfície o vento está praticamente nulo. A altura da camada limite atmosférica é determinada, principalmente, pelo gradiente de temperatura na atmosfera mais baixa (estabilidade) e pela rugosidade da superfície (Fig. 3.13). A altura da camada limite atmosférica pode variar de 50 metros em condições estáveis até 1 km em condições instáveis. Na parte mais baixa da camada limite atmosférica (10-20%), o escoamento tem um comportamento altamente turbulento. A velocidade do vento neste ponto depende da superfície e diminui rapidamente para zero [Verkaik, 2006],

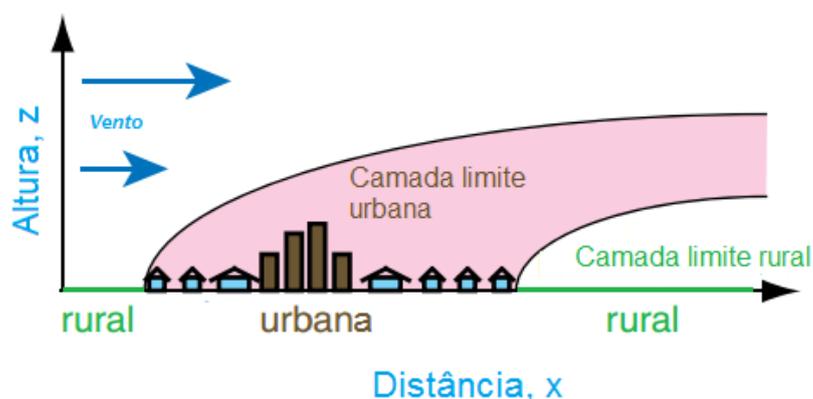


Figura 3.13 – Dependência da altura da camada limite com a rugosidade superficial (Wallace e Hobbs, 2006)

O terreno é mais rugoso em ambientes urbanos, o que modifica o campo de velocidade incidente do vento [Silva et. al., 2013] e o torna mais turbulento. A turbulência aumenta fortemente o transporte vertical de calor, umidade e substâncias contidas no ar a partir da superfície da Terra.

3.7.1 Vento em torno de edifícios

A Fig. 3.14 ilustra o padrão de escoamento de ar em torno de um único edifício de perfil retangular. Quando o escoamento de ar aproxima-se da construção, parte dele flui em torno do edifício e uma parte do escoamento é desviada ao longo o edifício (1). A pressão máxima para a fachada de barlavento (lado que o vento sopra) aparece no ponto de estagnação que é aproximadamente 70 % da altura do edifício. O escoamento a partir do ponto de estagnação é para cima, divididas lateralmente e para baixo, que representam zonas de pressão mais baixa (2). O escoamento de ar para cima e para as laterais separa-se da fachada nas bordas superior e lateral do edifício. O ar que flui para baixo produz um vórtice que está ao nível do solo, com o sentido oposto ao do escoamento (3). O ponto de estagnação, com baixos valores da velocidade do vento é criada no chão na frente do edifício, onde ambos os escoamentos se encontram. O vórtice que flui ao redor das bordas do edifício resulta em escoamentos com altas velocidades de vento (4). O escoamento de recirculação ocorre no lado de sotavento (lado oposto ao qual o vento sopra) do edifício que representa uma zona de pressão baixa e a criação de vórtices de rotação baixa na parte de trás do edifício (5). A zona de estagnação ocorre no nível do solo, em que as direções de escoamento são opostas e a velocidade do vento é baixa (6). Além da zona de estagnação, o escoamento segue normalmente, com baixas velocidades,

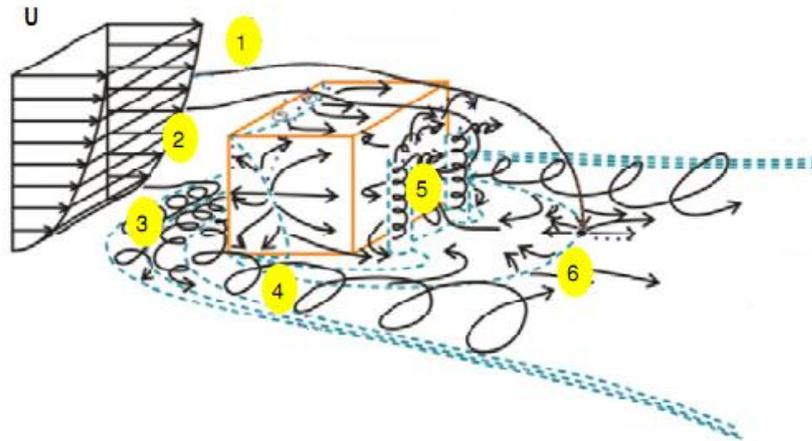


Figura 3.14 – Escoamento do vento em torno de um edifício (Blocken et. al., 2011)

O perfil do vento na camada limite urbana pode ser aproximadamente descrito como seguindo uma curva logarítmica quando acima da altura média dos edifícios. Quando abaixo dessa altura o perfil de velocidades segue aproximadamente uma curva exponencial. Tipicamente, no escoamento em terreno urbano ou complexo verifica-se uma desaceleração a montante do obstáculo, o aumento da velocidade em determinadas zonas, o aparecimento de uma bolha de separação, a subida da camada limite e a criação da região de esteira a jusante do obstáculo. A bolha de separação consiste numa região onde se verifica uma queda acentuada da velocidade do vento, bem como uma elevada turbulência, e deve-se ao fato do escoamento não “acompanhar” perfeitamente o formato do edifício. Na Fig. 3.15 a bolha de separação pode ser vista em azul logo acima do edifício. Acima desta região o vento sofre uma aceleração,

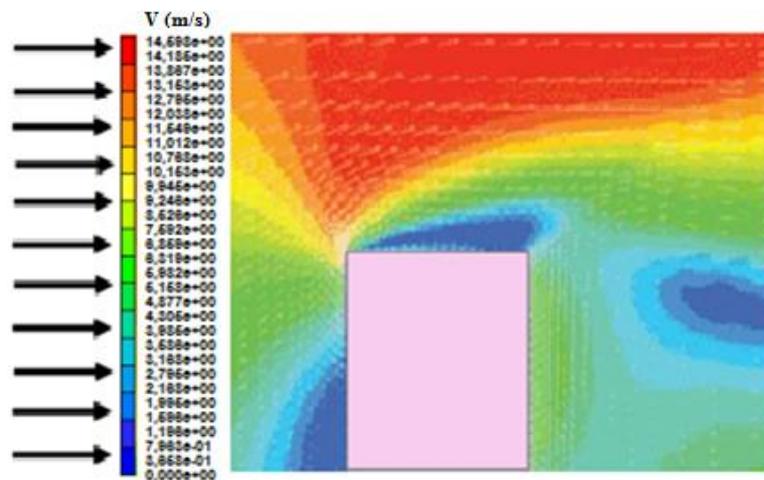


Figura 3.15 - Padrão do regime de vento em torno de edifício com topo plano (adaptado de Heath, Watson and Walshe, 2007)

Na aplicação de aerogeradores deve garantir-se que estes não sejam instalados dentro da zona mais turbulenta do escoamento, sob pena de resultar piores desempenhos e até danos no equipamento. Para além da turbulência a componente vertical do vento tem uma participação decisiva, tanto na questão do aproveitamento energético como no bom funcionamento dos aerogeradores.

A análise dos resultados de experimentos e simulações revelou que o escoamento em torno destas geometrias depende fortemente da sua forma, tamanho e rugosidade [Mertens, 2003], inviabilizando soluções analíticas.

Programas de CFD consistem em uma alternativa de modelagem destes escoamentos, permitindo a análise e visualização do padrão de escoamento em torno de um edifício. Recorrer à utilização destes programas para fazer a caracterização do recurso eólico num determinado local é, muitas vezes, uma solução muito atraente, pois nem sempre é possível a instalação de anemômetros e outros sensores para leitura das características do vento. Todavia, a simulação numérica pode não caracterizar perfeitamente o escoamento em torno de qualquer objeto, caso a modelagem adequada não seja empregada. Existem desvios relativos àquilo que de fato ocorre, por isso, muitas vezes, se torna interessante comparar os resultados do software com os resultados de testes em túneis de vento, buscando a melhor metodologia de CFD para o problema.

3.8 CFD para avaliação do potencial eólico

Fluidodinâmica computacional é a análise, através de métodos computacionais, de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, como análise de escoamento do ar, através de simulações computacionais [Versteeg & Malalasekera, 1995]. O avanço da capacidade de processamento de dados em computadores vem permitindo a utilização da modelagem numérica de processos fluidodinâmicos e de transferência de calor através da modelagem computacional. Devido à sua alta complexidade, a grande maioria dos casos de interesse industrial não tem solução analítica baseada nas equações de conservação de massa, quantidade de movimento e calor. O desenvolvimento de ferramentas computacionais capazes de descrever o escoamento de fluidos permitiu aos pesquisadores a simulação destas situações, antes da avaliação real do desempenho em campo.

Através do avanço computacional, tornou-se possível a aplicação de novos modelos para a solução das equações governantes do escoamento. Devido a esta evolução, algumas técnicas tornaram-se mais usuais em problemas de turbulência, são elas: as equações médias de Reynolds (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS), Simulação de Grandes Escalas (Large-Edge Simulation, LES) e Simulação Numérica Direta (Direct Numerical Simulation, DNS) (Spalart, 2000; Gatski, 2004).

A técnica RANS é normalmente empregada para a descrição do escoamento médio. Neste método, as propriedades do escoamento podem ser decompostas em uma quantidade média e uma flutuação associada à turbulência. Este método admite o emprego de hipóteses simplificadoras, tais como escoamento bidimensional e regime permanente, além de utilizar malhas menos refinadas, levando a uma diminuição do esforço computacional [Abrunhosa, 2003]. Hertwig et. al., 2012, utilizaram a metodologia RANS para validar um modelo de escoamento turbulento em ambiente urbano. Kenjeres e Kuile, 2013 utilizaram o método para modelar e simular escoamentos turbulentos em áreas urbanas com vegetação e Balogh et. al., 2012, utilizaram a técnica para simulação da camada limite atmosférica sobre terrenos complexos.

As técnicas DNS e LES se assemelham no sentido de que ambas precisam de uma solução numérica tridimensional e transiente das equações de governo. A modelagem LES exige malhas relativamente refinadas, contudo DNS [Spalart, 2000] exige um refinamento extremamente elevado, limitando-se atualmente sua aplicação a números de Reynolds baixos e moderados.

3.8.1 Modelagem da turbulência

A princípio, as equações de Navier-Stokes descrevem os escoamentos turbulentos sem a necessidade de informações adicionais. Porém, a turbulência encontrada possui uma larga faixa de escalas de comprimento e tempo e, geralmente, envolve comprimentos de escala muito inferiores que o tamanho da malha de volumes finitos empregada.

Para prever os efeitos da turbulência no escoamento, diversos pesquisadores focam seu trabalho em metodologias e usos de modelos de turbulência. Existem diversos modelos de turbulência utilizados no fechamento das equações.

Um dos principais interesses em CFD é o escoamento sobre geometrias complexas, como por exemplo, aerodinâmica e escoamentos multifásicos.

As equações de Navier-Stokes são capazes de simular com uma boa precisão uma extensa gama de problemas em engenharia, incluindo escoamentos turbulentos. É possível, em teoria, resolver todo o espectro de escalas de turbulência através da abordagem DNS. Esta técnica, chamada de Simulação Numérica Direta, é restrita a escoamentos com baixos números de Reynolds, considerando os atuais recursos computacionais disponíveis e a alta resolução de malha exigida para a resolução completa do problema. Essa metodologia não requer modelos de turbulência, mas não é factível para problemas práticos de engenharia que envolva escoamentos numéricos com elevados números de Reynolds.

A média de Reynolds, aplicadas às equações de Navier-Stokes (RANS) resulta em um conjunto de equações obtidas decompondo as variáveis dependentes da equação de Navier-Stokes em componentes filtradas e componentes flutuantes, onde então, se filtram todos os termos. A partir das equações básicas da dinâmica dos fluidos para escoamentos laminares, pensou-se inicialmente que estes são afetados por pequenas perturbações, as quais aumentando com o tempo favorecem a ocorrência da transição para o regime turbulento. Desta forma, faz-se necessário o uso de suposições adicionais para o problema de fechamento, ou seja, modelos de turbulência.

Essa abordagem é a mais utilizada na maioria das simulações numéricas de escoamento em engenharia. No entanto, a confiabilidade de seus resultados está ligada à qualidade do equacionamento dos modelos aplicados no fechamento das incógnitas adicionais.

As simulações de grandes escalas (LES) pode ser considerada uma alternativa intermediária entre a simulação numérica direta e a abordagem RANS [Mo e Lee, 2011].

Uma vez que o custo para que todas as escalas de turbulência sejam resolvidas por DNS é muito alto, o modelo LES resolve de forma direta apenas as grandes escalas, modelando as pequenas escalas, que são responsáveis pela dissipação da energia cinética turbulenta. Devido aos princípios que permeiam este modelo, é possível usar malhas mais espaçadas e intervalos de tempo maiores, o que não é possível no modelo DNS. As equações utilizadas em LES são obtidas filtrando espacialmente as equações de Navier Stokes [Ferziger e Peric, 2002]. Esta filtragem pode ser feita diretamente utilizando como filtro os volumes

finitos (como no caso do programa Fluent), sendo o volume da célula o tamanho mínimo das estruturas simuladas.

A Simulação de Grandes Escalas (LES) tornou-se uma poderosa ferramenta para análise de escoamento turbulento no campo computacional da engenharia do vento, bem como na dinâmica de fluidos computacional [Letzel et. al., 2008; Moonen et. al., 2011; Gousseau et. al., 2013].

A metodologia LES tem por característica principal calcular mais e modelar menos, ou seja, apenas as características globais do escoamento, representadas pelas grandes escalas, são calculadas diretamente e apenas as pequenas escalas, mais universais e isotrópicas, são modeladas. As grandes escalas são fortemente afetadas pelas condições de contorno e responsáveis por transportar a maior parte da energia, enquanto as pequenas escalas são responsáveis pela difusão e passíveis de modelagem [Souza et. al., 2011].

A simulação de grandes escalas possui diversas aplicabilidades: determinação da velocidade do vento afetado por ondulações montanhosas, por terrenos complexos ou pela rugosidade do terreno; análise de estruturas de turbulência em áreas urbanas, dispersão de massa e calor em áreas urbanas. Diversas pesquisas utilizando LES foram realizadas, como pode-se ver na literatura [Houda et. al., 2011; Moonen et. al., 2013; Nozu e Tamura, 2012].

O Instituto de Arquitetura do Japão (AIJ) criou um grupo de trabalho para investigar a aplicabilidade da técnica de CFD para modelagem do escoamento do ar em torno de edifícios e estruturas complexas. [Ono et. al., 2008; Tamura et. al., 2006]. Ono et. al., 2008 concluíram que a metodologia LES pode simular com precisão as características da pressão sobre telhados e o escoamento na camada limite turbulenta através de comparações com dados experimentais encontrados na literatura. Tamura et. al., 2006, concluíram que técnicas em CFD dependentes do tempo, como LES, são essenciais para a predição de estimativas de cargas de vento em edifícios. Esta investigação esclareceu o atual estado de precisão da previsão do modelo numérico e forneceu um guia para uso do modelo numérico apropriado. Este artigo descreve as atividades do AIJ para estimar o desempenho e limitações de vários tipos de modelagem numérica em engenharia do vento computacional. Ambas as simulação, RANS e LES, foram realizadas para determinar a aerodinâmica para diversos modelos de edifícios.

Vários pesquisadores têm investigado a instabilidade do vento em estruturas quadradas e prismas retangulares, com base em resultados numéricos obtidos a partir de simulação de

grandes escalas para escoamentos turbulentos ao redor destas estruturas [Tamura e Ono, 2003].

O método LES foi utilizado para investigar os escoamentos turbulentos da camada limite sobre uma colina íngreme, com números de Reynolds relativamente elevados [Tamura et. al., 2005]. Este estudo centrou-se fortemente nas condições de contorno da colina, tais como efeitos de rugosidade e efeitos de curvatura.

Outra aplicabilidade de LES é a modelagem de gramíneas e árvores sobre a superfície do solo com base no estado da superfície efetiva de um terreno [Tamura et. al., 2007]. De forma a modelar os efeitos da vegetação para LES, foi utilizado o método proposto por Goldstein et. al., 1993. Neste modelo, a equação de movimento para as árvores ou gramíneas é acoplada com as equações de Navier-Stokes, para que a turbulência no dossel da vegetação possa ser expressa numericamente. Okuno et. al., 2005, em sua pesquisa, utilizam LES para estimar os perfis verticais de velocidade do vento em áreas urbanas.

3.9 Experimentos com túnel de vento

As técnicas de túnel de vento desenvolvidas por engenheiros de aeronaves que tiveram que ser adaptadas para atender as novas demandas da aerodinâmica do escoamento de ar em áreas urbanas De acordo com Lawson, 2001, as diferenças fundamentais que exigiam o desenvolvimento de novas técnicas de túnel de vento são:

- A descrição do vento em torno de edifícios é muito complexa, se comparado ao escoamento em torno de aeronaves;
- Em áreas urbanas o escoamento é turbulento e possui cisalhamento;
- A rugosidade do ambiente urbano é alta.

Apesar destes obstáculos, túneis têm sido usados para estudar a dinâmica de fluidos em torno de edifícios desde o início de 1930 [Davenport, 2002; Cook, 1985]. Além disso, uma grande quantidade de pesquisas em aerodinâmica de construção foi realizada no Reino Unido para estudos em túnel de vento durante década de 60 [Sexton, 1968; Wise et. al., 1971].

Desde então, os túneis têm sido utilizados para investigar diferentes efeitos do vento em edifícios e estruturas.

Na literatura podemos ver a gama de utilidades que os túneis de vento possuem. No trabalho de Youssef et. al., 2012, experimentos com túnel de vento foram utilizados para analisar o efeito de padrões de vegetação em transporte de massa pelo vento em escala

regional. Jinxin Cao et. al., 2013, utilizou túneis de vento para estudar as cargas de vento sobre um modelo de telhado para sistemas de coberturas verdes na China. Além destes usos, os túneis de vento são utilizados para testes de rotores de turbinas eólicas [Monteiro et. al., 2013; Cho e Kim, 2013], análise sobre o desempenho do escoamento de ar [Kim et. al., 2010], taxa de ventilação natural induzida pelo vento em edifícios residenciais [Bu et. al., 2010; Blocken et. al., 2011], análise do impacto na qualidade do ar devido ao manuseio de sucata em portos [Borrego et. al., 2007], entre outros.

3.10 Aspectos ambientais

Desde o início da industrialização, o consumo de energia aumentou muito mais rapidamente do que a número de pessoas no planeta. Sabe-se que o consumo de energia é surpreendentemente elevado e os recursos com base fóssil podem não ser capazes de fornecer energia para o mundo inteiro no futuro. Assim, a energia renovável deverá desempenhar um papel importante em assegurar a demanda de energia requerida, juntamente com a prevenção da poluição ambiental.

Os impactos da energia eólica no ambiente são importantes de ser estudados antes de uma construção por qualquer empresa eólica ou tomada de decisões.

3.10.1 Emissão de gases

A micro-geração está sendo promovida como uma das mais promissoras maneiras para a redução de gases de efeito estufa (GEE).

Uma pequena quantidade de emissão de CO₂ é liberada pela energia eólica durante suas fases de construção e manutenção. No entanto, este montante de CO₂ é muito menor do que outras fontes de energia com base em combustíveis fósseis. Ela não produz dióxido de carbono, dióxido de enxofre, mercúrio, ou qualquer outro tipo de poluição do ar, diferentemente da energia produzida por fontes de combustíveis fósseis [Crawford , 2009].

Um dos maiores benefícios que a energia eólica oferece ao meio ambiente está no fato de ela não poluir durante sua operação. Dessa forma, pode-se fazer um comparativo entre cada unidade (kWh) de energia elétrica gerada por turbinas eólicas e a mesma energia que seria gerada por uma planta convencional de geração de energia elétrica. Ao fazer essa análise chega-se à conclusão de que a energia eólica apresenta grandes vantagens na redução de

emissão de gases de efeito estufa e na redução da concentração de CO₂ durante a sua operação.

Um estudo realizado pela rede nacional irlandesa afirmou que "a produção de eletricidade através do vento reduz o consumo de combustíveis fósseis e, portanto, leva à redução de emissões". A redução estimada de emissão de CO₂ vai de 0,33 a 0,59 toneladas de CO₂ por MWh de energia produzida [ESB National Grid, 2004].

Com o avanço de programas de eficiência energética, as emissões de CO₂ e de gases de efeito estufa têm-se reduzido ao longo dos anos, mas permanecem, ainda, em uma faixa muito alta.

De acordo com dados do Ministério Federal Alemão para o Meio Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear, aproximadamente 67 milhões de toneladas de emissão de CO₂ foi evitada em 2006, gerando eletricidade através do vento, biomassa, energia fotovoltaica e energia hidrelétrica. Entre estes poucos tipos de sistemas de geração de energia elétrica, a energia eólica desempenha o papel mais importante [Martins et. al., 2008]. A redução de emissões pode ser calculada usando fator de emissão de carbono de 640 g CO₂/kWh através da Eq. 3.1 [Abdul et. al., 2003]

$$CO_2M(\text{em toneladas}) = \frac{B \times 0,3 \times 8760 \times 640}{1000} \quad (3.1)$$

onde B é a capacidade nominal do desenvolvimento da energia eólica em MW; 0,3 é o fator de capacidade constante, que leva em conta a natureza intermitente do vento, a disponibilidade de turbinas e perdas e 8760 é o número de horas em um ano.

As preocupações com o efeito futuro das emissões de gases de efeito estufa por parte de vários países do mundo têm criado um ambiente muito favorável ao uso da energia eólica como uma fonte limpa de energia. Uma turbina de 600 kW, por exemplo, instalada em uma região de bons ventos, poderá, dependendo do regime de vento e do fator de capacidade, evitar a emissão entre 20.000 e 36.000 toneladas de CO₂, equivalentes à geração convencional, durante seus 20 anos de vida útil [WEC, 1993]. A Tab. 3.1 mostra um estudo feito pelo *World Energy Council* em 1993, comparando as emissões de diferentes tecnologias de geração de energia elétrica.

Das quatro tecnologias listadas na Tab. 3.1, que apresentam emissões de CO₂ abaixo do nível da energia eólica, somente as grandes hidrelétricas são competitivas comercialmente

na atualidade. Entretanto, a utilização de grandes hidrelétricas tem sido discutida em países como o Canadá e o Brasil (dois países que apresentam grandes plantas hidrelétricas instaladas cada vez mais longe dos centros consumidores) onde o apodrecimento da vegetação submersa nos grandes reservatórios produz uma quantidade substancial de gases de efeito estufa.

Tabela 3.1. Emissão de CO₂ em diferentes tecnologias de geração de energia elétrica (WEC, 1993)

| <i>Tecnologias</i> | <i>Emissão de CO₂ nos estágios de produção de energia (ton/GWh)</i> | | | |
|---|--|-------------------|-----------------|--------------|
| | Extração | Construção | Operação | Total |
| Planta convencional de queima de carvão | 1 | 1 | 962 | 964 |
| Planta de queima de óleo combustível | - | - | 726 | 726 |
| Planta de queima de gás | - | - | 484 | 484 |
| Energia térmica dos oceanos | Na | 4 | 300 | 304 |
| Plantas geotérmicas | <1 | 1 | 56 | 57 |
| Pequenas hidrelétricas | Na | 10 | Na | 10 |
| Reatores nucleares | ~2 | 1 | 5 | 8 |
| Energia eólica | Na | 7 | Na | 7 |
| Solar fotovoltaico | Na | 5 | Na | 5 |
| Grandes hidrelétricas | Na | 4 | Na | 4 |
| Solar térmico | Na | 3 | Na | 3 |
| Lenha (extração programável) | -1.509 | 3 | 1.346 | -160 |

Os projetos de grandes hidrelétricas estão sendo gradativamente abandonados devido aos impactos ambientais na vida animal, causados pelas mudanças de *habitat* e nos protestos de opinião pública.

3.10.2 Emissão de ruído

O impacto ambiental do ruído gerado pelo sistema eólico ao girar suas pás foi um dos mais importantes temas de discussão e bloqueio da disseminação da energia eólica durante a

década de oitenta e início da década de noventa. O desenvolvimento tecnológico nos últimos anos, juntamente com as novas exigências de um mercado crescente e promissor, promoveram um avanço significativo na diminuição dos níveis de ruído produzido pelas turbinas eólicas. O problema do ruído produzido pelas turbinas eólicas está relacionado com fatores como a aleatoriedade do seu funcionamento e a variação da frequência do ruído uma vez que este se relaciona diretamente com a velocidade de vento incidente.

O ruído proveniente das turbinas eólicas tem duas origens: mecânica e aerodinâmica. O ruído mecânico é proveniente, principalmente, da caixa de engrenagens que multiplica a rotação das pás para o gerador. O conjunto de engrenagens funciona na faixa de 1000 a 1500 rpm, onde toda a vibração da caixa multiplicadora é transmitida para as paredes da nacelle onde esta é fixada. A transmissão de ruído também pode ser ocasionada pela própria torre, através dos contatos desta com a nacelle (estrutura onde se encontra os principais componentes elétricos). Estudos sobre a geração e o controle do ruído gerado pelas partes mecânicas já são bastante conhecidos [Julian et. al., 2007].

A principal preocupação é a interação de pás das turbinas eólicas com a atmosfera turbulenta, o que resulta em um som característico [Richard, 2007]. Ainda existem vários aspectos a serem pesquisados e testados, tanto nas formas das pás quanto na própria torre para a redução do ruído.

3.10.3 Impacto visual

A reação visual provocada por um parque eólico é altamente subjetiva. Muitas pessoas olham a turbina eólica como um símbolo de energia limpa sempre bem-vindo, outras reagem negativamente à nova paisagem.

Uma avaliação de impacto visual na área eólica foi realizada por Ian, 2002, para avaliar o efeito negativo da turbina eólica. Jacob, 2009, relata que o impacto visual varia de acordo com a tecnologia de energia eólica, como a cor ou o contraste, tamanho, distância das residências, sombreamento, o momento em que a turbina está em movimento ou parada, etc.

Bernd, 2005, afirma que, quando as turbinas eólicas são pintadas em branco (ou qualquer tom de cinza), o impacto visual será uma questão menor. Basicamente as turbinas eólicas são pintadas na cor cinza claro para fazer as lâminas da turbina se misturar como horizonte. Além disso, a cor da turbina é normalmente verde na base e gradualmente muda

para cinza na parte superior para reduzir os níveis de contraste. Isso conseqüentemente reduz o impacto visual [Arne, 2003].

Os efeitos do impacto visual têm sido minimizados, principalmente, com a conscientização da população local sobre a geração eólica. Através de audiências públicas e seminários, a população local passa a conhecer melhor toda a tecnologia e, uma vez conhecendo os efeitos positivos da energia eólica, os índices de aceitação melhoram consideravelmente.

3.10.4 Impacto sobre a fauna

Os impactos sobre a vida selvagem podem ser classificados em diretos e indiretos. O impacto direto é a mortalidade por colisão, enquanto os impactos indiretos são a evasão, a perturbação do *habitat* e deslocamento. No entanto, os efeitos são menor e sem comparação com outras fontes de energia [Magoha, 2003].

Muitas vezes, pássaros colidem com estruturas com as quais têm dificuldade de visualização, tais como torres de alta voltagem, mastros e janelas de edifícios. Os pássaros também morrem devido a vários outros motivos, entre eles, o tráfego de veículos em auto-estradas e caçadas. O comportamento dos pássaros e as taxas de mortalidade tendem a ser específicos para cada espécie e também para cada lugar. Estimativas de mortes de pássaros nos Países Baixos (Fig. 3.16) causadas por várias ações diretas e indiretas do homem, mostram que o tráfego de veículos apresenta uma taxa que, em comparação às estimativas de mortes por parque eólico de 1 GW, é cem vezes maior. [EWEA, 1998].

Geralmente, as turbinas eólicas afetam aves de uma das seguintes maneiras [Drewitt, 2006; Madders e Philip, 2006; Ruiz et. al., 2005].

- fatalidades devido a choque elétrico;
- fatalidades devido à colisão com as pás das turbinas;
- a instalação de parques eólicos em áreas importantes para as aves, como rotas migratórias ou de procriação;
- perda ou perturbação de hábitat na proximidade de turbinas.

Há um número considerável de estudos sobre os impactos dos parques eólicos sobre a fauna. Em geral, turbinas eólicas em condições específicas podem constituir um sério perigo para as aves. Está provado que as áreas com fortes correntes de ar são usados como passagens

por aves, especialmente as migratórias. A instalação de turbinas eólicas nessas áreas cria um risco potencial de colisão com aves [Hüppop et. al., 2006].

Entretanto, vários estudos, como os de Larsen e Guillemette, 2007, de Barrios e Rodriguez, 2004, Fielding et. al., 2006, e de Lucas et. al., 2004, concluem que as turbinas eólicas não constituem uma séria ameaça para as aves, conforme pode ser visto na Fig. 3.16, principalmente porque as aves em geral, têm a capacidade de detectar as turbinas eólicas em tempo e mudar seu caminho. Outro argumento é que os parques eólicos afetam aves significativamente menos do que vários outras atividades humanas [The National Research Council, 2006],

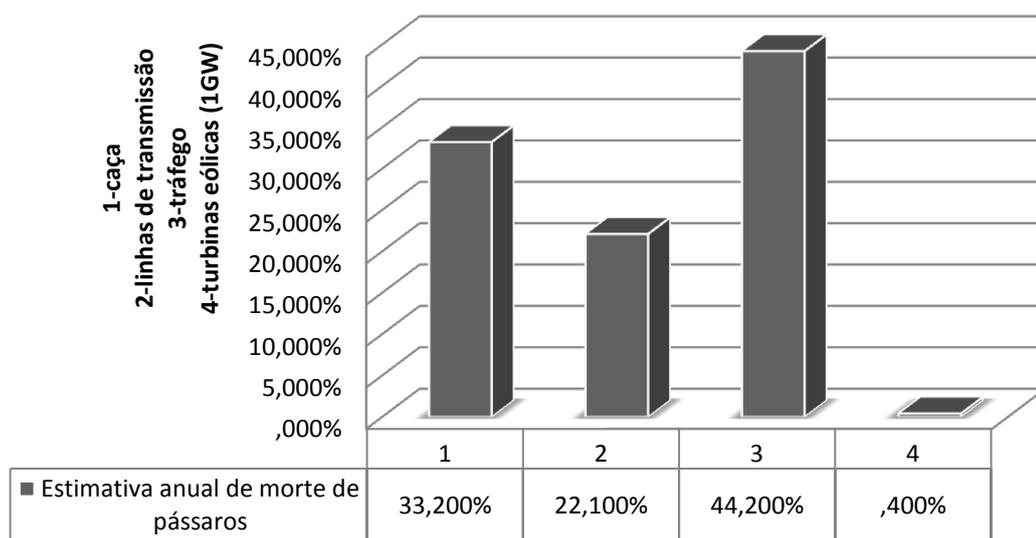


Figura 3.16 – Estimativa de morte anual de pássaros nos países baixos

Ambas as categorias de artigos concluem que, a fim de eliminar a probabilidade de prejudicar o meio ambiente natural de forma significativa, um parque eólico deve ser projetado de forma adequada e todos os possíveis impactos sobre as aves devem ser previamente examinados.

4 MODELAGEM NUMÉRICA E MATEMÁTICA

Este trabalho utiliza ferramentas computacionais para solução das equações do escoamento ao redor de prédios em áreas urbanas.

Para caracterizar o escoamento do ar em áreas urbanas utiliza-se a solução numérica das equações de Navier-Stokes, com médias de Reynolds e simulação de grandes escalas, como ferramenta de trabalho. As modelagens, numérica e matemática, utilizadas são descritas ao longo deste capítulo.

4.1 Equações fundamentais

As equações fundamentais utilizadas resultam da aplicação de princípios físicos de conservação para uma porção de fluido contida numa certa região do espaço (volume de controle). No âmbito deste trabalho a discussão será limitada a escoamentos incompressíveis de fluidos Newtonianos.

Da aplicação do princípio de conservação de massa resulta a equação da continuidade, apresentada em notação tensorial e num referencial com velocidade constante [Hoffmann et. al., 1996]

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (4.1)$$

onde x_i são as coordenadas do referencial Cartesiano, u_i , as componentes da velocidade.

O princípio da conservação de quantidade de movimento resulta nas equações de Navier-Stokes ou de transporte de quantidade de movimento, que no caso de um referencial com velocidade constante é dada pela Eq. 4.2

$$\frac{\rho \partial(u_i)}{\partial t} + \frac{\rho \partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad (4.2)$$

onde u_i e u_j são os campos de velocidade nas direções principais, P é o campo de pressão, t é o tempo, τ é o tensor das tensões viscosas e ρ é a massa específica. $i, j = 1, 2, 3$.

Como o fluido é Newtoniano, existe uma relação linear entre o tensor das taxas de deformação, mostrada na Eq. 4.3. E o tensor das tensões viscosas é dado pela Eq. 4.4

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.3)$$

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} \quad (4.4)$$

A Eq. 4.1 representa o princípio da conservação de massa e a Eq. 4.2 representa o princípio da conservação do momentum. Trata-se de um sistema em três dimensões, com quatro variáveis e quatro equações, constituindo um sistema fechado.

As equações apresentadas foram derivadas primeiramente por M. Navier em 1827 e, por S. D. Poisson em 1831.

Uma vez que a hipótese de Stokes é arbitrária, não é necessariamente certo que as equações de Navier-Stokes forneçam uma descrição real do movimento de um fluido [Schlichting, 1960]. A não linearidade faz a maioria dos problemas serem difíceis ou impossíveis de resolver. Dessa forma, a solução do sistema de equações apresentado vem sendo buscada através de métodos numéricos.

O método utilizado neste trabalho é baseado em volumes finitos e tem como objetivo as soluções das equações diferenciais contínuas de forma discreta para cada ponto de uma malha. Essa técnica de solução consiste na divisão de um domínio contínuo em pequenas sub-regiões, chamadas de volume de controle, onde são resolvidas as equações governantes do problema de forma discreta [Maliska, 2004; Patankar, 1980].

4.2 Metodologia RANS

A metodologia RANS é baseada na decomposição das componentes de velocidade em uma parte média e outra flutuante. Aplicando a filtragem temporal às equações de Navier-Stokes, surge do termo não linear da equação de movimento um tensor extra, o chamado tensor de Reynolds. Modelando este tensor, pode-se realizar o fechamento das equações. Muitos modelos RANS foram desenvolvidos a partir da decomposição proposta por Reynolds, sendo essa metodologia dominante nas aplicações de modelagem da turbulência para escoamentos industriais. Modelos algébricos e modelos a uma equação ou a duas equações de transporte são os mais encontrados.

Modelos a duas equações de transporte são largamente aplicados a escoamentos industriais. O modelo k- ϵ é o mais utilizado, porém autores como Wilcox, 1998, condenam o seu uso e destacam sua deficiência na descrição de escoamentos com gradiente adverso de pressão, não apresentando reais vantagens nem mesmo sobre os modelos algébricos. Já o modelo k- ω apresenta bom desempenho em escoamentos do tipo camada limite com gradiente adverso e favorável de pressão. Porém, modelos a duas equações de transporte em geral apresentam dificuldades nos escoamentos sobre superfícies curvas, podendo, às vezes, essa dificuldade ser associada à aproximação de Boussinesq para a viscosidade turbulenta.

Apesar das dificuldades apresentadas acima, as metodologias RANS apresentam grandes atributos. Métodos RANS necessitam de malhas menos refinadas que metodologias como DNS e LES, viabilizando com isso a simulação de casos a elevados números de Reynolds. Para escoamentos parietais, tais como aerofólios ou mesmo aeronaves completas, são ainda superiores ou mesmo a única alternativa viável para números de Reynolds reais.

A partir das equações de Navier-Stokes para escoamentos laminares, Reynolds apresentou uma abordagem estatística onde os valores de velocidade u_j , podem ser separados em uma componente de valor médio (U_i) e uma flutuação instantânea. A média desta flutuação é nula. Assim a velocidade para escoamentos turbulentos pode ser expressa pela Eq 4.5

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho (U_i U_j + \overline{u'_i u'_j}) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (4.5)$$

Reorganizando, tem-se a Eq. 4.6

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho (U_i U_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (4.6)$$

O termo obtido do lado direito da expressão acima é denominado como tensor de Reynolds, definido pela Eq. 4.7

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} \quad (4.7)$$

A decomposição de Reynolds considera que toda variável dependente pode ser decomposta em uma parte média temporal e uma parte flutuante. A consequência imediata desta decomposição e a transformação das equações originais em equações médias, é o aparecimento de um tensor adicional, conhecido como tensor de Reynolds. As tensões de Reynolds representam a recíproca dos fluxos de quantidade de movimento devido à presença das componentes flutuantes, e não as tensões propriamente ditas. Assim elas são também chamadas tensões aparentes. Sendo o tensor simétrico, há seis novas incógnitas, fazendo necessário modelar esse tensor. Trata-se de um momento de segunda ordem, o qual apareceu devido aos processos de média e de separação de escalas utilizadas. É sempre possível gerar uma equação de transporte para esse momento de segunda ordem, porém pela mesma razão, irá aparecer um momento de terceira ordem a ser modelado. Isto é conhecido como o problema de fechamento da turbulência. Um sistema de equações que possuem mais incógnitas que equações para solucioná-las. As soluções viáveis para este tipo problema são baseadas na chamada modelagem da turbulência. [Schlichting, 1960].

Em 1877, Boussinesq sugeriu que o tensor simétrico de Reynolds fosse relacionado através de um gradiente local de velocidades médias e uma viscosidade associada às condições locais do escoamento, conforme mostra a Eq. 4.8

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = -\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4.8)$$

O termo de viscosidade turbulenta é um termo adicional para modelar a viscosidade em escoamentos turbulentos ($\mu_{Total} = \mu_t + \mu$).

4.2.1 Modelo k-ε Realizable

O modelo k-ε Realizable foi desenvolvido recentemente e difere do modelo k-ε padrão por duas razões [Ansys Fluent, 2009]:

- apresenta uma nova formulação para a viscosidade turbulenta, conforme Eq. 4.9

$$\mu_t = -\rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.9)$$

- apresenta uma nova equação de transporte para a taxa de dissipação ε .

O modelo Realizable k- ε de duas equações, é baseado nas equações de transporte para a energia cinética turbulenta (k) e sua taxa de dissipação (ε). O termo Realizable se refere ao cumprimento de algumas variáveis matemáticas referentes às tensões de Reynolds. O modelo Realizable k- ε tem uma abordagem diferente para as equações baseadas na flutuação da vorticidade. Este modelo foi apresentado por Shih et. al., 1995, que propôs novas formulações para a viscosidade turbulenta e para a taxa de dissipação da turbulência.

4.3 Simulação de grandes escalas

Escoamentos turbulentos são caracterizados pela formação de turbilhões, com uma ampla gama de escalas de comprimento e de tempo [Ferziger, 1998; Piomelli, 1998]. Os maiores turbilhões são tipicamente comparáveis em tamanho com o comprimento característico do fluxo médio. As menores escalas são responsáveis pela dissipação da turbulência cinética. É possível, em teoria, para resolver diretamente todo o espectro de escalas de turbulência usa uma abordagem conhecida como simulação numérica direta (DNS). No entanto, o DNS não é viável para os problemas de engenharia práticos que envolvam altos Números de Reynolds. O custo necessário para o DNS para resolver a gama completa de escalas é proporcional ao Re_t^3 , Em que Re_t é o número de Reynolds turbulento. Claramente, em altos Números de Reynolds, o custo torna-se proibitivo. Em LES, as grandes estruturas turbulentas são resolvidos diretamente, enquanto o movimento de pequenas escalas é modelados. A lógica por trás do LES pode ser resumido como se segue:

- Momentum, massa, energia e outros escalares passivos são transportados principalmente por movimentos de grandes escalas;
- Grandes vórtices são mais dependentes do problema. Eles são ditados pela geometria e condições de contorno do escoamento envolvido;
- Pequenos turbilhões são menos dependentes da geometria, tendem a ser mais isotrópico, e são, conseqüentemente, mais universais.
- A chance de encontrar um modelo de turbulência universal é muito maior para os pequenos redemoinhos.

A simulação das grandes escalas é uma alternativa com menor esforço computacional quando comparada com a simulação numérica direta. Nesta metodologia de simulação, a dinâmica das estruturas das grandes escalas são calculadas, enquanto o efeito da turbulência das pequenas escalas é modelado, usando os chamados modelos submalha (SGS - *Sub-gridscale*).

Parte-se do princípio que pequenas estruturas apresentam comportamento mais homogêneo e isotrópico e são menos sensíveis a condições de contorno. A separação das grandes e pequenas escalas se dá através da filtragem, que normalmente está associada ao tamanho da malha, de forma que as estruturas que possuem tamanho até a ordem de grandeza da malha sejam modeladas e as estruturas maiores calculadas.

Resolvendo apenas as grandes escalas, pode-se usar uma malha mais grosseira e maiores passos de tempo (time step) em LES do que em DNS. No entanto, LES ainda requer malhas substancialmente mais refinadas do que os tipicamente utilizados para os cálculos RANS. Além disso, LES tem de ser executado para um tempo suficientemente longo de tempo de escoamento para obter estatísticas estáveis do escoamento a ser modelado. Conseqüentemente, o custo computacional envolvido com LES é normalmente ordens de magnitude maior do que para os cálculos constantes RANS em termos de memória (RAM) e CPU. Portanto, computação de alto desempenho (por exemplo, a computação paralela) é uma necessidade para LES, especialmente para aplicações industriais.

Salim et. al., 2011, em uma comparação entre o método LES e RANS, chega à conclusão que o método RANS apesar de altamente usado para simulação de escoamentos em estado estacionário, não é o método mais indicado para simular escoamento de estruturas complexas. Ressalta que a metodologia LES não só melhora de forma significativa a predição do escoamento, produzindo resultados melhores e mais consistentes, mas também fornece tempo de evolução e distribuição estatística das propriedades de escoamento. Desta forma a simulação LES pode fornecer informações importantes sobre as flutuações instantâneas.

Outro trabalho no qual são encontrados resultados promissores com a simulação de grandes escalas em comparação com RANS, é o realizado por Letzel et. al., 2008.

A separação entre pequenas e grandes escalas pode ser ilustrada através do espectro de energia cinética turbulenta em função do comprimento de onda, como pode ser visto na Fig.4.1:

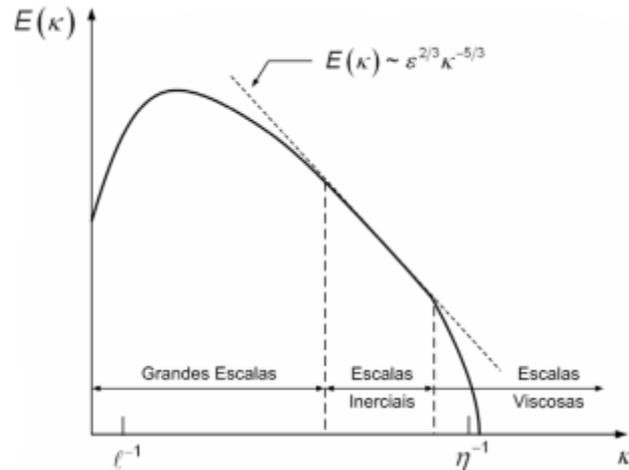


Figura 4.1 – Espectro de energia em função do comprimento de onda para um escoamento turbulento (Wilcox, 1998)

De acordo com Silvestrini, 2003, em LES as pequenas escalas são pobremente resolvidas de forma que a principal finalidade da parametrização submalha é extrair energia das grandes escalas fazendo o “papel” da cascata de energia. Do ponto de vista das flutuações das variáveis, a técnica LES pode ser situada entre a técnica DNS, onde todas as flutuações são, em princípio, resolvidas, e a modelagem RANS, onde somente os valores médios são resolvidos, enquanto as flutuações são parametrizadas [Silvestrini, 2003].

A Simulação de Grandes Escalas se aplica a escoamentos tridimensionais e transientes, assim como a DNS, entretanto ainda é necessário certo refinamento da malha. Quanto mais refinada a malha, menor será a parte do espectro sobre o qual o modelo submalha estará atuando. Dentre os modelos submalha mais usados estão:

- I. Modelo de Smagorinsky., (1963)
- II. Modelo Dinâmico, Germano et. al., (1991) – Smagorinsky-Lilly

O objetivo dos modelos submalha é simular a transferência de energia entre as escalas filtradas e as escalas submalha. Uma vez que apenas as pequenas escalas precisam ser modeladas, modelos simples podem ser desenvolvidos. Os modelos podem ser independentes da geometria, pois as pequenas escalas são de natureza mais universal que a turbulência total.

4.3.1 Equações governantes

As equações governantes mostradas abaixo são obtidas através do operador filtro espacial nas equações instantâneas da conservação de massa e da conservação da quantidade de movimento de Navier-Stokes.

O filtro espacial usado pelo programa é dado pela Eq. 4.10

$$\bar{\phi}(x) = \frac{1}{V} \int \phi(x') dx', \quad x' \in V \quad (4.10)$$

onde V é o volume do elemento.

Aplicando o operador acima mostrado nas equações de conservação instantâneas, são obtidas as equações de conservação filtradas, as quais são usadas pelo programa.

4.3.2 Equações de conservação filtradas

As equações de conservação, que governam o campo de velocidade filtrado são obtidas filtrando as equações (4.1) e (4.2) e admitindo que a operação de filtragem possa comutar com a derivação. Desta forma obtemos as Eqs. 4.11 e 4.12 para o campo resolvido

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial(\bar{\tau}_{ij} + \tau_{ij}^R)}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} \quad (4.12)$$

onde $P(x, t)$ é o campo de pressões filtrado. Essa equação difere das equações de Navier-Stokes porque o produto filtrado das velocidades $\overline{u_i u_j}$ é diferente do produto das velocidades filtradas $\bar{u}_i \bar{u}_j$. A diferença é o tensor das tensões residuais definido pela Eq. 4.13

$$\tau_{ij}^R = -\rho(\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (4.13)$$

e necessita ser modelado. O tensor anisotrópico das tensões residuais é definido pela Eq. 4.14

$$\tau_{ij} = \tau_{ij}^R - \frac{2}{3}k\delta_{ij} \quad (4.14)$$

onde $k = \frac{1}{2}\tau_{kk}^R$ é a energia cinética residual.

As equações resultantes, que descrevem a evolução espaço-temporal do movimento de grandes escalas, contêm termos envolvendo o campo das pequenas escalas, os quais não são calculados explicitamente. Estes termos descrevem os efeitos das escalas não resolvidas sobre o campo resolvido e são chamados de tensões de Reynolds de escala de submalha.

As equações filtradas para \bar{u}_{ij} Eqs. 4.11 e 4.12, não são fechadas. O fechamento é conseguido modelando o tensor das tensões residuais (ou SGS) τ_{ij} .

Apesar da semelhança formal aparente entre elas, as equações filtradas usadas em LES são muito diferentes das equações de Reynolds: os campos envolvidos $\bar{u}(x, t)$, $\bar{P}(x, t)$ e $\tau_{ij}(x, t)$ – são tridimensionais e dependentes do tempo, mesmo que o escoamento seja estatisticamente estacionário ou homogêneo.

4.4 Modelos de Submalha

As Eqs. 4.11 a 4.13 descrevem o movimento das grandes estruturas turbilhonares. Nestas equações, os termos de submalha representam a interação entre os grandes e pequenos turbilhões. De um modo geral, a energia cinética é transferida dos grandes turbilhões para os pequenos turbilhões. Há, porém, um fluxo de energia em ambas as direções, embora o fluxo líquido seja usualmente na direção das pequenas escalas. Na verdade, neste processo interativo, parte da energia transferida para as pequenas escalas retorna aos grandes vórtices.

Sabe-se que, em alguns casos, o fluxo líquido pode até ser na direção das grandes escalas [Lesieur e Metais, 1996]. Conseqüentemente, os termos de escalas de submalha nas equações de governo devem representar este efeito de transferência de energia sobre as grandes escalas. Por exemplo, a inversão no sentido natural do fluxo de energia ocorre nas regiões próximas das fronteiras sólidas, onde os pequenos turbilhões, que produzem turbulência, não são resolvidos, cabendo então ao modelo SGS considerar a menor produção imposta pelo truncamento. Na situação mais comum, a transferência líquida de energia, para

os pequenos turbilhões, funciona como uma dissipação para as grandes estruturas. A energia líquida consumida não retornará e, em conseqüência, o modelo de submalha deverá ser normalmente dissipativo.

Os modelos de submalha dividem-se em quatro classes: viscosidade turbulenta, similaridade, mistos (combinam modelos de viscosidade turbilhonar e similaridade) e dinâmicos.

A hipótese de Boussinesq expressa o tensor das tensões de Reynolds submalha em função do campo de velocidades filtrado conforme a Eq. 4.15

$$\tau_{ij} = -\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4.15)$$

No processo de filtragem especial para a obtenção das equações filtradas de conservação de quantidade de movimento e da energia, para fechar o sistema de equações é necessário modelar os tensores L_{ij} e C_{ij} e também τ_{ij} mostrado acima, que foi modelado através da equação de Boussinesq.

4.4.1 Modelo submalha de Smagorinsky

O modelo de Smagorinsky (1963) é um modelo de submalha simples e tem sido tradicionalmente empregado para representar os efeitos das escalas submalha, nas simulações de grandes escalas.

Os modelos de turbulência submalha podem ou não depender do conceito de viscosidade turbulenta. O modelo de Smagorinsky utiliza o conceito de viscosidade turbulenta, dado pela Eq. 4.16

$$\nu_T = (C_s L_s)^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (4.16)$$

Onde o termo L_s é o comprimento de mistura associado às escalas submalha e definido através da Eq. 4.17

$$L_s = \mathbf{min} \left(K_v d_1 C_s \mathcal{V}^{\frac{1}{3}} \right) \quad (4.17)$$

sendo K_v a constante de Von Kármán, d a distância até a parede, C_s a constante de Smagorinsky, \mathcal{V} o volume do volume de controle da discretização e o termo \bar{S}_{ij} o tensor de deformação das escalas resolvidas, dado pela Eq. 4.18

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.18)$$

Lilly (1967) determinou o valor de C_s igual a 0,18, para a turbulência isotrópica e homogênea. No entanto este valor causa um excessivo amortecimento nas flutuações das grandes escalas em escoamentos cisalhantes ou com fronteiras sólidas, devendo o valor de C_s ser reduzido nestes casos. Resumindo, o valor de C_s não é uma constante universal, tornando-se um dos problemas mais sérios deste modelo.

Essa dependência da constante de proporcionalidade de Smagorinsky tem fortes efeitos colaterais quando tratamos com escoamentos parietais, devido aos altos gradientes de velocidade que acarretam produção excessiva de viscosidade turbulenta em função da dependência do tensor taxa de deformação. Diferentemente dos chamados modelos dinâmicos, onde a constante é função do tempo e espaço, o modelo de Smagorinsky não faz nenhuma consideração com relação à proximidade de paredes, sendo necessário adicionar uma função externa de amortecimento que leve em conta esse efeito e anule o seu valor próximo às paredes. Apesar desta limitação, o modelo Smagorinsky tem sido bastante utilizado, e é a base de outro modelo sub-malha, que será utilizado nesta dissertação, o modelo Smagorinsky dinâmico. Neste novo modelo de modelagem, o parâmetro C_s é substituído por uma função avaliada dinamicamente durante a simulação.

O modelo Smagorinsky, conforme mostrado acima apresenta inúmeras deficiências, como por exemplo, a falta de generalidade, uma vez que foi baseado nas hipóteses de equilíbrio local para turbulência isotrópica e homogênea, além de contar com a definição de uma constante fixa. Por isso esse modelo só deve ser usado em escoamentos turbulentos completamente desenvolvidos, para números de Reynolds elevados, e longe de paredes e regiões de transição.

4.4.2 Modelo submalha Smagorinsky-Lilly

O modelo submalha de Smagorinsky tem como maior limitação a representação de diferentes campos de escoamento turbulentos devido a utilização de uma única constante, tais como recirculação, escoamento próximo à parede, etc.

A fim de ultrapassar esta limitação, Germano et. al., 1991, propuseram um método de cálculo dos parâmetros dos modelos baseados no campo de velocidades, função da posição e do tempo. Esta proposta na verdade não é um modelo, mas um procedimento de avaliar os coeficientes de um modelo base, a partir das menores escalas do campo resolvido. O modelo de Smagorinsky tem sido largamente usado como modelo base.

Supõe-se que o comportamento das menores escalas resolvidas apresenta similaridade com o comportamento das escalas de submalha [Silvestrini, 2000]. O conceito fundamental do procedimento dinâmico é o uso de dois filtros com dimensões características diferentes. No primeiro filtro é usada a dimensão da malha como comprimento característico, conforme visto no modelo de Smagorinsky. Ele é denominado filtro no nível de malha e será representado por um traço acima da grandeza filtrada. No segundo filtro é usado um comprimento característico maior que no primeiro, normalmente múltiplos do tamanho da malha, sendo mais usual utilizar o dobro do comprimento característico do filtro no nível de malha. Este é chamado de filtro teste e será representado por um chapéu em cima da grandeza filtrada.

Do mesmo modo que no modelo Smagorinsky, faz-se a primeira filtragem, conforme Eqs. 4.11 a 4.15. A seguir é aplicado o filtro teste sobre as duas equações filtradas no nível de malha, acima mostradas, sendo assim obtida a Eq. 4.19

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_t} + \frac{\partial (\hat{u}_i \hat{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_i} \right) - T_{ij} \right] \quad (4.19)$$

onde T_{ij} é tensão residual baseada na dupla operação de filtragem, dado pela Eq. 4.20

$$T_{ij} = \widehat{\widehat{u}_i u_j} - \hat{u}_i \hat{u}_j \quad (4.20)$$

e a viscosidade cinemática turbulenta $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$.

Fazendo a diferença entre as duas equações que foram filtradas pelo filtro teste, encontra-se o tensor de Leonard global, dado pela Eq. 4.21

$$L_{ij} = \widehat{u_i u_j} - \widehat{u_i} \widehat{u_j} = T_{ij} - \tau_{ij} \quad (4.21)$$

Essa identidade é conhecida como a identidade de Germano e pode ser usada para a determinação da função coeficiente dinâmico de proporcionalidade. A parte anisotrópica dos tensores de Reynolds globais submalha e subteste, τ_{ij} e T_{ij} , respectivamente, são moderados através da hipótese de Boussinesq, conforme mostra as Eqs. 4.22 e 4.23

$$\tau_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} \tau_{ij} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} = -2c(\vec{x}, t) \bar{\Delta}^2 |\bar{S}_{ij}| \bar{S}_{ij} \quad (4.22)$$

e

$$T_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} T_{ij} = -2c(\vec{x}, t) \widehat{\Delta}^2 |\widehat{S}_{ij}| \widehat{S}_{ij} \quad (4.23)$$

Filtra-se τ_{ij} usando o filtro teste e obtêm-se mais uma equação, então, após manipulação tensorial das três equações e aplicando a igualdade de Germano, obtêm-se a expressão do coeficiente dinâmico, conforme mostra a Eq. 4.24

$$c(\vec{x}, t) = -\frac{1}{2} \frac{L_{ij} M_{ij}}{M_{ij} M_{ij}} \quad (4.24)$$

onde M_{ij} é definido pela Eq. 4.25

$$M_{ij} = \widehat{\Delta}^2 |\widehat{S}_{ij}| \widehat{S}_{ij} - \bar{\Delta}^2 |\widehat{S}_{ij}| \bar{S}_{ij} \quad (4.25)$$

Nas equações acima, $\bar{\Delta}$ é o tamanho do filtro no nível de malha e $|\widehat{S}_{ij}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$. E o cálculo do coeficiente dinâmico só depende das grandezas resolvidas e do duplo processo de filtragem.

O procedimento utiliza informações das escalas resolvidas não contidas no filtro de teste, para modelar a transferência de energia entre as escalas resolvidas e as escalas não resolvidas. Assumindo que as tensões de submalha obtidas com o filtro original e com o filtro de teste são similares e podem ser modeladas, usando a mesma forma funcional, e supondo ainda que os parâmetros a determinar são aproximadamente independentes da largura do filtro, expressões explícitas para os coeficientes são conseguidas [Germano et. al., 1991; Hartel e Kleiser, 1998]. Os parâmetros, a serem determinados, são agora funções dependentes tanto do tempo como da posição espacial que se devem anular nas regiões de escoamento laminar e proximidade de fronteiras sólidas. Obtendo-se, conseqüentemente, um melhor comportamento assintótico. Simular o efeito de transferência inversa de energia cinética turbulenta das escalas de submalha para as escalas resolvidas, fenômeno que aparece nas regiões de camada limite, por exemplo, era uma possibilidade que se esperava alcançar com esta técnica [Germano et. al., 1991].

O modelo de Smagorinsky utiliza o conceito de viscosidade turbulenta, como visto anteriormente. Lilly encontrou um valor de $C_s = 0,17$ para turbulência isotrópica homogênea no subdomínio inercial. No entanto, este valor foi encontrado para provocar amortecimento excessivo das flutuações em grande escala na presença de meio de cisalhamento e em escoamentos de transição como o limite próximo ao sólido, e tem de ser reduzida em tais regiões. Em suma, C_s não é uma constante universal, que é a mais séria desvantagem deste modelo simples. No entanto, valores para C_s de em torno de 0,1 produz os melhores resultados para uma grande variedade de escoamentos, e é o valor predefinido no software Fluent.

4.5 Método dos volumes finitos

O método dos volumes finitos foi originalmente desenvolvido como uma formulação especial em diferenças finitas, no qual as equações aproximadas são obtidas através de balanços de conservação de massa, energia e quantidade de movimento no volume elementar [Versteeg e Malalasekera, 1995]. No método dos volumes finitos o domínio de cálculo é dividido em volumes de controle que não se sobrepõem, onde cada um desses volumes tem dentro de si um ponto nodal.

Segundo Maliska, 2004, o método dos volumes finitos destaca-se dos demais métodos numéricos para aplicação em problemas de dinâmica dos fluidos computacional. Isto ocorre

devido à sua capacidade de tratar adequadamente as não linearidades presentes nesses fenômenos.

De acordo com Schneider, 2007, o processo de obtenção da solução numérica neste método pode ser dividido nas seguintes etapas: formulação do problema, discretização do domínio de cálculo, discretização do modelo matemático e obtenção da solução numérica.

O método dos volumes finitos é baseado na realização de balanços de massa, de quantidade de movimento e/ou energia sobre um volume de controle de determinado, onde os fluxos das variáveis em questão atravessam as faces do volume. Esse método é usado com bastante sucesso para aproximar soluções de uma grande variedade de leis de conservação. Segundo Bortoli, 2000, todos os métodos de discretização utilizados para escoamentos tendem para os seguintes objetivos:

- solução de escoamentos em geometrias complexas;
- conservação das propriedades do fluido localmente;
- redução do tempo computacional utilizado.

Segundo Piomelli, 1999, soluções analíticas e numéricas para problemas de escoamentos turbulentos podem ser obtidas através de vários níveis de aproximação, adotando-se maior ou menor descrição no detalhamento das características do escoamento.

O método dos volumes finitos utiliza a forma integral das equações de conservação como ponto de partida. O domínio é dividido em um número finito de volumes de controle e as equações de conservação são aplicadas a cada um deles. No centro de cada volume de controle há um nó computacional no qual os valores das variáveis são calculados.

Uma das grandes vantagens deste método está no fato dele poder ser utilizado com qualquer tipo de malha, sendo adequado para geometrias complexas. Além desta, o fato de ser um método conservativo por sua construção e por sua simplicidade de ser compreendido e programado, são outras vantagens do método. O algoritmo numérico consiste dos seguintes passos:

- Integração das equações governantes na forma conservativa sobre todos os volumes de controle do domínio computacional;
- Transformação da equação integral em um sistema de equações algébricas, aproximando, por diferenças finitas, os termos da equação que representam processos tais como convecção e difusão;

- Solução das equações algébricas por um método numérico.

O estudo numérico de escoamentos turbulentos, como visto anteriormente, parte das equações básicas da dinâmica dos fluidos, que são a equação da conservação de massa e da quantidade de movimento. Estas equações são deduzidas a partir da hipótese do contínuo, na qual o fluido é considerado uma distribuição contínua da matéria e todas as propriedades do fluido podem ser expressas por funções contínuas das coordenadas espaciais e temporais [Oliveira Jr., 2006].

Os parâmetros utilizados na modelagem com o programa Ansys Fluent 13.0 são mostrados na Fig. 4.2:

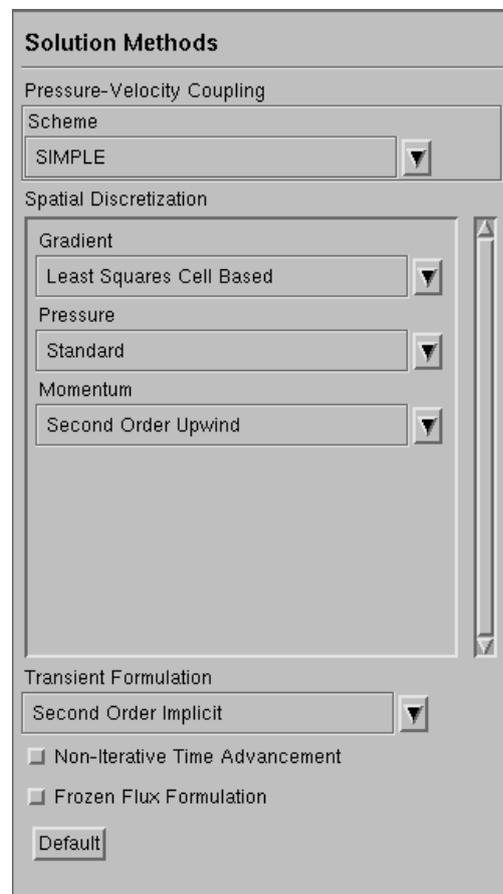


Figura 4.2 – Parâmetros utilizados na simulação de grandes escalas

5 ESTUDO DE CASO E PARÂMETROS DO PROJETO

Este capítulo descreve o experimento utilizado como referência para a avaliação das simulações numéricas e os parâmetros utilizados no projeto realizado nesta dissertação.

5.1 Trabalho experimental de referência

Os parâmetros usados no trabalho utilizado como referência para essa pesquisa estão na Fig. 5.1:

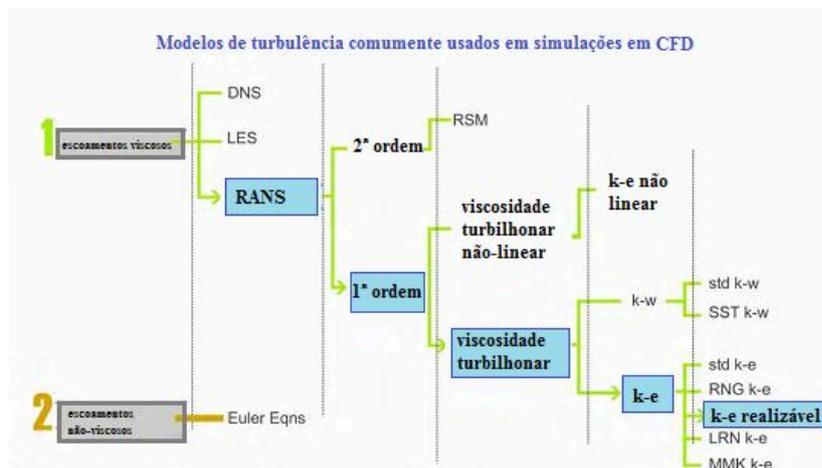


Figura 5.1 – Esquema do modelo usado na simulação em CFD no trabalho de referência.

(adaptado de Campos, 2009)

O trabalho de referência utilizado foi a tese de doutorado de Liliana Campos, “Energia eólica no ambiente construído: uma análise de design usando modelagem CFD e experimento com túnel de vento”. Em seu trabalho Campos, 2009, pesquisa o potencial de integração de pequenas turbinas eólicas verticais entre sete edifícios (medium-risebuildings). Além do estudo do escoamento do ar, ela também pesquisa sobre a melhor orientação solar dos edifícios para geração de energia fotovoltaica. Os resultados experimentais apresentados no trabalho são empregados para avaliar a metodologia CFD empregada no presente estudo, tendo em vista o comportamento do vento para geração de energia eólica em áreas urbanas. Portanto a orientação usada nesta pesquisa será a aquela para o melhor aproveitamento do vento (orientação dos prédios paralela à direção do vento), que neste caso é de 236° em relação ao norte, conforme mostra a Fig. 5.2, além da simulação do caso ótimo do trabalho de

referência para geração de energia, com um ângulo de 260° em relação ao norte, (levando em consideração a geração eólica e solar). Lembrando que, para ambos os casos, o objetivo deste trabalho de pesquisa é o comportamento do escoamento do ar.

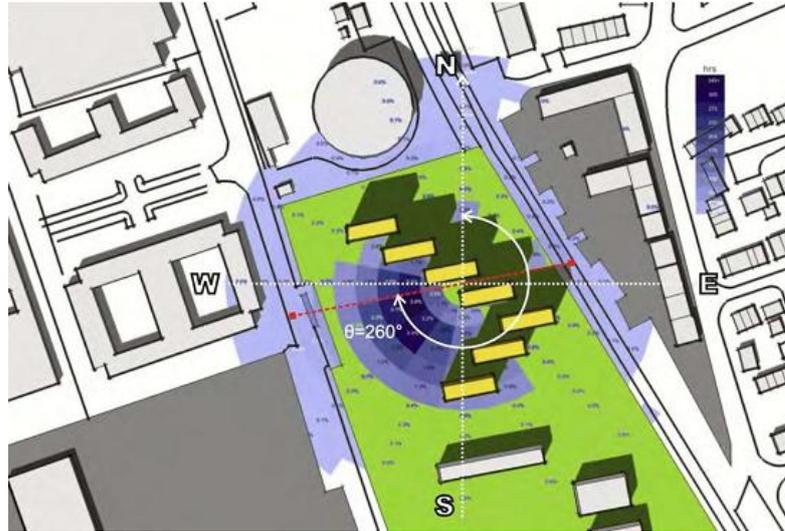


Figura 5.2 – Inclinação dos edifícios estudados (Campos, 2009)

Velocidades de vento foram medidas em torno dos sete edifícios. As medições foram realizadas para nove configurações diferentes (Fig. 5.3), usando um túnel de vento e dinâmica de fluidos computacional (CFD),

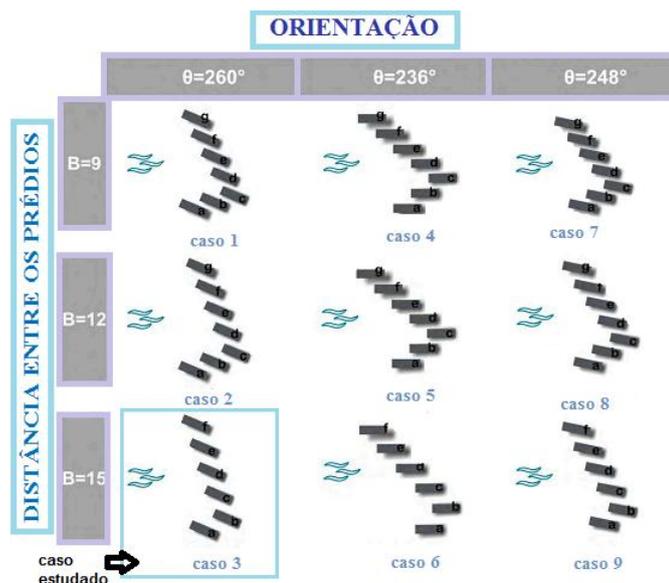


Figura 5.3 – Esquema com as configurações nas quais os prédios foram simulados (adaptado de Campos, 2009)

Os resultados calculados e medidos no trabalho de Campos, 2009, mostraram uma concordância razoável. As diferenças foram mais evidentes ao nível do solo. Estabeleceu-se que a orientação da construção e a separação entre edifícios definem, em grande parte, o comportamento do vento em torno dos edifícios. Verificou-se que a distância entre os edifícios de 15 metros e uma orientação de $\theta = 260^\circ$ produziu os fatores de aumento mais elevadas, levando em consideração a energia total gerada através da energia solar e eólica. Essa configuração produziu até 17.812 kWh em um típico ano em Nottingham, Reino Unido, utilizando seis turbinas eólicas verticais de 2,5 kW cada.

A Fig. 5.4 ilustra o modelo tridimensional do Campus Jubileu, em Nottingham, e os edifícios circundantes.

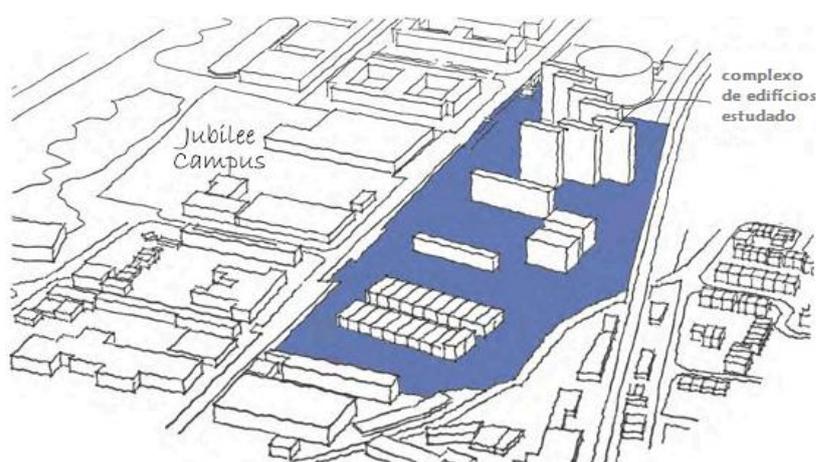


Figura 5.4 – Complexo de prédios estudados e entorno (Campos, 2009)

As três orientações escolhidas para os edifícios, no trabalho de referência, são de ventos dominantes, e vão de $202,5^\circ < \theta < 270^\circ$. No início do estudo, esperava-se que a interação entre as orientações, a separação de construção e a variação em altura iria produzir variações sobre as condições de vento que favoreceriam alguns locais mais do que outros para integração de pequenas turbinas entre os prédios. Juntamente com a orientação, a distância entre edifícios devia ser variada a fim de aumentar a velocidade do vento em alturas adequadas para situar as turbinas eólicas, evitando velocidades de vento desconfortáveis a nível de pedestres. Em termos de planejamento, a distância entre edifícios (B) determina o acesso por pedestres, bicicletas, corredores de circulação de carros, ruas e trilhas.

A Fig. 5.5 mostra uma vista aérea da área onde os edifícios são propostos em Nottingham/UK,



Figura 5.5 – Imagem aérea do local onde os edifícios são propostos (Google, 2014)

O tamanho do domínio utilizado nas simulações do trabalho de referência foi 1150 m x 704 m x 400 m. A distância de barlavento utilizada foi de 10 vezes a altura característica dos edifícios e a distância sotavento utilizada foi de 5 vezes a altura característica.

O domínio foi subdividido em duas zonas; um subdomínio menor ao redor dos edifícios a fim de gerar uma malha mais refinada próximo aos prédios e uma malha mais grosseira nos limites do domínio.

Os volumes foram entrelaçadas utilizando o esquema TGrid, o que cria uma malha que consiste principalmente de elementos tetraédricos, mas que também podem conter elementos hexaédricos ou piramidais. Os tipos de contorno do domínio deste estudo foram especificados da seguinte forma:

- Entrada: “velocity inlet” – velocidade de entrada
- Topo e lados: symmetry - simetria
- Plano de fundo: wall function – função de parede.
- Saída: outflow - escoamento de saída

5.2 Parâmetros do projeto

Neste trabalho, a simulação foi realizada pelo solver Ansys Fluent 13.0, e a geometria criada em um programa de CAD. A modelagem matemática utilizada neste trabalho foi a simulação de grandes escalas, o modelo de turbulência utilizado foi o modelo submalha dinâmico, que no caso do programa *Fluent*, é baseado no modelo submalha de Smagorinsky-Lilly. Também realiza-se a simulação via RANS com modelo k- ϵ Realizable, para comparação com os resultados do trabalho de Campos, 2009.

5.2.1 Metodologia

O presente trabalho se propõe a analisar o comportamento do vento em área urbana, ao redor de um conjunto de prédios, utilizando simulação numérica com o modelo de grandes escalas e método de volumes finitos.

A principal zona de estudo da geometria proposta é a área em torno de um conjunto de sete prédios, divididos de A até G, conforme mostra a Fig. 5.6. Os mesmos possuem uma altura de 50 m, e distam uns dos outros 15 m. Os prédios possuem uma inclinação em relação à direção do vento, que equivale a 260° em relação ao Norte, pois o vento predominante na região estudada vem principalmente das direções Sudoeste e Oeste. Os edifícios encontrados no entorno possuem do 1 ao 3, 30 m de altura, o edifício 4 possui 15 m de altura e o edifício 5 possui 40 m de altura,

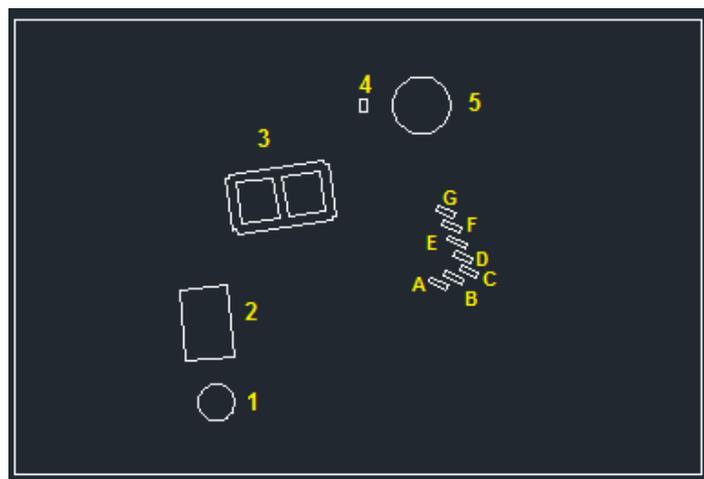


Figura 5.6 – Identificação dos edifícios (presente trabalho)

Os resultados obtidos são ainda comparados com dados de anemômetros instalados próximos ao local, coletados através do NOABL Wind Map [Drew et. al., 2013; NOABL 2014].

5.2.2 Descrição

O intervalo de tempo utilizado para a simulação é dado pela Eq. 5.1

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x_i(\text{min})}{v_o} \quad (5.1)$$

onde $\Delta x_i(\text{min})$ é a menor dimensão de um elemento na malha, v_o é uma velocidade média de referência. E o tempo médio é dado pela Eq. 5.2

$$\bar{T} = \frac{L}{v_o} \quad (5.2)$$

onde L é o comprimento da malha. Desta forma, o número de iterações será dado pela Eq. 5.3

$$n = \frac{\bar{T}}{\Delta t} \quad (5.3)$$

Utilizou-se uma malha não-estruturada tetraédrica, sendo o volume de um tetraedro dado pela Eq. 5.4

$$V_t = \frac{\sqrt{2}}{12} \cdot \Delta x \quad (5.4)$$

A partir das equações acima, calculou-se os parâmetros a serem utilizados na simulação. Os parâmetros são mostrados na Tab. 5.1

Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados na simulação em CFD

| v_o (m/s) | L (m) | \bar{T} (s) | Δt (s) | Δx (m) | V (m ³) | n (s) |
|-------------|---------|---------------|----------------|----------------|-----------------------|---------|
| 6 | 1500 | 250 | 0,5 | 3,43 | 4,77 | 1000 |

5.2.3 Critérios de convergência

Simulações de CFD são realizadas por meio da solução iterativa das equações de conservação de massa e momento em cada célula da malha. Essas iterações devem ser repetidas até que se obtenham resultados que respeitem, da melhor forma possível, o princípio de conservação em todas as células. Isso é indicado pelo resíduo do cálculo, i.e. a diferença entre a massa e o momento que entram e que deixam cada célula. O resíduo de todas as células é combinado em uma única estatística (RMS - *Root Mean Square*), que indica o nível de convergência da simulação. Nesta pesquisa foi utilizado o critério de convergência recomendado por Cost, 2004, e Ansys, 2009. Estas referências aconselham que o RMS obtido na simulação seja igual ou inferior a 10^{-4} .

5.3 Modelagem em CFD

5.3.1 Representação geométrica dos obstáculos

A geometria proposta nesta pesquisa é mostrada na Fig. 5.7. Os edifícios propostos são retangulares, por duas razões; em primeiro lugar, eles correspondem a grande maioria dos edifícios existentes, e em segundo lugar, eles representam uma oportunidade maior para a adaptação pequenas turbinas de vento, dando uma ampla aplicabilidade aos resultados desta pesquisa.

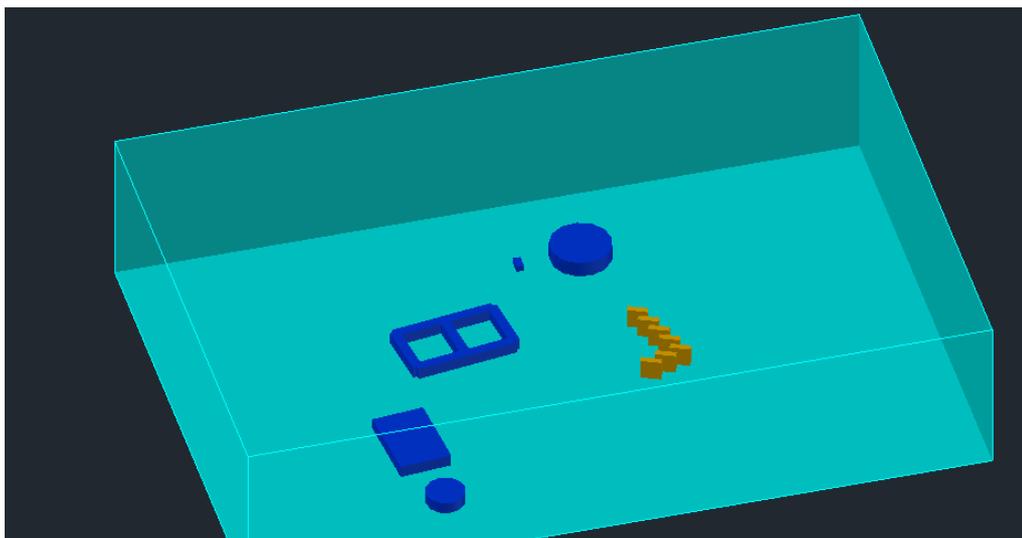


Figura 5.7 – Geometria proposta no presente trabalho

5.3.2 Dimensões do domínio computacional

As dimensões do domínio também foram modificadas em relação ao trabalho de referência. O domínio utilizado nesta pesquisa é mostrado Fig. 5.8. No qual a área dos prédios é aproximadamente 0,5% da área do domínio,

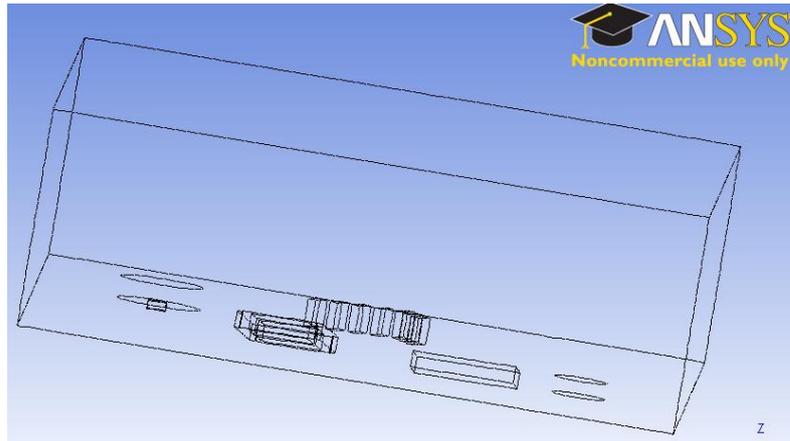


Figura 5.8 – Porcentagem da área ocupada pelos edifícios em relação ao domínio (presente trabalho)

O domínio computacional é definido como um volume com uma base retangular e altura constante. O vento, ou escoamento, entra perpendicular ao campo de entrada, e os principais edifícios têm uma inclinação de 24° em relação ao campo de entrada. O que significa 260° a partir do Norte. Isso simula a direção do vento predominante, conforma mostra a Fig. 5.9:

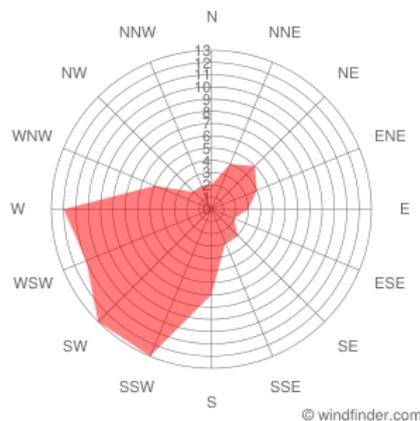


Figura 5.9 – Direção predominante do vento - Nottingham / UK

A grande distância entre o topo dos edifícios e o teto do domínio é necessária para evitar uma aceleração artificial do escoamento ao longo dos edifícios, uma vez que a maioria das condições de fronteira aplicadas ao topo do domínio não permite que o fluido o atravesse. Para edifícios únicos a parte superior do domínio computacional deve ser pelo menos $5 L$ acima do teto de do edifício, onde L é a altura do edifício. A região atrás da área construída é encerrada pelo limite de escoamento. Tominaga et. al., 2008, afirmaram que o valor para a condição de saída igual a vazão tem um valor mínimo de $10 L$ e que a expansão do domínio computacional sem representação do ambiente real pode levar a resultados irreais. A dimensão do domínio utilizada no presente trabalho é mostrada na Fig. 5.10:

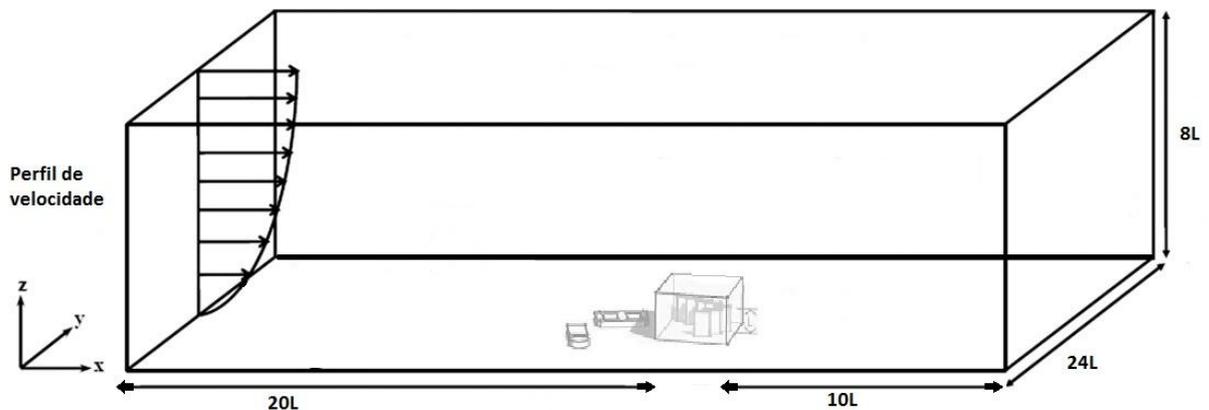


Figura 5.10 – Dimensões do domínio utilizado no presente trabalho

5.3.3 Geração de malha

Neste trabalho foi usado o software da ANSYS ICEM 13.0 para gerar a malha. É uma ferramenta que provê uma aquisição de geometria sofisticada, gerador e editor de malha e uma variedade grande de saídas para programas de pós-processamento. Neste capítulo é feita uma rápida revisão sobre malhas em geral e também sobre o processo aplicado para gerar a malha.

Uma malha é uma discretização de um espaço com dimensões definidas onde as variáveis do modelo serão calculadas. A soma de todas as malhas representa o domínio do problema cercado pelos limites do volume de controle. Segundo Ferziger et. al., 2002, existem dois tipos de malhas, estruturadas e não estruturadas:

- Malhas estruturadas – Possuem uma estrutura que segue uma ordem. Cada elemento tem o mesmo número de vizinhos, (quatro em duas e seis em três dimensões) o que permite

realizar uma numeração ordenada. A sua maior vantagem é a programação facilitada e possui matrizes de sistemas de equações algébricas também com estruturas regulares. A maior desvantagem é que podem ser aplicadas somente em domínios com geometrias simples. As malhas estruturadas geralmente são prismáticas.

- Malhas não estruturadas – Os elementos podem ter qualquer forma e não existem restrições para a quantidade de malhas vizinhas. As matrizes das equações algébricas não possuem estrutura regulares e diagonais. Isto deixa os programas em geral mais lentos quando comparados com os de malhas estruturadas. As malhas não estruturadas neste trabalho são tetraédricas.

O software ANSYS ICEM CFD não permite a importação de arquivos de superfície em formato “.dwg”, extensão padrão do AutoCAD. Por isso, o arquivo precisava ser exportado para o formato “.iges”. Foram definidos 5 grupos de superfícies, sendo eles: *inlet*, *outlet*, *symmetry*, *wall* e prédios,

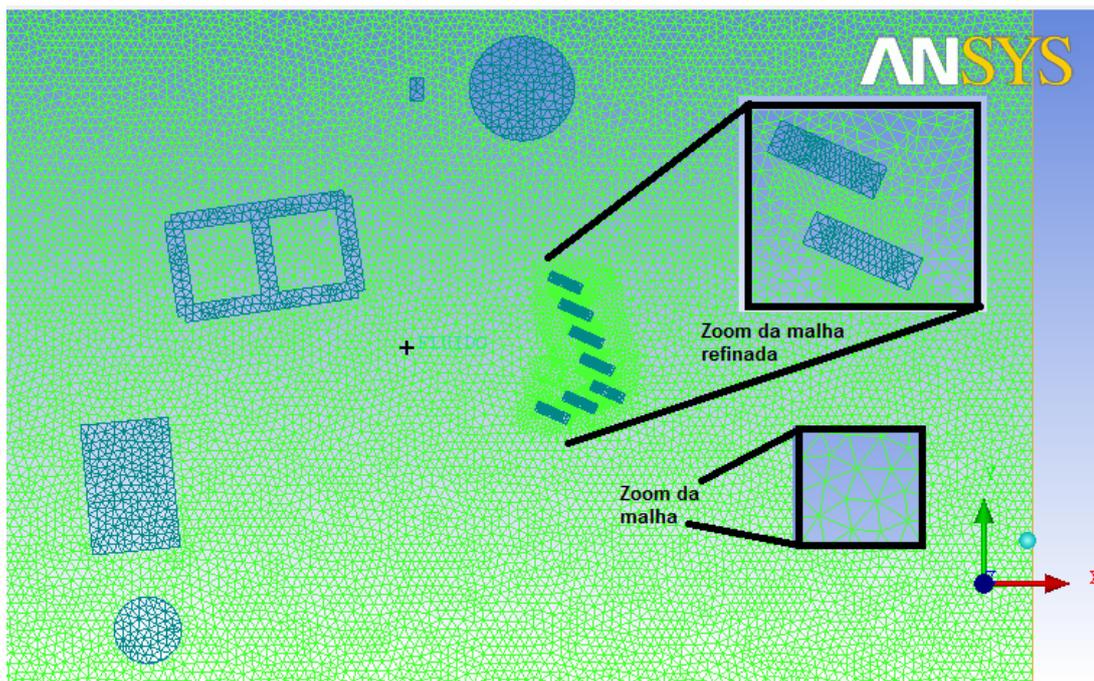


Figura 5.11 – Malha tetraédrica não estruturada (presente trabalho)

O próximo passo, após a geração da malha, é a verificação da ocorrência de erros da mesma. O próprio programa possibilita uma avaliação, indicando elementos de volume com problemas, como por exemplo, elementos duplicados, elementos isolados ou elementos que

ficam fora do domínio, entre outros. Todos estes elementos podem ser corrigidos automaticamente pelo software ou manualmente, isolando-os em uma pasta separada.

5.3.4 Definição das condições de contorno

O comportamento do escoamento no interior do domínio é influenciado pelas condições iniciais e pelas condições de contorno. Para a obtenção de resultados satisfatórios, necessita-se que estas condições sejam aplicadas em conformidade com a física do problema em estudo. A entrada do domínio é descrita pela velocidade média encontrada no local de estudo usando a condição *velocity-inlet*. A saída do domínio considera-se um escoamento livre, as laterais e o plano superior considera-se a condição de simetria e para o plano inferior considera-se paredes impermeáveis sem deslizamento. A Fig. 5.12 ilustra as condições iniciais e de contorno do problema e serão detalhadas nos próximos tópicos.

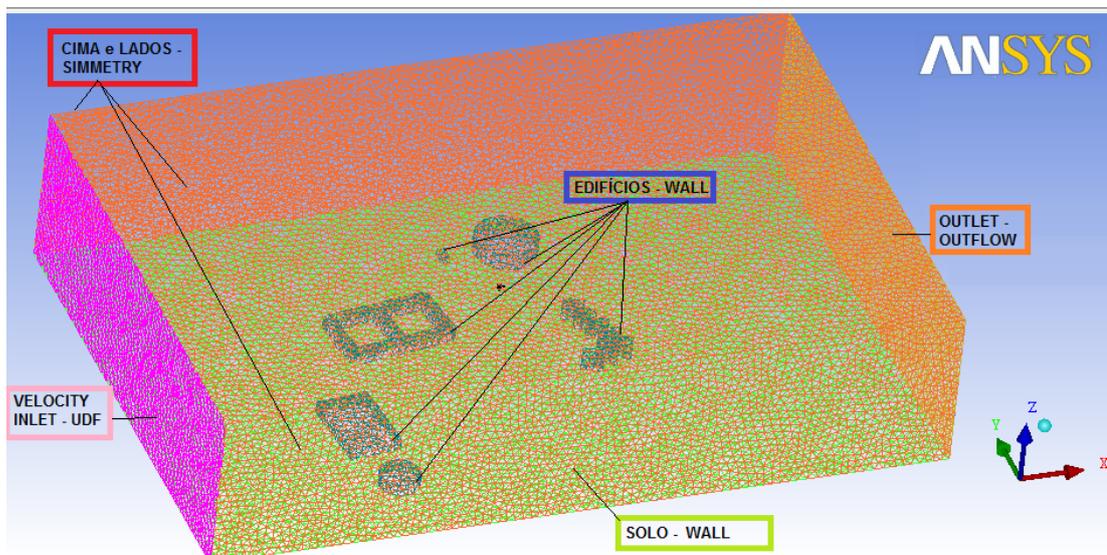


Figura 5.12 – Condições de entrada e contorno (presente trabalho)

5.3.4.1 Condições de entrada

Uma função UDF (*User-DefinedFunction*), é uma função programável que pode ser carregada dinamicamente com o *Fluent*. O código fonte de uma UDF são escritos em linguagem de programação C e podem ser editados facilmente em qualquer editor de textos.

[Ansys, 2009]. Assim através de uma UDF o programa permite inserir uma função que representa o perfil de velocidades.

O código fonte utilizado para reproduzir o perfil de velocidade na entrada do domínio é encontrado no anexo desta dissertação, e o perfil é dado pela Eq. 5.5

$$V_{Profile} = 5,4775 \left(\frac{Z}{50} \right)^{0,2275} \quad (5.5)$$

onde Z é a altura.

O perfil de velocidades calculado é mostrado na Tab. 5.2

Tabela 5.2 – Perfil de velocidades na entrada do domínio

| Altura | Velocidade |
|--------|------------|
| 10 m | 3,79 m/s |
| 20 m | 4,45 m/s |
| 30 m | 4,87 m/s |
| 40 m | 5,20 m/s |
| 50 m | 5,47 m/s |
| 60 m | 5,71 m/s |
| 70 m | 5,91 m/s |
| 80 m | 6,09 m/s |
| 90 m | 6,26 m/s |
| 100 m | 6,41 m/s |
| 400 m | 8,79 m/s |

Para reprodução do perfil de vento na entrada, seleciona-se a opção (*velocity-inlet*) do programa, que considera como condição de entrada uma velocidade prescrita nas direções x, y e z. Nas direções y e z as componentes da velocidades são nulas. Na direção x, tem-se como objetivo simular o perfil de vento que varia em função da altura.

Através do NOABL Wind Map (Fig. 5.13) analisou-se a velocidade do vento para diferentes alturas no local onde se propõe que sejam instaladas as turbinas eólicas para micro geração em zonas urbanas.

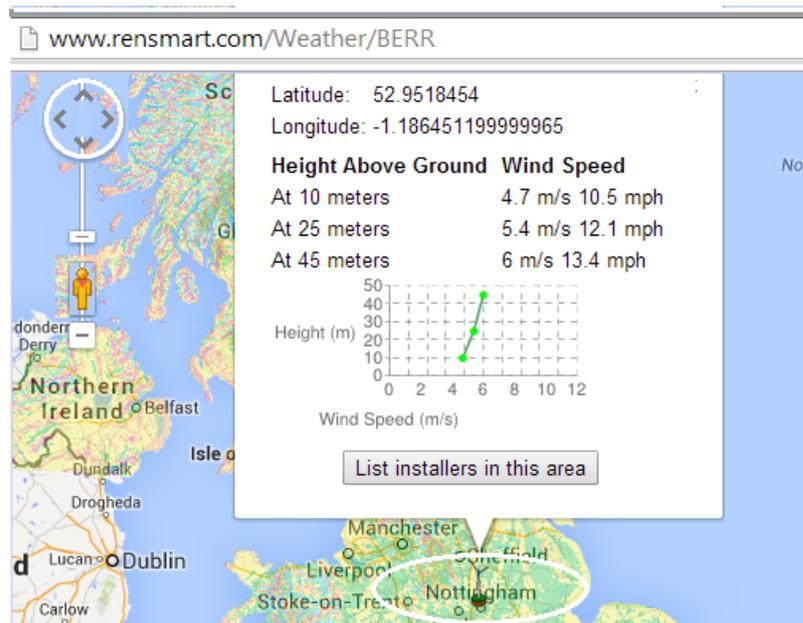


Figura 5.13 – Velocidades do vento em Nottingham (NOABL, 2014)

5.3.4.2 Condições de saída

Como condição de saída, foi selecionada a opção de escoamento livre (*outflow*) do programa. Esta opção é utilizada quando na saída do domínio as informações sobre velocidade e pressão não são conhecidos antes da solução do problema. [Ansys, 2009].

5.3.4.3 Condições laterais e de topo

Para as laterais e para o topo do domínio foi escolhida a opção de simetria (*symmetry*).

5.3.4.4 Condições de solo

É escolhida a condição de parede (*wall*) para o solo, na qual se utiliza a rugosidade padrão do programa para essa condição de contorno.

Simular escoamentos turbulentos com fidelidade é uma das principais qualidades da metodologia de Grandes Escalas (LES), sendo essas, simulações tridimensionais e transientes, e fortemente dependentes das condições de contorno impostas. Tais condições foram mantidas em relação ao trabalho de referência.

5.3.5 Discretização do domínio

Após a construção da malha, esta é importada para o programa de análise, onde serão selecionadas as condições de entrada, saída e fronteira, a escolha do modelo de turbulência e dos algoritmos de solução.

Após a definição das condições de entrada, ocorre a discretização do domínio em um determinado número de volumes e a transformação da equação diferencial parcial (EDP), que descreve o escoamento em um sistema de equações algébricas que envolvem os valores das variáveis desconhecidas em cada nó do domínio. Através do processo de discretização numérica, transformam-se as EDP's em equações numéricas que podem ser programadas e calculadas, [Stangroom, 2004].

O domínio computacional é discretizado em volumes finitos. A discretização é feita em volumes finitos tetraédricos com refinamento controlado do seu tamanho próximo a superfície do morro. Para a discretização foram criadas 4 malhas variando o número de volumes, com o objetivo de avaliar a qualidade entre elas, onde apenas uma delas será utilizada para as simulações em LES.

5.3.6 Qualidade da malha

Quatro malhas diferentes de mesma estrutura, com elementos mais ou menos refinados, são usadas para verificar a qualidade da malha. As simulações são realizadas com o software, com as mesmas condições de contorno, a fim de verificar o comportamento das malhas.

Para a escolha da malha de trabalho foi levada em conta apenas a variação entre os resultados dos parâmetros citados. A diferença percentual em relação aos valores de centro das incertezas do dado experimental, Er são descritos pela Eq. 5.6

$$Er = \left(\frac{\text{dado da malha anterior} - \text{dado da malha refinada}}{\text{dado da malha anterior}} \right) \cdot 100 \quad (5.6)$$

A Tab. 5.3 lista o número de elementos da malha com a velocidade do vento entre os prédios D-E na altura de 50 m, e também a velocidade do vento médio calculado na saída do domínio.

Tabela 5.3 – Dados da análise de qualidade da malha

| Malha | Número de volumes da malha | Velocidade a 50m Entre os edifícios D-E | Velocidade média Outlet | Tempo médio das simulações |
|-------|----------------------------|---|-------------------------|----------------------------|
| 1 | 2.455.310 | 2.7195 | 4.62388 | 7 horas |
| 2 | 4.882.781 | 6.4169 | 4.71531 | 13 horas |
| 3 | 8.999.794 | 6.5283 | 4.71913 | 24 horas |
| 4 | 12.278.629 | 6.6235 | 4.72072 | 35 horas |

A partir dos dados apresentados na Fig. 5.14, pode ser verificado que a influência da malha na velocidade média no plano de saída é desprezível. A velocidade no ponto entre prédios D-E variam abaixo de 1,5 % para as duas malhas mais refinadas. Devido ao recurso computacional que requer o método LES adotou-se malha terceira malha, com de 8.999.794 volumes.

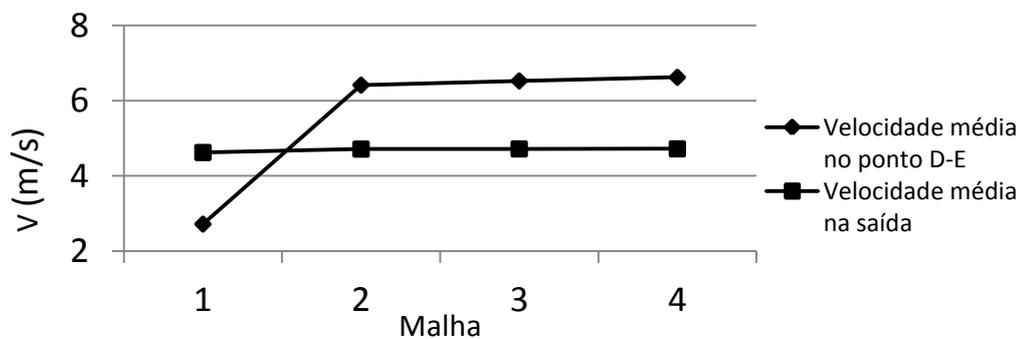


Figura 5.14 – Relação entre as velocidades para cada malha analisada

5.4 Descrição do experimento de referência

Este capítulo apresenta os instrumentos utilizados para o processo de validação dos dados obtidos neste trabalho de pesquisa. Foi utilizado para validação os dados do experimento com túnel de vento realizados no trabalho de referência "*Wind energy in the built environment: A design analysis using CFD and Wind tunnel modeling approach*" e os resultados obtidos na simulação com CFD do mesmo, o qual foi conduzido para investigar a

influência da orientação do edifício (θ) e a largura da rua (B) sobre a velocidade do vento em alturas diferentes.

5.4.1 Túnel de vento

O túnel de vento da Escola de Ambiente Construído (SBE), na Universidade de Nottingham (UoN), foi utilizado para construção do modelo de túnel de vento utilizado no trabalho de referência. O túnel de vento SBE foi anteriormente utilizado para estudos de modelos em escala de ventilação natural [Chiu e Etheridge, 2004; Yang et. al., 2006; Green et. al., 2001].

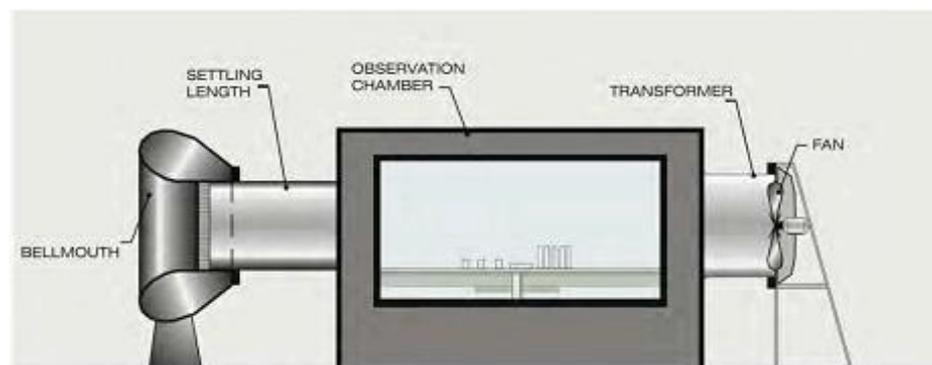


Figura 5.15 – Esquema do túnel de vento (vista lateral)

(Campos, 2009)

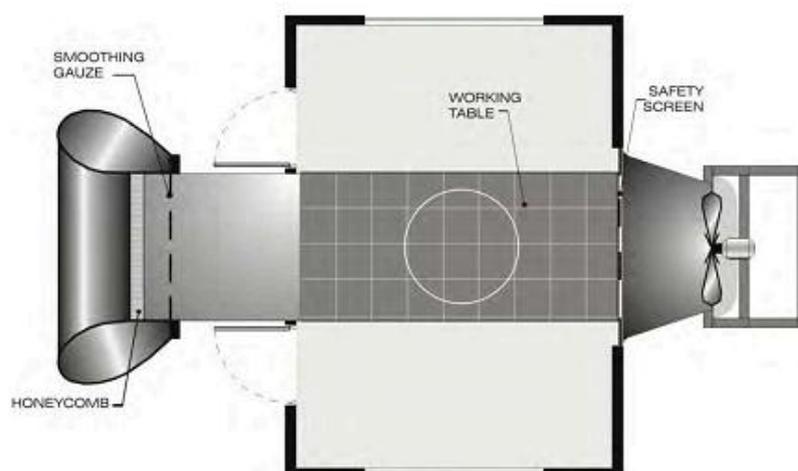


Figura 5.16 – Esquema do túnel de vento (vista superior)

(Campos, 2009)

Túneis de vento com jato aberto são menos sensíveis ao bloqueio do escoamento de vento do que túneis com seções de testes fechados. Assim, o túnel utilizado no trabalho de referência foi de jato aberto baseado no sistema descrito e utilizado por Sexton, 1968.

5.4.1.2 Medição e aquisição de dados

A velocidade faz parte das principais variáveis de medições com túnel de vento. Anemômetros de fio quente estão entre os instrumentos mais comuns para realizar medições de velocidade. No trabalho de referência, um anemômetro de fio quente padrão de temperatura constante (CTA) projetado para medições de velocidade e turbulência em escoamentos de gás com turbulência baixa e moderada foi utilizado para medições de velocidade de vento.

Os aparelhos de medição e aquisição de dados constituem uma cadeia de medições e encontra-se ilustrada na Fig. 5.17:

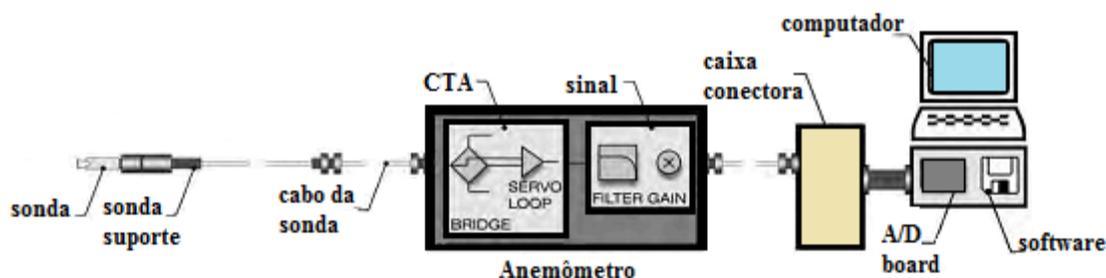


Figura 5.17 – Esquema dos equipamentos de medição e aquisição de dados (adaptado de Campos, 2009)

5.4.1.3 Instrumentação da Maquete

O layout das maquetes dos edifícios utilizados no experimento com túnel de vento no trabalho de Campos, 2009, é mostrado na Fig. 5.18:

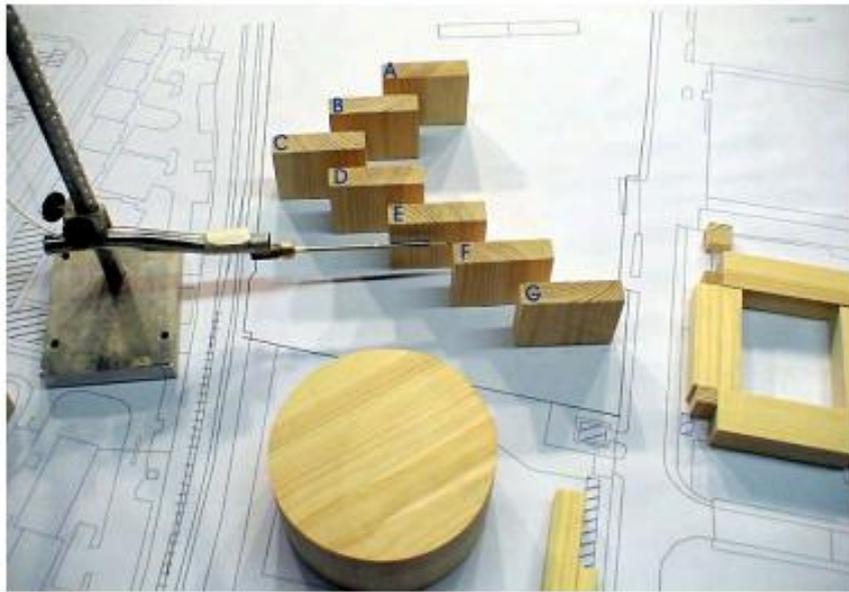


Figura 5.18 – Modelo posicionado na bancada de trabalho com túnel de vento (vista superior)
(Campos, 2009)

Um modelo do conjunto de edifícios de interesse A, B, C, D, E, F e G e seu entorno foi feito de madeira maciça em escala de 1:500. A Fig. 5.19 ilustra o modelo posicionado sobre a mesa de trabalho do túnel de vento,

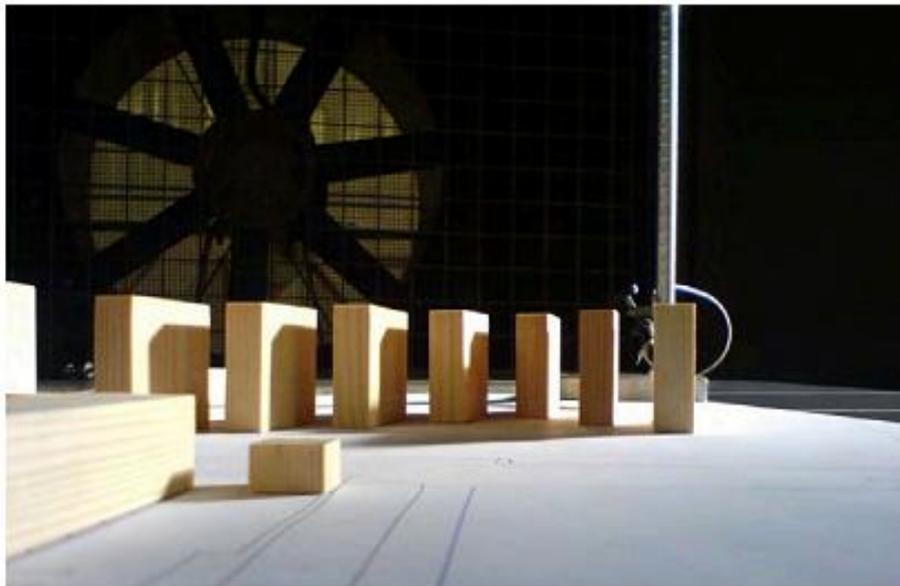


Figura 5.19 – Modelo posicionado na bancada de trabalho com túnel de vento (vista lateral)
(Campos, 2009)

5.4.2 Comparação dos Resultados

Nas cinco alturas analisadas no trabalho de referência, verifica-se que a velocidade aumenta com a altura como o esperado, mas em percentagens diferentes em cada ponto medido. Na Tab. 5.4 tem-se os resultados obtidos com túnel de vento no trabalho de referência. Na Tab. 5.5 tem-se os resultados obtidos no trabalho de referência com a simulação em CFD para o caso estudado. E na Tab. 5.6 temos os dados obtidos nesta pesquisa.

Tabela 5.4 – Medidas obtidas com túnel de vento para diferentes alturas
(Campos, 2009)

| Velocidade U/Uref | Distância entre os edifícios | Altura Z/Zref | Edifícios |
|------------------------------|---|--------------------------|------------------|
| 1,0 – 1,1 | 15 m | 1,0 | D-E |
| 0,9 – 1,0 | 15 m | 1,0 | E-F |
| 1,0 – 1,1 | 15 m | 0,8 | D-E |
| 1,0 – 1,1 | 15 m | 0,6 | D-E |
| 0,9 – 1,0 | 15 m | 0,4 | D-E |

Tabela 5.5 – Medidas obtidas no trabalho de referencia com simulação em CFD para
diferentes alturas (Campos, 2009)

| Velocidade U/Uref | Distância entre os edifícios | Altura Z/Zref | Edifícios |
|------------------------------|---|--------------------------|------------------|
| 0,9 – 1,0 | 15 m | 1,0 | C-D |
| 1,0 – 1,1 | 15 m | 1,0 | D-E |
| 0,9 – 1,0 | 15 m | 1,0 | E-F |
| 0,9 – 1,0 | 15 m | 0,8 | D-E |
| 0,9 – 1,0 | 15 m | 0,8 | E-F |
| 0,9 – 1,0 | 15 m | 0,6 | D-E |
| 0,9 – 1,0 | 15 m | 0,6 | E-F |
| 0,9 – 1,0 | 15 m | 0,4 | D-E |

Tabela 5.6 – Medidas obtidas com simulação em CFD para diferentes alturas (presente trabalho).

| Velocidade U/Uref | Distância entre os edifícios | Altura Z/Zref | Edifícios |
|------------------------------|---|--------------------------|------------------|
| 0,9 – 1,0 | 15 m | 1,0 | C-D |
| 0,9 – 1,1 | 15 m | 1,0 | D-E |
| 1,0 – 1,1 | 15 m | 1,0 | E-F |
| 0,9 – 1,1 | 15 m | 0,8 | D-E |
| 0,9 – 1,1 | 15 m | 0,8 | E-F |
| 0,9 – 1,0 | 15 m | 0,6 | D-E |
| 0,9 – 1,0 | 15 m | 0,6 | E-F |
| 0,9 – 1,0 | 15 m | 0,4 | D-E |

É realizada para validação do modelo construído para esta pesquisa, uma simulação utilizando o método matemático RANS, o qual foi o método utilizado no trabalho de referência, com todos os parâmetros de simulação utilizados no mesmo.

Os resultados foram analisados em relação aos parâmetros da velocidade. Utilizando as condições de contorno descritas anteriormente. Em um primeiro passo, compararam-se os resultados obtidos com as quatro malhas diferentes. A Tab. 5.7, mostra a comparação entre os resultados obtidos e o trabalho de referência.

Tabela 5.7 – Comparação entre os resultados obtidos e trabalho de referência

| Velocidade a 50 m para Prédios D-E (malha 3) | Velocidade a 50 m para prédios D-E (trabalho de referência) | Dados de anemômetro NOABL a 50 m | Dados túnel de vento (trabalho de referência) |
|---|---|--|---|
| 6.5283 m/s | 6.6 m/s | 6.3 m/s | 6,5 m/s |

Para verificação da qualidade da malha, tal resultado foi reproduzido com quatro malhas diferentes, a primeira com 2.455.310 volumes, a segunda com 4.882.781 volumes, a terceira com 8.999.794 volumes e a quarta com 12.278.629 volumes. Os resultados obtidos

com a terceira e quarta malha foram aproximados e compatíveis com os resultados encontrados no trabalho de referência e em dados de anemômetros para a região.

Sendo assim, a malha utilizada para realizar a simulação com o método de grandes escalas (LES) foi a de 8.999.794 volumes, de forma a reduzir o tempo de processamento da simulação, uma vez que a metodologia LES utiliza um maior tempo de processamento que o método RANS.

Em comparação com os resultados do trabalho de referência, os resultados obtidos com a simulação em CFD da presente pesquisa são muito próximos do esperado, como pode ser visto na Fig. 5.20.

Pode-se ver pelas imagens, que a distribuição de velocidade de vento em um ponto entre os prédios E-F é aproximada àquela obtida no estudo de Campos, 2009. O valor de velocidade encontrado na simulação, para o ponto em destaque, possui um valor de aproximadamente 8,72 m/s contra o valor de referência de aproximadamente 8,6 m/s.

A diferença percentual entre os valores de velocidade, para o ponto analisado, é de aproximadamente 1,4%,

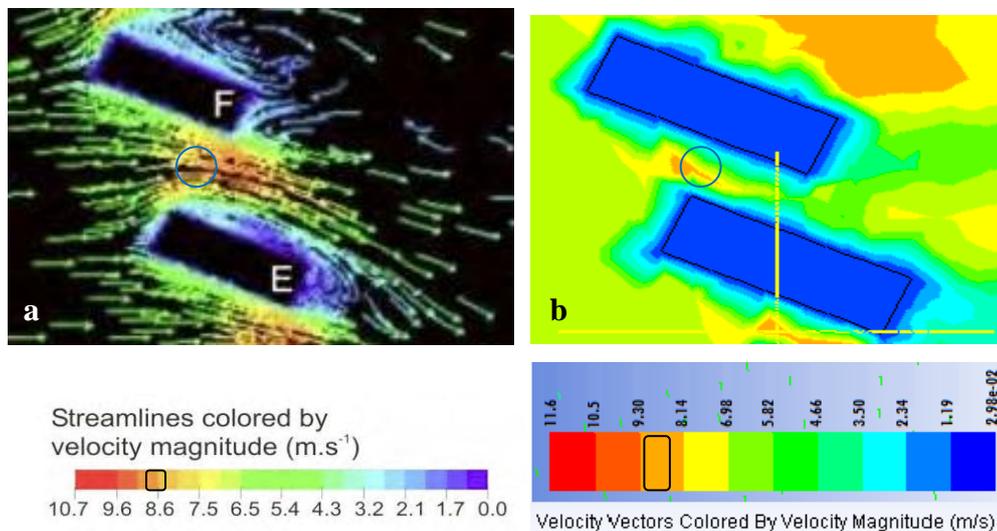


Figura 5.20 – Simulação (a) trabalho de referência e (b) presente trabalho

Desta forma considera-se que a metodologia, geometria, condições de contorno e modelagem da turbulência adotados são capazes de reproduzir os resultados de Campos, 2009. No próximo capítulo são apresentados resultados utilizando a simulação de grandes escalas.

5.4.3 Recurso computacional

Todas as simulações deste trabalho foram realizadas com o apoio do CESUP, Centro Nacional de Supercomputação da UFRGS. O Cluster Sun Fire disponibilizado pelo CESUP para as simulações possui 28 estações Sun Fire X2200+ (cada com 2 processadores Quad-Core AMD Opteron 2.2 GHz, 16 GB RAM) com performance de 1,97TFlops; 6 estações Sun Fire X2200 (cada com 2 processadores Dual-Core AMD Opteron 1.8 GHz, 8 GB RAM) com performance de 173 GFlops; 6 estações Sun Fire X4600 (cada com 8 processadores Quad-Core AMD Opteron 2.3 GHz, 128 GB RAM) com performance de 1,77 TFlops [Meira e Fernandez, 2011].

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações foram realizadas no cluster *Sun Fire* do CESUP em processadores Quad-Core AMD Opteron. O tempo de simulação para a método LES foi de aproximadamente uma semana, utilizando-se processamento paralelo, com quatro núcleos. Os resultados obtidos da simulação computacional foram analisados no ANSYS FLUENT e no ANSYS CFD-POST 13.0.

Simulações do escoamento de ar sobre a micro-região são obtidas resolvendo LES com modelo de Smagorinsky-Lilly. Velocidades em qualquer ponto sobre o domínio são obtidas. Os resultados são apresentados neste capítulo como planos de velocidade em alturas diferentes acima do solo, ou de perfis de velocidade em pontos diferentes do estudo. Um ponto importante analisado é o ponto correspondente na posição entre os sete edifícios principais, onde pode ser analisada a influência do ambiente urbano na velocidade do vento medida.

6.1 Velocidade nos planos horizontais

O comportamento do vento e perturbações devido ao ambiente urbano em diferentes alturas pode ser observado em planos de velocidade horizontal mostrados neste capítulo. A velocidade média é calculada a partir da observação de um determinado ponto no domínio em vários instantes de tempo, e observa-se a influência dos edifícios.

6.1.1 Velocidade a uma altura de 30m

As Figs. 6.1 e 6.2 apresentam o perfil médio da intensidade da velocidade a uma altura de 30 m de altura para a simulação em RANS. A Fig. 6.3 apresenta a distribuição instantânea da intensidade da velocidade do vento para a simulação em LES.

Pode-se perceber nas Figs. 6.1, 6.2 e 6.3 o efeito de esteira aerodinâmica atrás dos edifícios, além da drástica redução nos valores de velocidade. Nota-se na Fig. 6.3 (simulação em LES) que os vórtices são mais perceptíveis do que na Fig. 6.2 (simulação em RANS). Na simulação em LES, pode-se perceber também que ao lado do último edifício (G) há um aumento nos valores de velocidade, o que não acontece na simulação em RANS.

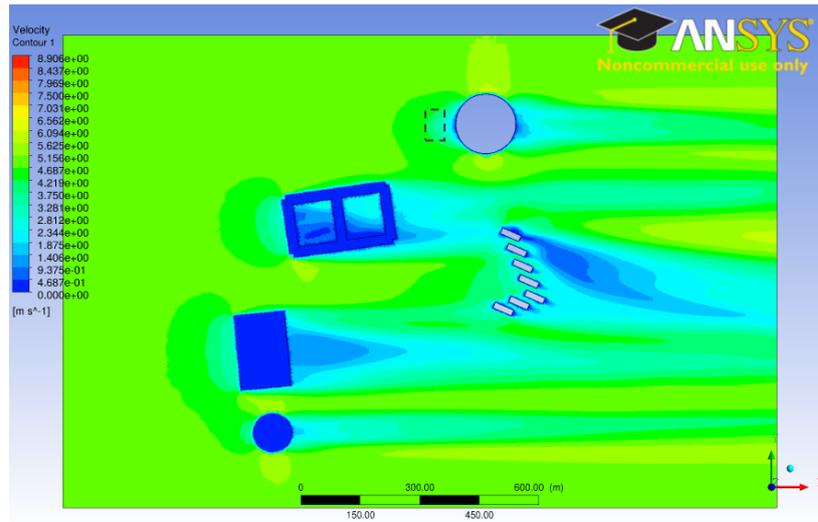


Figura 6.1 – Distribuição de velocidades a 30 metros de altura - RANS

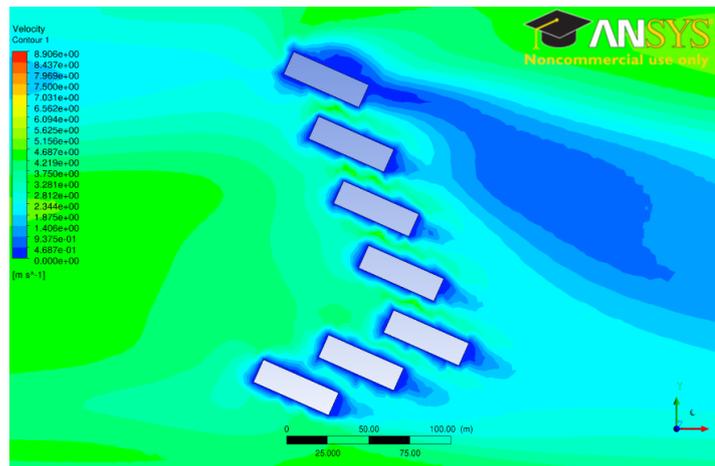


Figura 6.2 - Distribuição de velocidades a 30 metros de altura (edifícios principais) – RANS

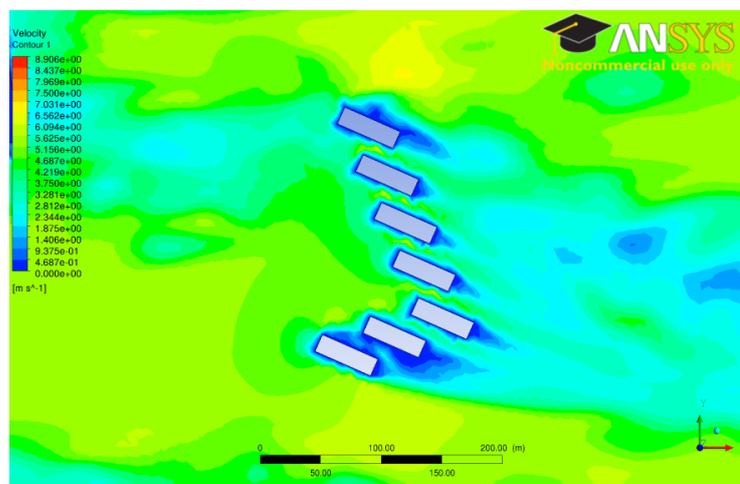


Figura 6.3 – Distribuição instantânea da velocidade a 30 metros de altura (edifícios principais - instante de tempo final) – LES

6.1.2 Velocidade a uma altura de 40m

Os pontos entre os edifícios E-F e F-G a uma altura de 40 m de altura são os mais influenciados pelas construções, como é mostrado na distribuição da intensidade da velocidade ao longo da Fig. 6.4 e da Fig. 6.5. Pode-se perceber uma redução no valor da velocidade nestes pontos. A Fig. 6.6 mostra a distribuição instantânea de velocidades a 40 metros de altura para a simulação em LES.

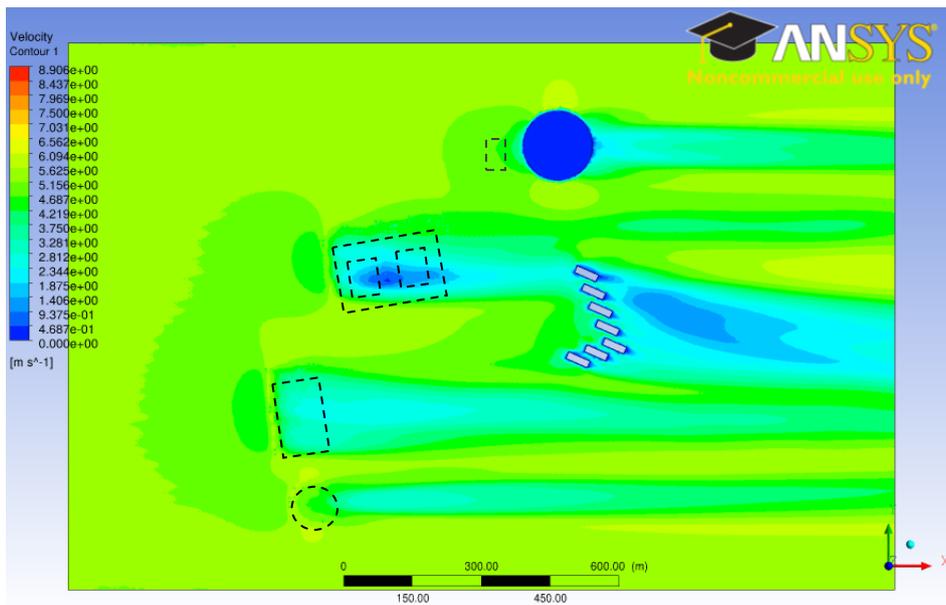


Figura 6.4 – Distribuição de velocidades a 40 metros de altura - RANS

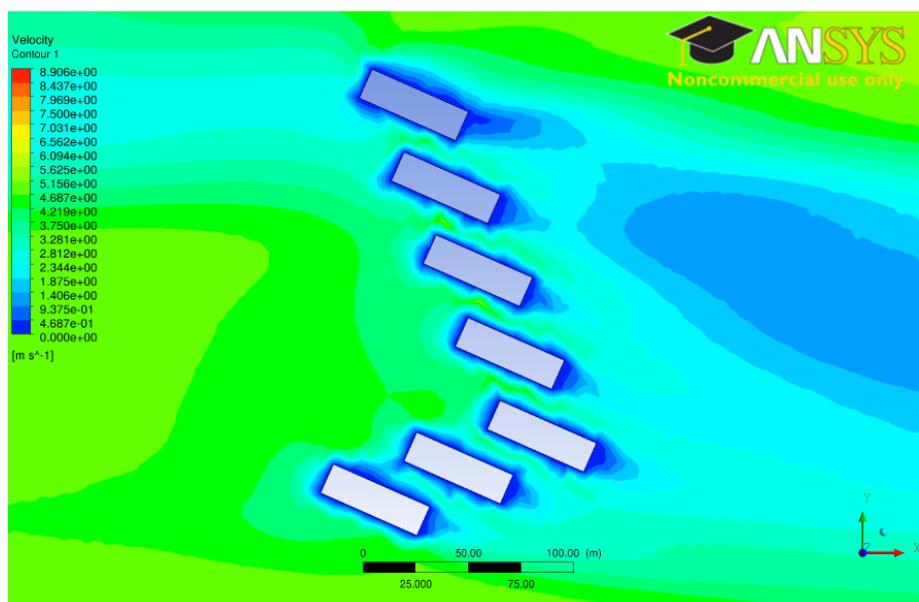


Figura 6.5 – Distribuição de velocidades a 40 metros de altura (prédios principais) – RANS

Percebe-se, comparando as Figs. 6.5 e 6.6, que a velocidade entre os edifícios para a simulação em LES possui valores maiores que a simulação em RANS.

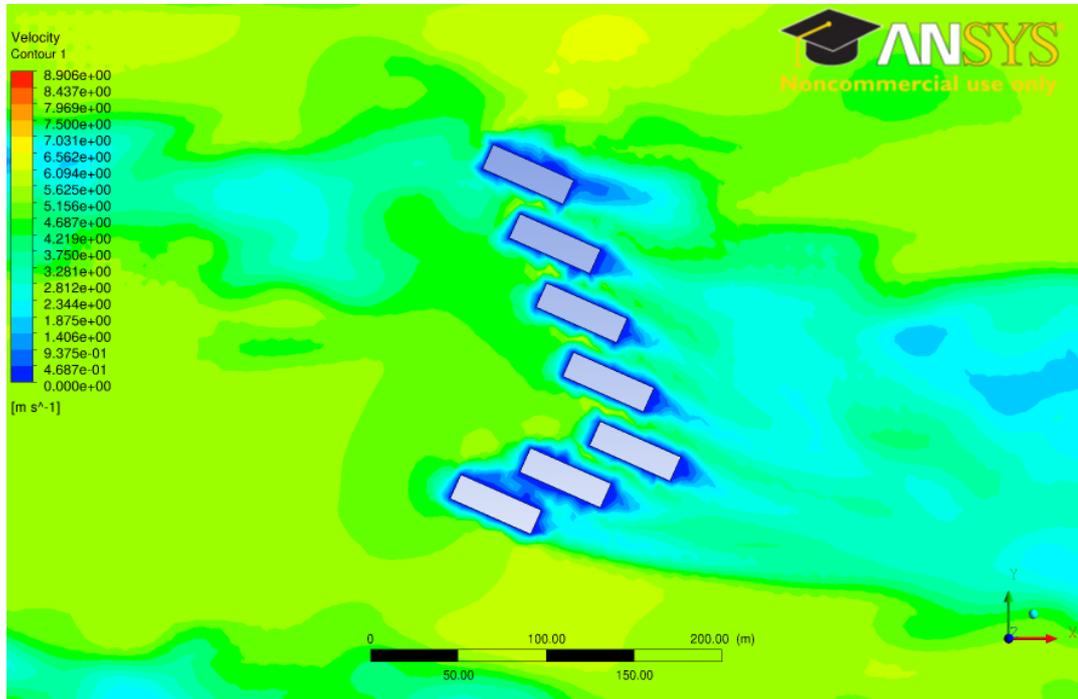


Figura 6.6 – Distribuição Instantânea de velocidades a 40 m de altura (prédios principais - instante de tempo final) – LES

6.1.3 Velocidade a uma altura de 50m

O plano de intensidade de velocidade, a uma altura de 50 m, é apresentado nas Figs. 6.7 e 6.8. Este plano está situado acima de todas as construções localizadas na área. A característica mais importante observada nas figuras é a aceleração do vento nos pontos entre os edifícios foco deste estudo, e uma redução da velocidade, após os obstáculos.

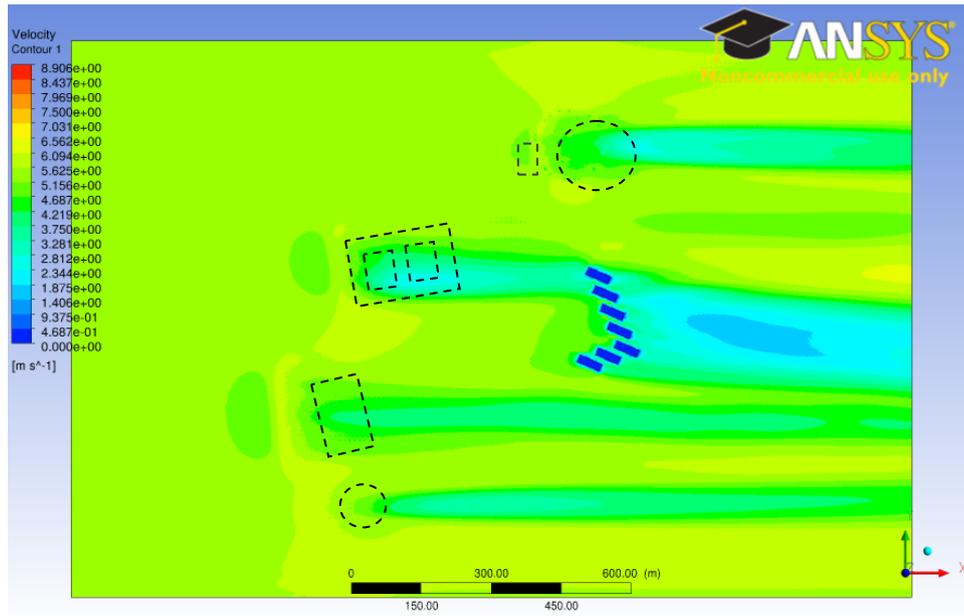


Figura 6.7 – Distribuição de velocidades a 50 metros de altura – RANS

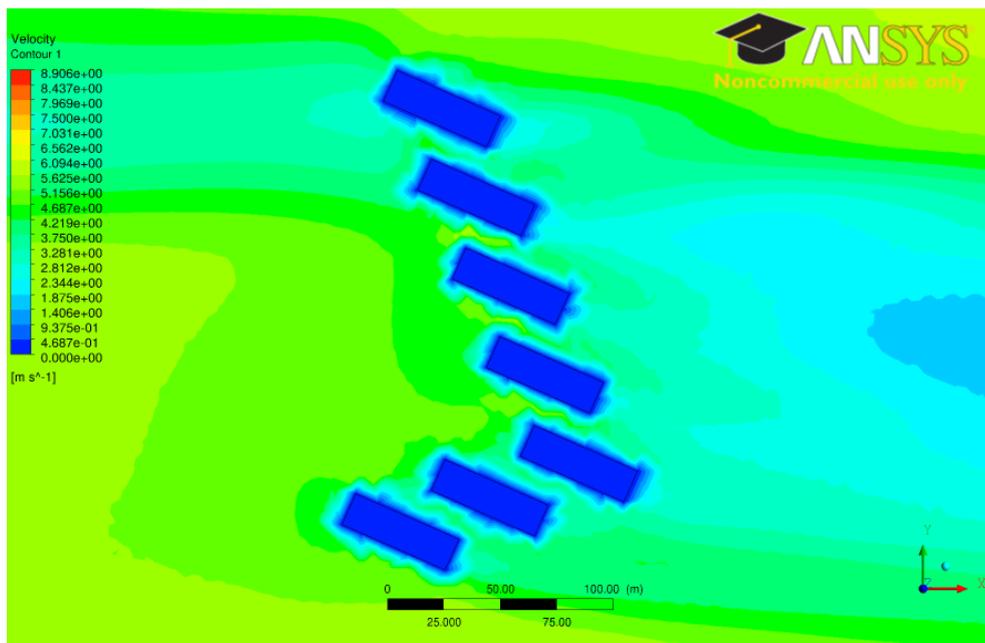


Figura 6.8 – Distribuição de velocidades a 50 m de altura (prédios principais) – RANS

As Figs. 6.9 e 6.10 mostram a distribuição instantânea de velocidades para a simulação com o método de grandes escalas.

Nota-se que na simulação em RANS há os valores de velocidade encontrados acima dos edifícios do entorno são menores que os valores encontrados para a simulação em LES.

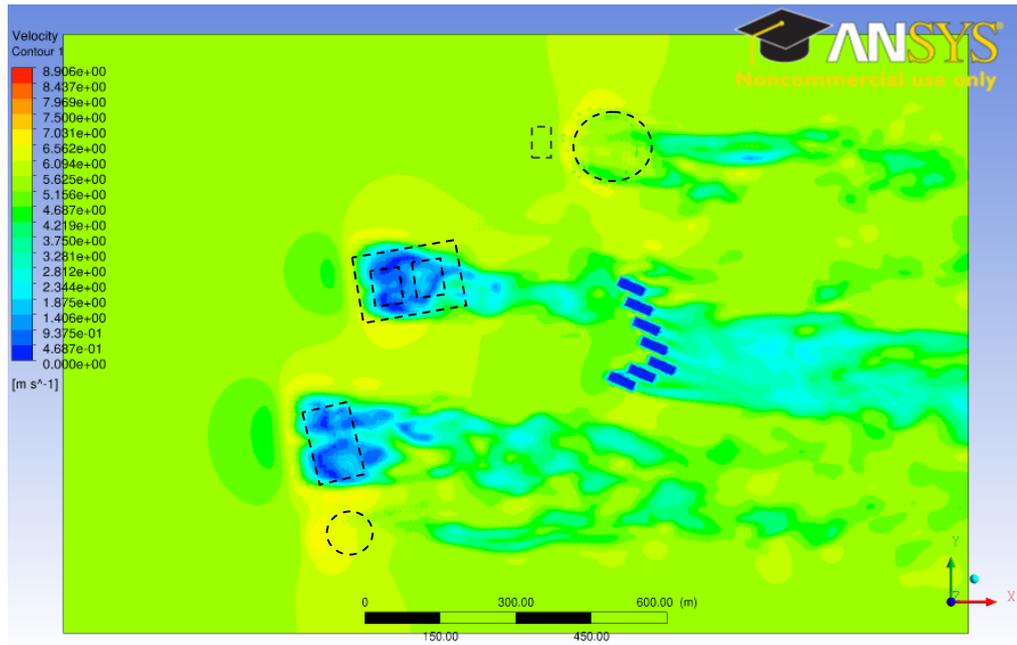


Figura 6.9 – Distribuição Instantânea de velocidades a 50 metros de altura (instante de tempo final) – LES

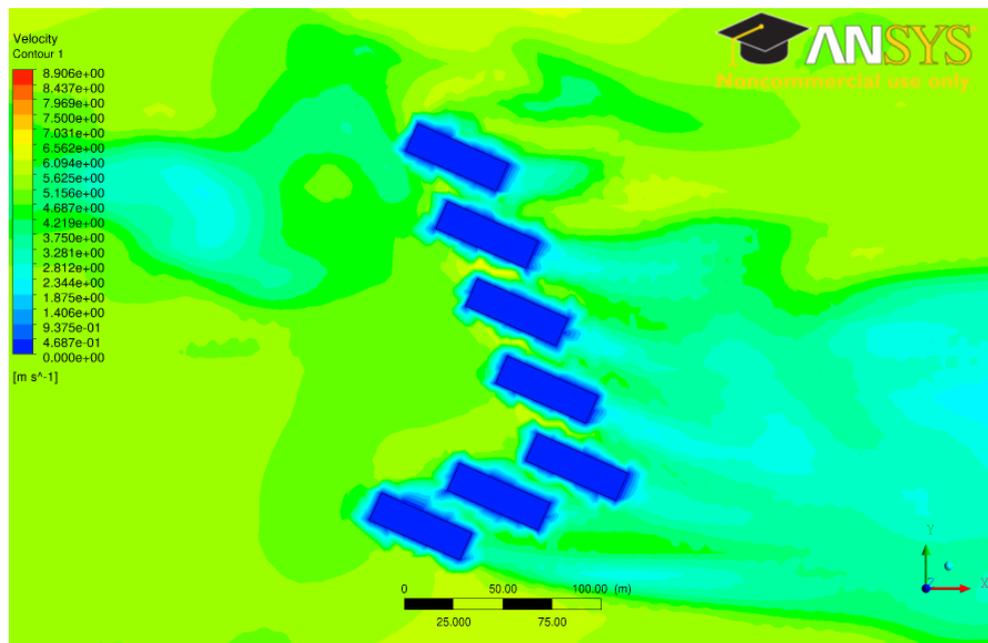


Figura 6.10 – Distribuição Instantânea de velocidades a 50 metros de altura (prédios principais - instante de tempo final) – LES

6.1.4 Velocidade a uma altura de 70m

Verifica-se que após a altura de 70 m a velocidade do vento pouco varia, se mantendo praticamente constante, conforme mostra as Figs. 6.11 e 6.12. Além disso, percebe-se que a intensidade da turbulência para alturas acima de 70 m é muito menor que no nível urbano, sobre influência das edificações.

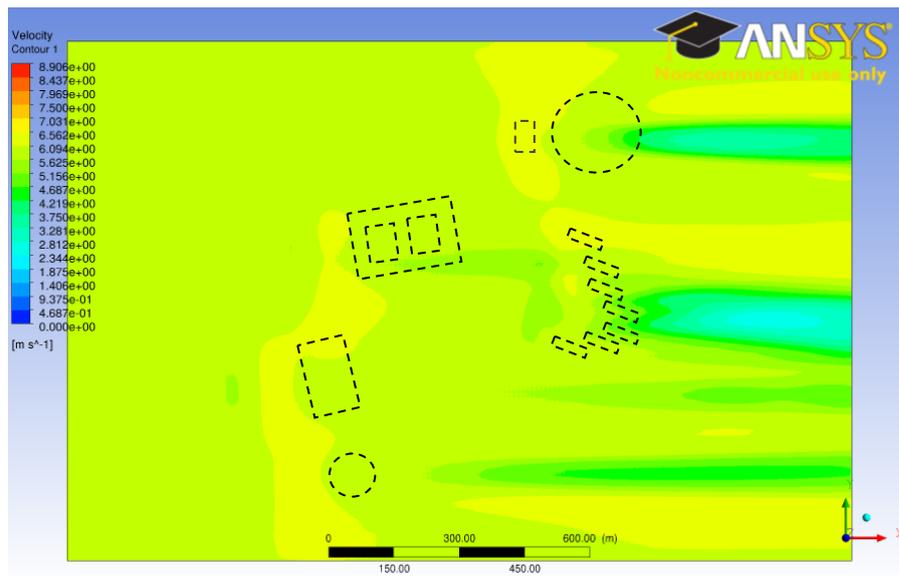


Figura 6.11 – Distribuição de velocidades a 70 metros de altura - RANS

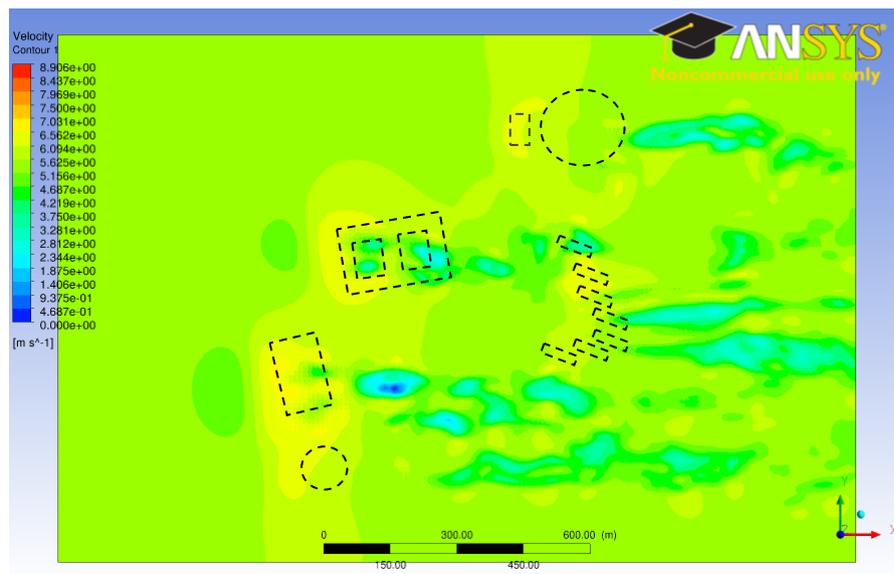


Figura 6.12 – Distribuição de velocidades a 70 metros de altura (instante de tempo final) –

LES

6.2 Perfil de Velocidade e Intensidade de turbulência

A Fig. 6.13 apresenta os perfis de velocidade no local das sete construções de 10 a 100 m acima do solo para a simulação em RANS, bem como o perfil de velocidade não perturbado, obtido nos arredores 500 m antes das construções, entre 10 e 100 m acima o solo. A Fig. 6.14 apresenta os mesmos dados descritos acima para a simulação em LES.

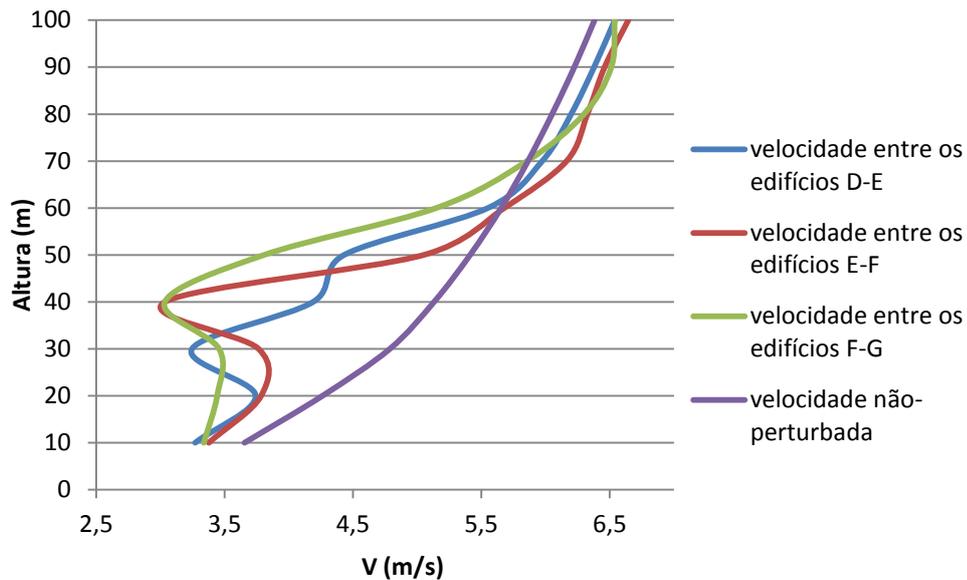


Figura 6.13 – Perfil de velocidade do vento – RANS

Percebe-se na Fig. 6.13 que a velocidade do escoamento do ar entre os edifícios sofre um decréscimo mais intenso em seu valor a uma altura de 40 metros do solo para os pontos entre os prédios E-F e F-G, o que não acontece para o ponto localizado entre os prédios D-E, que sofre uma redução em seu valor a uma altura de 30 metros.

Após 50 metros de altura pode ser percebido que a velocidade do escoamento do ar aumenta com a altura, possuindo para pontos acima de 60 metros velocidades maiores do que as velocidades encontradas em um ponto que não sofre influência dos prédios.

Pode ser percebido que há uma diferença entre os valores de velocidade encontrados para cada ponto analisado para alturas acima de 75 metros para a simulação em RANS, quando comparado com os valores encontrados para a simulação em LES, apresentados na Fig. 6.14. Para os dados obtidos para a velocidade do escoamento para o método de simulação de grandes escalas pode ser percebido que após uma altura de 75 metros, os valores

encontrados para os diferentes pontos analisados são muito próximos, com uma diferença entre 0,16% e 0,43%.

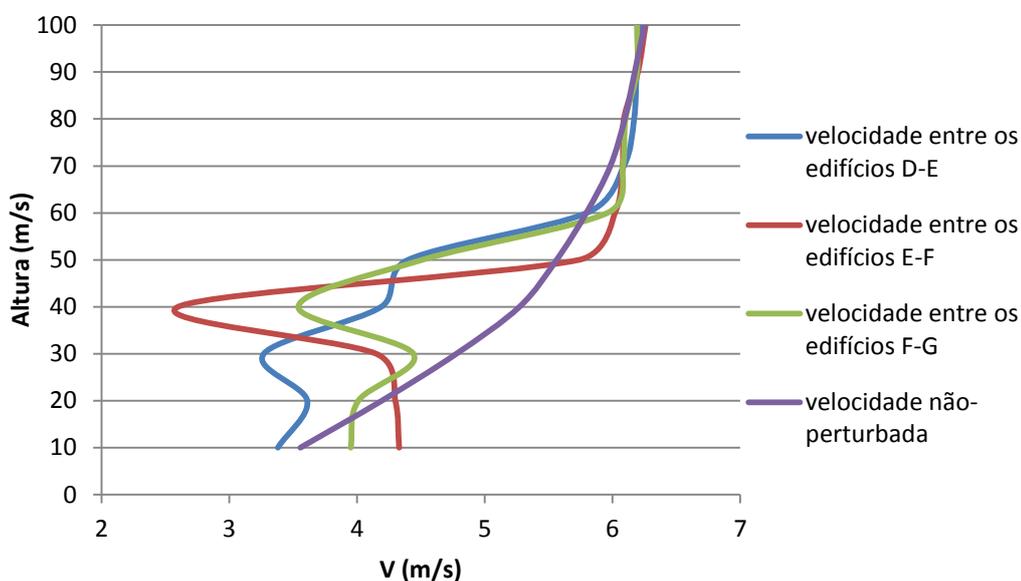


Figura 6.14 – Perfil de velocidade média do vento – LES

Pode-se notar na Fig. 6.14 que o perfil de velocidades encontrado na simulação de grandes escalas possui o mesmo comportamento qualitativo que o perfil de velocidades encontrado pelo método da média de Reynolds, contudo os valores obtidos são diferentes.

Para a simulação em LES também se obteve um aumento no valor das velocidades para os pontos localizados entre os edifícios E-F e F-G a uma altura de 40 metros, além do aumento do valor de velocidade entre os edifícios D-E a uma altura de 30 metros.

Entre 50 e 70 metros de altura, para os pontos D-E e F-G o perfil de velocidade do escoamento possui o mesmo comportamento, tanto para a simulação em RANS, quando para a simulação em LES. Entretanto pode-se perceber que para a simulação de grandes escalas foram encontrados valores mais aproximados para ambos os perfis.

É possível perceber na Fig. 6.14 através de uma comparação entre o perfil de velocidade do escoamento entre os prédios e o perfil de velocidade não perturbada (sem influência dos prédios), que a velocidade aumenta para alturas de até 20 m, quando passa entre dois edifícios altos. Este fenômeno é conhecido como “efeito túnel”. Para 10 m de altura a velocidade sofreu um aumento em seu valor de 20,27% e para 20 m sofreu um aumento de

2,38% em seu valor. A partir desta altura, o valor da velocidade entre os edifícios começa a diminuir seu valor, em relação ao perfil não perturbado do vento.

A Fig. 6.15 mostra a intensidade de turbulência x altura para a simulação em RANS nos pontos entre os prédios D-E, E-F e F-G, bem como a intensidade de turbulência em uma zona sem perturbação dos edifícios. A Fig. 6.16 possui as mesmas informações descritas acima para o método de simulação em grandes escalas.

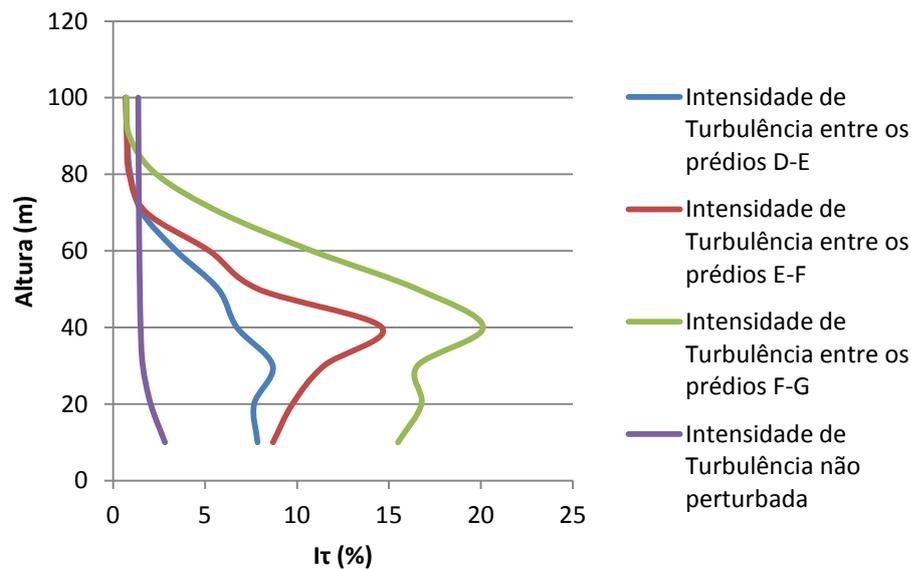


Figura 6.15 – Intensidade de turbulência – RANS

Pode-se notar que os perfis de intensidade de turbulência encontrados na simulação de grandes escalas, apresentados na Fig. 6.16, possuem o mesmo comportamento que os perfis de intensidade de turbulência encontrados pelo método da média de Reynolds, na Fig. 6.15, apesar da discrepância encontrada para algumas alturas, principalmente entre 0 m e 50 m de altura. Observa-se também que a intensidade de turbulência obtido nas simulações RANS são superiores aos valores obtidos por LES.

Apesar do aumento no valor da velocidade do escoamento para alguns pontos entre os prédios se percebe através dos resultados apresentados nas Figs. 6.15 e 6.16, que os valores de intensidade de turbulência encontrados são extremamente altos, o que indica que a instalação de turbinas eólicas entre os edifícios não é recomendada [Gipe, 2009].

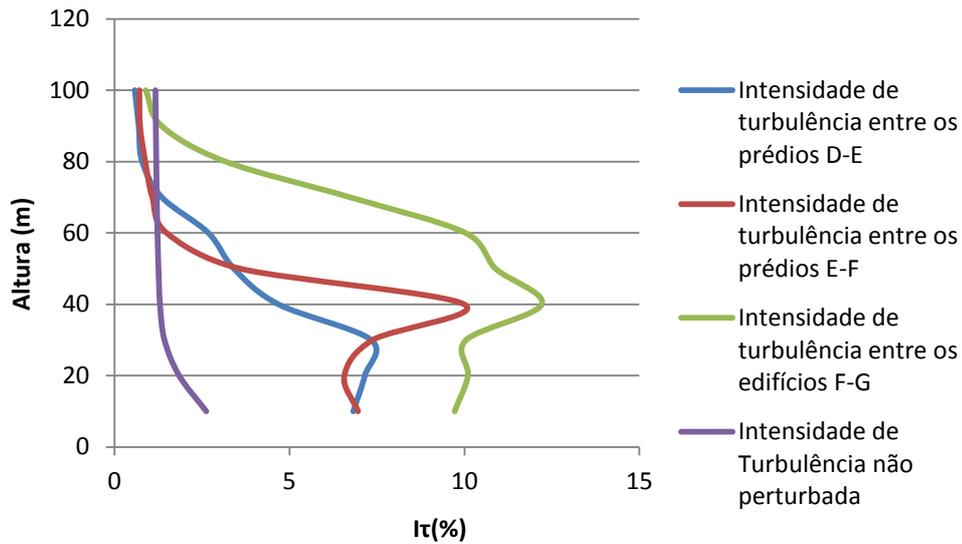


Figura 6.16 – Intensidade de turbulência – LES

Com o objetivo de verificar a malha e condições de contorno escolhidas, realizou-se uma simulação com o domínio vazio, sem a geometria proposta. Portanto, a fim de verificar se as configurações de simulação foram capazes de satisfatoriamente reproduzir a camada superficial atmosférica, um teste foi feito com o domínio vazio para avaliar o perfil de velocidade em pontos diferentes ao longo do domínio. A Fig. 6.17 apresenta valores de velocidade para diferentes alturas.

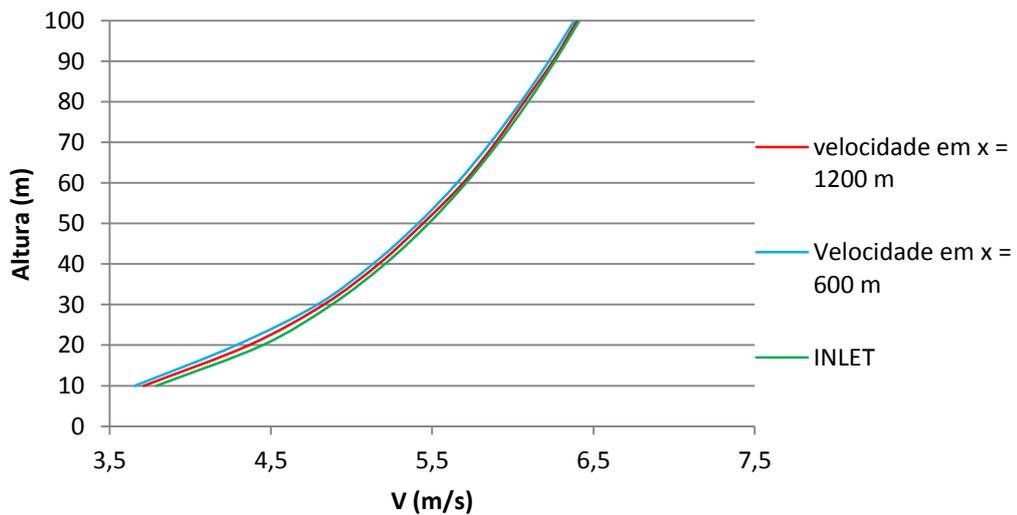


Figura 6.17 – Perfis de velocidade para domínio vazio

Em termos gerais, no caso de um escoamento de camada limite de equilíbrio homogêneo, o perfil de velocidade não deve mudar até que a área construída seja atingida [Cost, 2007].

A Fig. 6.18 mostra a comparação entre as velocidades para ambos os métodos numéricos utilizados nesta pesquisa. Observa-se que o perfil de velocidades obtido por simulação de grandes escalas apresenta um comportamento semelhante ao obtido por RANS, contudo na região acima de 80 m as velocidades obtidas por RANS continuam crescendo, enquanto as velocidades obtidas por LES demonstram uma tendência de estabilizar.

Pode ser percebido na Fig. 6.18 que além dos perfis de velocidade pela metodologia RANS e LES apresentarem o mesmo comportamento qualitativamente, também apresentam os valores de velocidade muito próximos para o ponto entre os edifícios D-E. Gerando entre todos os pontos analisados, o menor erro encontrado nesta pesquisa, ao comparar ambas as metodologias usadas. Nota-se que somente há uma discrepância nos valores para alturas acima de 60 metros.

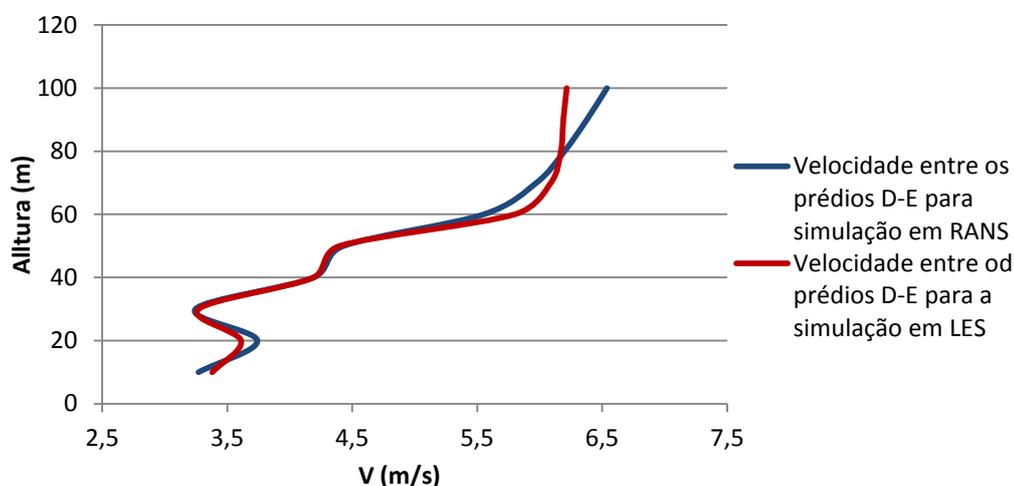


Figura 6.18 – Comparativo entre as velocidades no ponto D-E

A Fig. 6.19 mostra a comparação entre as velocidades para ambos os métodos numéricos utilizados neste trabalho para o ponto E-F. Para o ponto analisado entre os edifícios E-F, nota-se que também apresentam o mesmo comportamento qualitativo, entretanto já apresentam uma discrepância maior entre os valores de velocidade, se comparados ao ponto D-E. As diferenças encontradas são maiores para as alturas entre 10 m e 30 m.

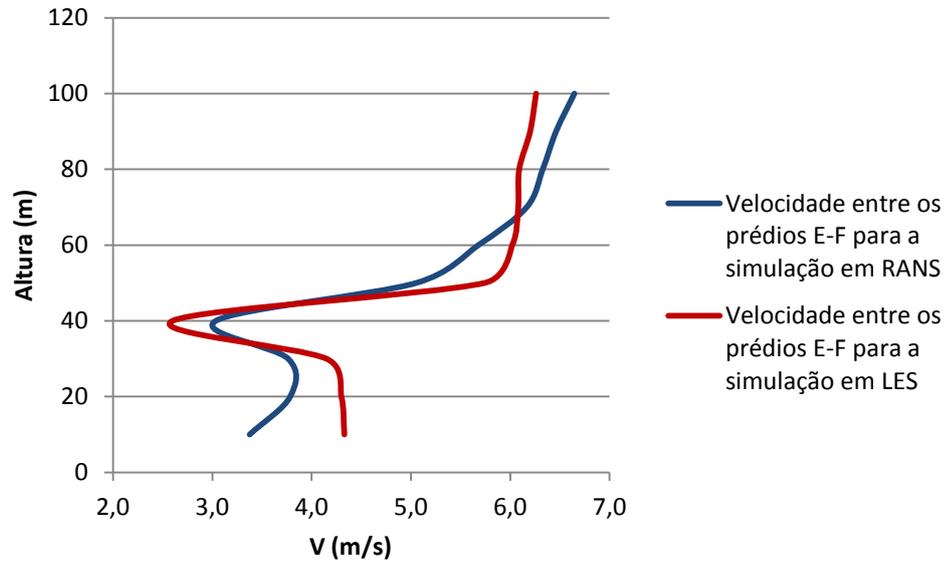


Figura 6.19 – Comparativo entre as velocidades no ponto E-F

A Fig. 6.20 mostra a comparação entre as velocidades para ambos os métodos numéricos utilizados neste trabalho para o ponto F-G. Pode ser percebido, que como no ponto entre os edifícios E-F, o ponto de análise entre os edifícios F-G, também apresenta valores mais próximos de velocidade entre 40 m e 55 m de altura. Além da discrepância entre os valores de velocidade encontrados para ambas metodologias utilizadas entre 10 e 30 metros de altura.

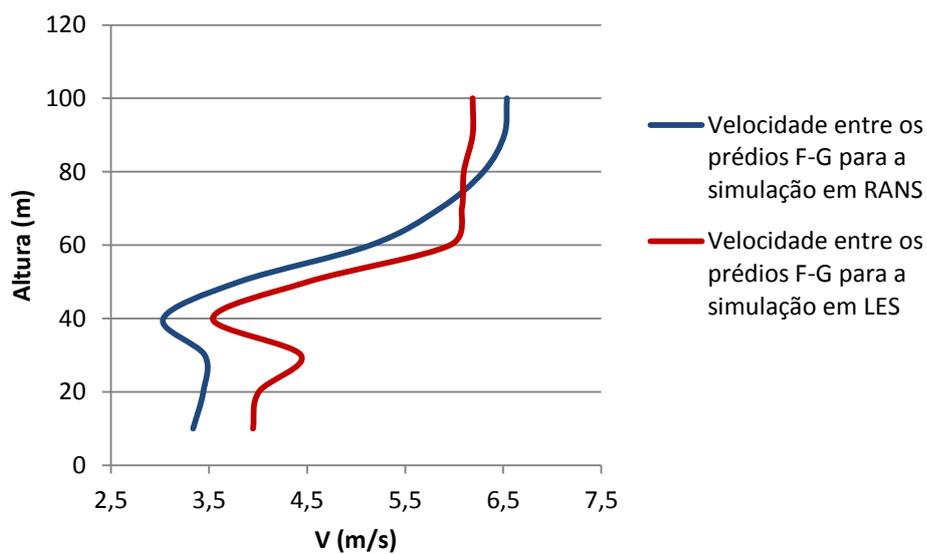


Figura 6.20 – Comparativo entre as velocidades no ponto F-G

Para os pontos analisados entre os edifícios, pode-se perceber pelas Figs. 6.19 e 6.20 que os resultados obtidos com LES possuem valores de velocidade menores para alturas acima de 70 metros, além de uma tendência à estabilização destes valores.

As Figs. 6.21, 6.22 e 6.23 mostram, respectivamente, os dados de intensidade de turbulência obtidos para ambos os métodos numéricos utilizados, nos pontos D-E, E-F e F-G.

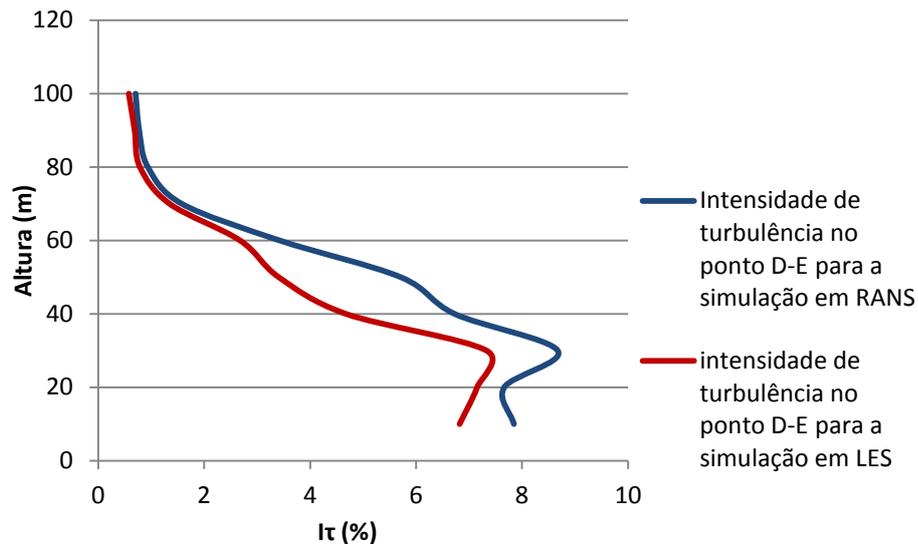


Figura 6.21 – Comparativo entre as intensidades de turbulência no ponto D-E

Pode-se notar nas Figs. 6.21, 6.22 e 6.23 que a partir de 70 m de altura os valores encontrados para as intensidades de turbulência atingem valores muito próximos para ambos os métodos analisados. É importante observar que a partir desta altura não há mais influência significativa dos prédios.

As maiores discrepâncias entre os valores encontrados para ambos os métodos utilizados ocorrem onde há maior influência dos prédios, ou seja, próximo de 60 m de altura.

Nota-se também, que para a simulação em RANS, os valores de intensidade de turbulência são superestimados em relação aos valores encontrados com a simulação de grandes escalas.

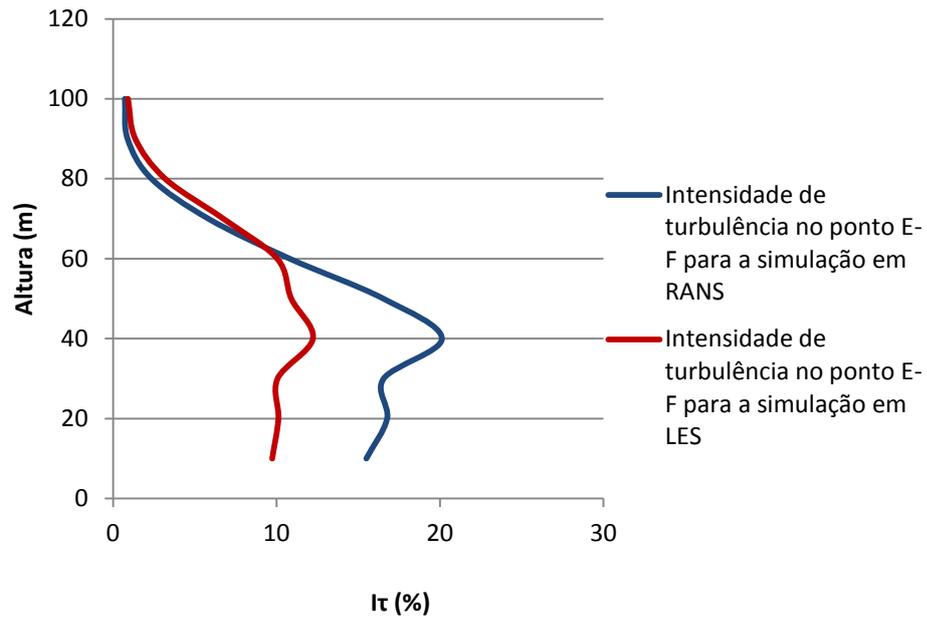


Figura 6.22 – Comparativo entre as intensidades de turbulência no ponto E-F

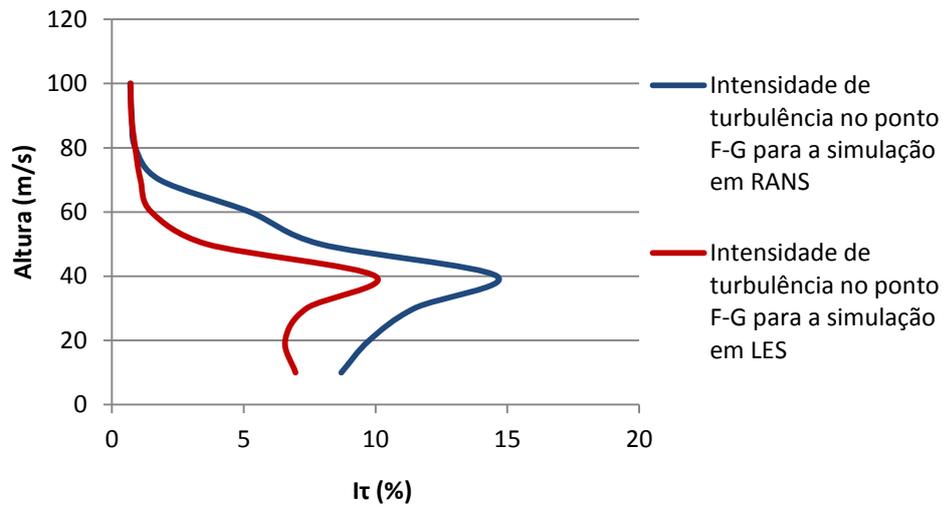


Figura 6.23 – Comparativo entre as intensidades de turbulência no ponto F-G

Com os valores médios de velocidade encontrados para a simulação em LES, calculou-se a densidade de potência disponível, conforme mostra a Fig. 6.24

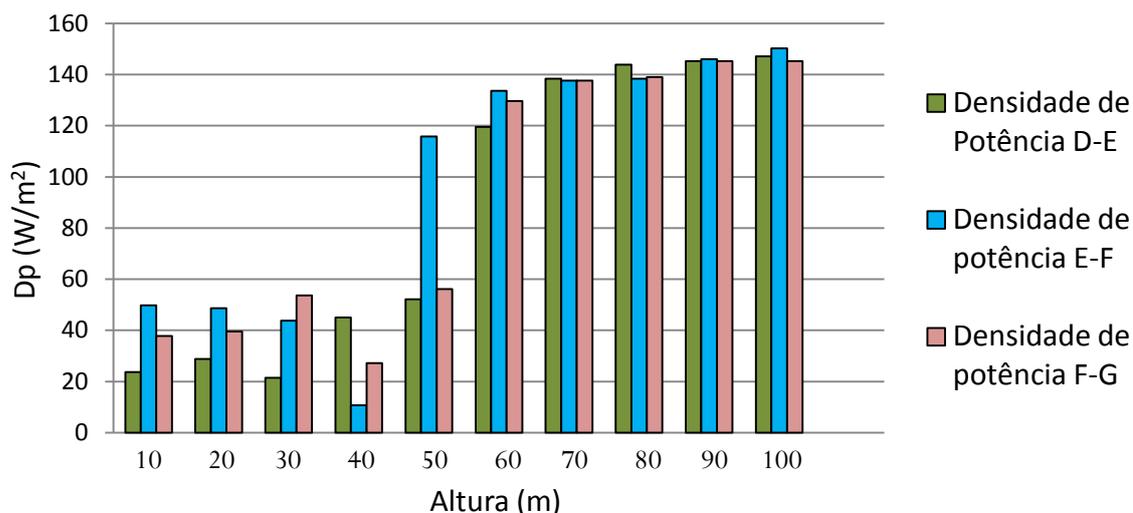


Figura 6.24 – Densidade de potência para análise LES

Pela Fig. 6.24 pode-se perceber que há uma grande influência dos edifícios na densidade de potência disponível, pois a partir de 60 m de altura, para os três pontos analisados a densidade de potência atinge valores muito próximos. A 50 m de altura, entre os edifícios E-F a potência disponível atinge um valor próximo de 120 W/m^2 , entretanto o valor de Intensidade de turbulência chega a um valor próximo de 10%.

A comparação dos dados revela diferenças evidentes no que diz respeito à disponibilidade do vento nestes ambientes (urbanos).

Verificou-se que em ambiente urbano a intensidade de turbulência é significativamente mais elevada do que em ambiente rural. A comparação dos resultados obtidos pelo programa de simulação mostra uma aproximação aceitável ao campo de velocidades.

Em ambas as simulações numéricas realizadas neste trabalho, tanto os perfis de velocidade quanto as intensidades de turbulência calculadas possuem o mesmo comportamento, contudo existem diferenças entre alguns valores.

Para os valores de velocidade do escoamento, a maior diferença encontrada entre os dois métodos matemáticos encontrados, foi para o ponto entre os edifícios F-G, chegando a um percentual de 20% de diferença entre os valores encontrados para uma altura de 30 metros. Os perfis de velocidade encontrados para o ponto D-E foram os que tiveram a menor discrepância para os valores encontrados, ficando o maior percentual de erro em torno de 3%.

Os dados de intensidade de turbulência obtidos para os métodos numéricos utilizados, permitem observar que tanto pelo método da média de Reynolds quanto pelo método de

grandes escalas, o comportamento da turbulência é qualitativamente semelhante. Acima da região de maior influencia das edificações o percentual de diferença entre os valores encontrados para ambas as simulações é de aproximadamente 0,5% para valores acima de 60 metros de altura.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo numérico do escoamento do ar em áreas urbanas, ao redor de um conjunto de edifícios, e da viabilidade de instalação de aerogeradores nas posições entre sete edifícios propostos. Um estudo sobre o perfil de velocidade do vento e da intensidade de turbulência entre os edifícios foi realizado. Emprega-se o Método de Volumes Finitos, com a utilização de duas metodologias para análise do escoamento turbulento, equações de Navier-Stokes com Médias de Reynolds e Simulação de Grandes Escalas. A avaliação da metodologia empregada foi baseada na comparação dos resultados da simulação com os resultados experimentais disponíveis na literatura.

Utiliza-se um software de CAD para criar a geometria correspondente ao estudo deste trabalho. O volume de base retangular que define o domínio, para RANS e LES é discretizado em uma malha tetraédrica com 8.999.794 de volumes finitos. O estudo é desenvolvido em uma área ao redor do Campus Jubileu, em Nottingham, Reino Unido, a qual dispõem de dados experimentais de um estudo em campo e em túnel de vento publicados por Campos, 2009. A altura total do domínio é definida como oito vezes a altura do edifício mais alto da micro-região.

Como apresentado no estudo de Xiao et. al., 2010, o limite de domínio deve estar longe da região de análise. Os limites laterais devem estar pelo menos 500 m distantes da área em foco.

Para validação da metodologia empregada à simulação numérica utiliza-se os resultados obtidos no trabalho de referência com simulação, utilizando o método da média de Reynolds e experimentos com túnel de vento. Para tanto, reproduz-se a simulação com a metodologia RANS com os mesmos parâmetros utilizados no trabalho de referência [Campos, 2009]

Para avaliar a qualidade da malha, a velocidade média entre os prédios D-E a uma altura de 50 m e a velocidade média na condição de saída é analisada em quatro malhas propostas.

Nas duas malhas mais refinadas, a velocidade em um ponto entre os prédios D-E apresentou diferença de 1,5 %, além disso, verificou-se que a influência da malha na velocidade média no plano de saída é desprezível. A malha de trabalho foi escolhida de

maneira a minimizar os efeitos da dependência dos resultados da simulação do número de volumes de cálculo.

Além da simulação de referência RANS, apresenta-se simulação da mesma geometria proposta utilizando o método de grandes escalas. Em seguida é realizada uma análise da intensidade de turbulência nos pontos em questão.

O tempo de processamento para a simulação de grandes escalas ficou em torno de uma semana, enquanto o tempo de simulação para a simulação em RANS foi de aproximadamente um dia. As simulações LES são realizadas em regime transiente, enquanto as simulações RANS são realizadas em regime permanente. A diferença entre o tempo de ambas as simulações, deve-se principalmente ao fato do método de grandes escalas calcular as flutuações das velocidades, ou seja, o valor da velocidade em cada instante de tempo, enquanto o método RANS calcula diretamente o valor médio da velocidade.

No trabalho utilizado como referência para esta pesquisa, a autora propõe a instalação de aerogeradores entre os edifícios foco do estudo, de acordo com a Fig. 7.1.

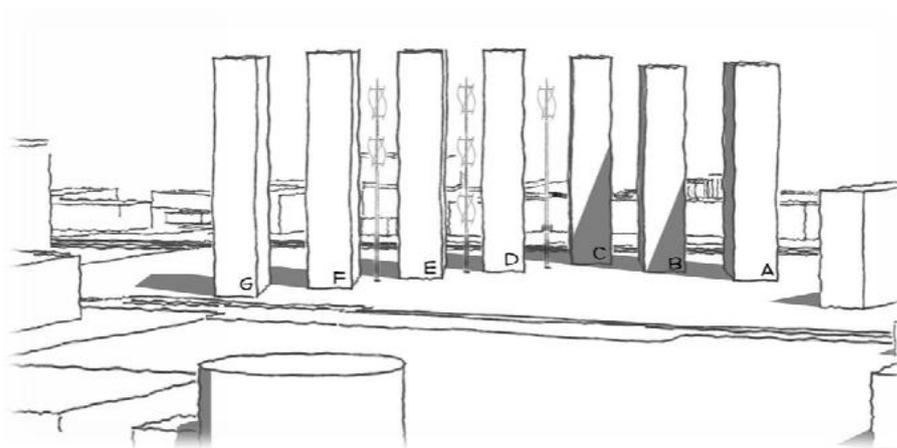


Figura 7.1 – Turbinas eólicas integradas aos edifícios

(Campos, 2009)

Campos, 2009, conclui que os casos que apresentaram melhores possibilidades de pequenas turbinas eólicas integradas seriam os casos com índices de maior velocidade computados. Estas velocidades também foram observadas no presente estudo, contudo, ao incluir uma análise da intensidade de turbulência nos locais nos quais propõe que as turbinas sejam instaladas, observa-se elevados valores para este parâmetro.

Os resultados das simulações demonstram que regiões próximas aos edifícios são caracterizadas por altos níveis de turbulência e déficits de velocidade, os valores de

intensidade de turbulência nos pontos localizados entre os edifícios é elevado, chegando em algumas alturas a 20%. Em razão destas características, a instalação de turbinas eólicas nessas regiões não é recomendada, pois pode resultar em fadiga de componentes estruturais e mecânicos, além da perda de potência disponível.

O escoamento entre dois edifícios altos ou entre uma passagem estreita dentre duas montanhas é concentrado na parte exposta ao vento e a sua velocidade cresce consideravelmente entre os dois obstáculos. Este efeito tem o nome de “efeito túnel”. Assim seria possível, na teoria, obter velocidades de vento até 1/3 superiores. Entretanto, a colocação de turbinas eólicas entre dois edifícios altos deve ser analisada com maior cautela, pois pode haver efeitos de turbulência que podem anular as eventuais vantagens do efeito túnel e criar problemas de fadiga nos materiais.

Levando em consideração apenas os valores da velocidade do escoamento para a instalação de turbinas eólicas, posicionar os aerogeradores entre os edifícios seria o mais indicado para a geração de energia elétrica em áreas urbanas. Entretanto, os resultados obtidos na presente pesquisa evidenciam que os valores de turbulência nestas posições são altos, atingindo valores de 3% a 20%, indicando a necessidade de um estudo mais detalhado, verificando se a instalação das mesmas nesta região não acarreta redução da performance em consequência da elevada intensidade de turbulência e consequentemente elevados custos de manutenção. A turbulência reduz a possibilidade de utilizar o vento de forma efetiva em um aerogerador, assim como acarreta maior desgaste e possibilidades de rupturas (fadiga estrutural).

Para os pontos E-F e F-G as velocidades mais baixas encontradas ocorreram a uma altura de 40 metros.

Uma alternativa para a instalação de aerogeradores em áreas urbanas seria posicioná-los nos telhados dos edifícios, onde encontram-se valores de velocidade mais elevados e mais baixa intensidade de turbulência. Pela simulação realizada percebe-se que a uma altura de 60 metros a turbulência se reduz drasticamente, com valores próximos de 1%.

Os dados obtidos na presente simulação demonstram que os resultados são coerentes e podem ser obtidos com a metodologia apresentada neste estudo. Conclui-se através dos resultados obtidos que a ferramenta LES/CFD pode ser utilizada para estudar o escoamento do vento em áreas urbanas e que o aproveitamento energético em ambiente urbano se prevê uma tarefa delicada, fruto da baixa intensidade vento e elevada complexidade do recurso.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros sugere-se que as dimensões de domínio sejam mais bem estudadas para verificar a influência da fronteira nos resultados. Que sejam realizadas simulações com malhas mais refinadas próximo ao complexo de edifícios, além da realização de simulações com diferentes modelos de turbulência, a fim de verificar a influência dos modelos nos resultados. Desenvolver estudos com dados experimentais em túnel de vento e em campo que incluam informações de intensidade de turbulência, para verificar mais detalhadamente os resultados das diferentes modelagens de turbulência. Estudar a influência da intensidade de turbulência no desempenho aerodinâmico de diferentes modelos de turbinas eólicas de eixo vertical e horizontal. Inserir na simulação parâmetros de rugosidade, como carros, pedestres e vegetação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abohela I., Hamza N., Dudek S. **Urban Wind Turbines Integration in the Built Form and Environment**. FORUME journal, 10, pp.23-29., 2011.

Abrunhosa J. D. M. **Simulação de Escoamento Turbulento Complexo com Modelagem Clássica e de Grandes Escalas**, Tese de Doutorado, PUC, Rio de Janeiro, 2003.

Alnaser W.E. e Al-Karaghoulí A. **Wind availability and its power utility for electricity production in Bahrain**. Renewable Energy, 21, pp.247-54., 2000.

ANSYS, INC.: **“ICEM CFD 4.0** Documentação eletrônica fornecida junto com o software ICEM CFD 4.0., 2003

Ansys.**UDF Manual V.12**.[S.l.], 2009.

Architectural Institute of Japan. **Recommendations for loads on buildings**., 2004.

Architectural Institute of Japan. **Guide for numerical prediction of wind loads on buildings**., 2005

Aristodemou E., Bentham T., Pain C., Colvile R., Robins A., ApSimon H. **A comparison of mesh-adaptive LES with wind tunnel data for flow past buildings: Mean flows and velocity fluctuations**. Atmospheric Environment, 43, 6238–6253., 2009.

Arne N. **Shadow- flicker modeling at Wild Horse, WA. Wind farm measurement and modeling**. Revision; 2003.

Amarante O. A. C., Brower M., Zach J., Sá A. L de. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília., 2011

Baker B. B. Jr., Deebel W. R., Geisenderfer R. D. **Glossary of Oceanographic Terms**, 2nd edition. U.S. Naval Oceanographic Office., 1966.

Balogh M., Parente A., Benocci C. **RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an Enhanced k- ϵ model and wall function formulation: Implementation and comparison for fluent and Open FOAM**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Pages 360–368., 2012.

Barrios L., Alejandro Rodriguez A. **Behavioral and environmental correlates of soaring-bird mortality at on-shore wind turbines**. Journal of Applied Ecology, 41:72–81., 2004.

Bernd M. **Changing wind-power landscapes: regional assessment of visual impact on landuse and population in Northern Jutland, Denmark**. Applied energy. 83:477–94., 2005.

Bittencourt R. M., Amarante O. C., Schultz D. J. **Estabilização Sazonal da oferta de Energia Através da Complementaridade entre os Regimes Hidrológico e Eólico** In: Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica – SNPTEE, 15. Foz do Iguaçu: **Anais...** 1999. GPL-17., 1999.

Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J., Hensen J. **Application of CFD in building performance simulation for the outdoor environment.** 11th IBPSA Building Simulation Conference, pp.489-496., 2009.

Blocken B. **CFD in Building Engineering: Fundamentals and applications in urban physics and wind engineering.** Coursebook. Eindhoven., 2011.

Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J., Hensen J. **Application of CFD in building performance simulation for the outdoor environment: an overview.** Journal of Building Performance Simulation, 4(2), pp.157-84., 2011.

Blocken B., Janssen W. D., van Hooff T. **CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus.** Environmental Modelling & Software 30: 15-34., 2012.

Borrego C., Costa A. M., Amorim J.H., Santos P., Sardo J., Lopes M., Miranda A.I. **Air quality impact due to scrap-metal handling on a sea port: A wind tunnel experiment.** Atmospheric Environment, 41, 6396–6405., 2007.

Bortoli L. A. **Introdução à mecânica dos fluidos computacional**, Porto alegre/RS, UFRGS., 2000.

Bu Z., Kato S., Takahashi T. **Wind tunnel experiments on wind-induced natural ventilation rate in residential basements with areaway space.** Building and Environment 45(2010) 2263 e 2272., 2010.

Campbell N.S., Stankovic S. **Assessment of Wind Energy Utilization Potential in Moderately Windy Built-up Areas.** London: Wind energy for the built environment (WEB)., 2001.

Campos L. A. **Wind energy i the built environment: A design analisys using CFD and wind tunnel modeling approach.** University of Nottingham., 2009.

Cheung-Hu Hu e Fan Wang. **Using a CFD approach for the study of street-level winds in a built-up area.** Building and Environment., Pages 617–631., 2005.

Chiu, Y. H and Etheridge, D. W. **Experimental technique to determine unsteady flow in natural ventilation stacks at model scale.** Jnl Wind Eng & Ind Aerod. 92, 291-313., 2004.

Chen C. J., Jaw S.Y. **Fundamentals of turbulence modeling**, Taylor & Francis., 1998.

Cho T., Kim C. **Wind tunnel test for the NREL phase VI rotor with 2 m diameter**. Renewable Energy., 2013.

Cook N.J. **The designer's guide to wind loading of building structures**, Garston, Watford : **Building Research Establishment**. Dept. of the Environment ; London ; Boston : Butterworths., 1985.

Cost. **Cost Action 14: recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment**. Brussels., 2004.

Crawford R. H. **Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 13:2653–60., 2009.

Davenport A. G. **Past, present and future of wind engineering**. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* (12;15):1371;1380., 2002.

Davidson, Lars. **MTF270-Turbulence modelling**. Goteborg: Chalmers university of technology., 2007.

Dayan, E. **Small scale, building integrated, wind power systems**. BRE., 2005

Denoon R., Cochran B., Banks D., Wood G., 2008. **Harvesting Wind Power from Tall Buildings**. In CTBUH 8th World Congress. Dubai., 2008.

Dimitris Al. Katsaprakakis. **A review of the environmental and human impacts from wind parks. A case study for the Prefecture of Lasithi, Crete**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 2850–2863., 2012.

Drewitt A. L., Langston R. H. W. **Assessing the impacts of wind farms on birds**. *Ibis*, 148:29–42., 2006.

ESB National Grid. **"Impact of Wind Generation in Ireland on the Operation of Conventional Plant and the Economic Implications"**(PDF)., 2004.

Eurostat. **Energy, transport and environment indicators**. Luxembourg: Publications Office of the European Union., 2011.

European Commission. **Renewables make the difference**. Information report. Luxembourg: Publications Office of the European Union European Union., 2011.

EWEA. European Commission. Technology. In: *Wind Energy – The Facts*., 1998.

Ferziger J. H. **Direct and Large Eddy Simulation of Turbulence**. In “**Numerical Methods in Fluid Mechanics**”, A. Vincent (ed.), Centre de Recherches Mathématiques Université de Montréal, Proceedings and Lecture Notes, 16 , pp. 53-97., 1998.

Ferziger J. H.; Peric M. **Computational methods for fluids dynamics**. 3rd Ed. rev. pringer, Berlin., 2002.

Fielding A.H., Philip Whitfield D., McLeod D. R. A. **Spatial association as an indicator of the potential for future interactions between wind energy developments and golden eagles *Aquila chrysaetos* in Scotland**. Biological Conservation, 131:359–69., 2006.

Fox Robert W., McDonald Alan T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos., 2006.

Gasch R.; Twele J., **Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation**. Berlin: Solarpraxis AG., 2002

Gatski T. B. Constitutive equations for turbulent flows. Theoretical computational fluid dynamics, 18: 345-369., 2004.

Germano M., Piomelli U., Moin P., Cabot W. **A Dynamics Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model**. Physics of fluids A, vol. 3 , pp 1760-1765., 1991.

Gipe P. **Wind Energy Basics: A Guide to Home- And Community-Scale Wind Energy Systems**, Chelsea Green Publishing Company., 2009.

Glass A. and Levermore G. **Micro wind turbine performance under real weather conditions in urban environment**. Building Services Engineering Research and Technology, 32(3), pp.245-62., 2011.

Global Wind Energy Council, **Global Wind 2006 Report**. Disponível em <http://www.gwec.net/index> ONU, 2014.

Goldstein D., Handler R., Sirovich L. **Modeling a no-slip flow boundary with an external force field**. J. Comput. Phys. 105, 354–356., 1993.

Gousseau P., Blocken B., Van Heijst. G. J.F. **Quality assessment of Large-Eddy Simulation of wind flow around a high-rise building: Validation and solution verification**. Computers & Fluids. Pages 120–133., 2013.

Green N. E., Etheridge D. W. and Riffat S.B. **Location of air intakes to avoid contamination of indoor air: a wind tunnel investigation**. Building and Environment (1):1;14., 2001.

Grubb M and Meyer I.N. “**Wind Energy: Resources, Systems, and Regional Strategies**”, **Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity**. Washington, DC: Island Press, 1994. Apud GREENPEACE, 1999 Op. cit.

Hartel C and Kleiser L. **Analysis and modelling of subgridscale motions in near-wall turbulence**, J. Fluid Mech., 356, 327 – 352., 1998.

Hertwig D., Efthimiou G. C., Bartzis J. G., Leitl B. **CFD-RANS model validation of turbulent flow in a semi-idealized urban canopy**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Pages 61–72., 2012.

Hinze J. O. **Turbulence: An Introduction to Its Mechanism and Theory**. New York, McGraw-Hill., 1959.

Hooff T. V., Blocken B. **On the effect of wind direction and urban surroundings on natural ventilation of a large semi-enclosed stadium**. Computers & Fluids 39: 1146-55., 2010.

Houda S., Zemmouri N., Athmani R. and Belarbi R. **Effect of urban morphology on wind flow distribution in dense urban areas**. Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1 85 – 94., 2011.

Hunt J. C. R., Sandham N. D., Vassilicos J. C., Launder B. E., Monkewitz P. A., Ewitt G. F. **Developments in turbulence research: a review based on the 1999 Programme of the Isaac Newton Institute**, Cambridge. Journal of Fluid Mechanics, v.436, p.353-391., 2011

Hüppop O, Dierschke J, Exo K-M, Fredrich E, Hill R. **Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines**.148:90–109., 2006.

Ian B. D. **Determination of thresholds of visual impact: the case of wind turbines. Planning and design**; 29:707–18., 2002

IEA. **International Energy Agency: RenewableE nergy**., 2011[Online] Disponível em: <http://www.iea.org/aboutus/faqs/renewableenergy> [Acessado em novembro de 2013].

Infoescola, 2014. <http://www.infoescola.com/mecanica-de-fluidos/tipos-de-fluxos-e-escoamentos>. [Acessado em fevereiro de 2014].

Jacob L. **Visual impact assessment of offshore wind farms and prior experience**. **Applied Energy**; 86:380–7., 2009.

Jinxin Cao, Yukio Tamura and Akihito Yoshida. **Wind tunnel investigation of wind loads on roof top model modules for green roofing systems**. J. WindEng.Ind.Aerodyn.118 pp. 20–34., 2013

Julian D. B. S. M., Jane X., Davis RH. **Noise pollution from wind turbine, living with amplitude modulation, lower frequency emissions and sleep deprivation**. In: Second International Meeting on Wind Turbine Noise., 2007.

Kaimal J and Finnigal J. **Atmospheric Boundary Layer Flows**.New York: Oxford University Press., 1994

Kenjeres S and Kuile BH. **Modelling and simulations of turbulent flows in urban areas with vegetation.** Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 123(pt. A), 43-55., 2013.

Kim T., Kim K., Kim B. Sean. **A wind tunnel experiment and CFD analysis on airflow performance of enclosed-arcade markets in Korea.** Building and Environment 45 1329–1338., 2010.

Kurz W., Fisher D. J. **Fundamentals of Solidification, Transactions Technical Publication,** Switzerland, 1986.

Larsen J. K, Guillemette M. **Effects of wind turbines on flight behavior of wintering common eiders: implications for habitat use and collision risk.** Journal of Applied Ecology 007;44:516–22., 2007.

Lawson T.V. **Building Aerodynamics,** London : Imperial College Press., 2001.

Ledo L, Kosasih P. B, Cooper P. **Roof mounting site analysis for micro-wind turbines.** Renewable Energy, 36:1379–91., 2011.

Letzel M. O., Krane M., Raasch S. **High resolution urban large-eddy simulation studies from street canyon to neighbourhood scale.** Atmospheric Environment 42 8770–8784., 2008.

Lesieur M and Métais O. **New trends in large-eddy simulations of turbulence,** Annu. Rev. Fluid Mech., 28., 1996.

Lu L and Ip K.Y. **Investigation on the feasibility and enhancement methods of wind power utilization in high-rise buildings of Hong Kong.** Renewable & Sustainable Energy Reviews, 13:450–61., 2009.

Lucas M., Janss G. F. E, Ferrer M. **The effects of a wind farm on birds in a migration point: the Strait of Gibraltar.** Biodiversity and Conservation. 13:395–407., 2004.

Madders M., Philip Whitfield D. **Upland raptors and the assessment of windfarm impacts.** Ibis 148:43–56., 2006.

Magoha P. **Footprints in the wind?: environmental impacts of wind power development.** Fueland Energy Abstracts 44(3):161., 2003.

Maliska C. R.. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional,** LTC, 2ed., 2004.

Manwell J. F., McGowan J. G., Rogers A. L. **Wind Energy: Theory, Design and Application.** England: Ed. John Wiley & Sons Ltd., 2002.

Manwell J. F., McGowan J. G., Rogers A. L. **Wind Energy Explained.** Wiley, Noida - India., 2009.

Martinez Crespo. **Principios de conversión de la energía eólica**. In: Amenedo, J. L. R.; Gómez, S. A.; Díaz, J. C. B. *Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica*. Madrid: Rueda, p. 27-96., 2003.

Martins F. R., Guarnieri R. A., e Pereira E. B. **O aproveitamento da Energia Eólica** – Revista Brasileira de Ensino de Física – São José dos Campos – SP., 2008.

Meira; Fernandez. **O Cluster Sun Fire e o sistema de filas**. Porto Alegre., 2011.

Melo M. S. de Matos. **Energia Eólica: Aspectos Técnicos e Econômicos**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE., 2012

Mertens S. **The energy yield of roof mounted wind turbines**. *Wind Engineering*., 2003.

Mo J., Lee Y. **Numerical Simulation for Prediction of Aerodynamic Noise Characteristics on a HAWT of NREL Phase VI**. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 25, p. 1341-1349., 2011.

Möller S. V., Silvestrini J. H. **Turbulência**. Vol. 4. Editora ABCM. Rio de Janeiro., 2004.

Molly J. P. **Centrais eólicas: técnicas, planejamento, financiamento, verificação**. In: *Curso de energia eólica*, 2005, Fortaleza - CE., 2005.

Moonen P., Dorer V., Carmeliet J. **Evaluation of the ventilation potential of courtyards and urban street canyons using RANS and LES**. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Pages 414–423., 2011.

Moonen P., Gromke C., Dorer V. **Performance assessment of Large Eddy Simulation (LES) for modeling dispersion in an urban street canyon with tree planting**. *Atmospheric Environment*. Volume 75, Pages 66–76., 2013

Monteiro J. P., Silvestre M. R., Piggott H., André J. C. (2013) **Wind tunnel testing of a horizontal axis wind turbine rotor and comparison with simulations from two Blade Element Momentum codes**. *J. WindEng.Ind.Aerodyn.*123 99–106., 2013.

NOABL Wind Map., 2014. Disponível em <http://www.rensmart.com/Weather/BERR>. [Acessado em janeiro de 2014].

Nozu T and Tamura T. **LES of turbulent wind and gas dispersion in a city**. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Volumes 104–106, Pages 492–499., 2012.

Okuno A., Tamura T., Okuda Y., Kikitsu H. **LES estimation of wind velocity profiles over various roughened ground surfaces in cities**. In: *Proceedings of APCWE6*, pp. 437–445., 2005.

Ono Y., Tamura T., Kataoka H. **LES analysis of unsteady characteristics of conical vortex on a flat roof** *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 96, Issues 10–11, pp. 2007-2018., 2008.

Oliveira JR., J. A. A. **Desenvolvimento de um sistema de dinâmica dos fluidos computacional empregando o método elementos finitos e técnicas de alto desempenho.** Dissertação de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFRGS. Porto Alegre., 2006.

Oliveira P. M. **Sustentação aerodinâmica: O mecanismo físico.**, 2008

Patankar S.V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow.** McGraw-Hill, New York., 1980.

Piomelli U. **Large-Eddy Simulation of Turbulent Flows.** VKI Lecture Series., 1998.

Piomelli U. **Large-eddy simulation: achievements and challenges.** *Prog.Aerosp.Sci.* 35:335–62., 1999.

Prandtl L. **Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung, Verhandl. des III Intern. Math.-Kongr., Heidelberg, 1904.**

Richard G. **Wind developments: technical and social impact considerations.** Orkney Sustainable Energy Ltd., 2007

Saidur R., Rahim N.A., Islam M.R., Solangi K.H.. **Environmental impact of wind energy.** *Renewable Energy* 57, pp. 71- 78., 2013.

Ruiz C, Schindler S, Poirazidis K. **Impact of wind farms on birds in Thrace, Greece.** Technical Report., 2005.

Salim S.M., Buccolieri R., Chan A., Di Sabatino S. **Numerical simulations of atmospheric pollutant dispersion in an urban street canyon: comparison between RANS and LES.** *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 99, 203–223., 2011.

Schlichting H. **Boundary layer theory.** McQtauw-Hill, New York., 1960.

Schneider F. A. **Verificação de Soluções Numéricas em Problemas Difusivos e Advectivos com Malhas Não-Uniformes,** Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos, UFPR, Curitiba., 2007.

Schulz H. E. **Alternativas em Turbulência.** São Carlos, EESC-USP., 2001.

Schwind JJ. **Geophysical Fluid Dynamics for Oceanographers.**Prentice-Hall Inc., 307 p., 1980.

Sexton D. E. **A simple wind tunnel for studying air flow around buildings.** In: building Research Station (now Building Research Establishment) Current Paper CP69/68, (Ed.) Reprinted from: Architect and Building News. pp. 983-985, Garston, U.K., 1968.

Shih T. H., Liou W. W., Shabbir A., Yang Z. and Zhu J. **A New $k-\epsilon$ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development,** (Comput Fluids), 24(3): 227-238., 1995.

Silva F. T., Santos A. C., Gil M. C. **Urban wind energy exploitation systems: Behaviour under multidirectional flow conditions—Opportunities and challenges.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 24 364–378., 2013.

Silveira Neto, Aristeu. **Turbulência nos fluidos aplicada.** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia- Faculdade de Engenharia Mecânica., 2006.

Silvestrini J. H. **Simulação numérica direta e de grandes escalas de escoamentos transicionais e turbulentos** In: II Escola Brasileira de Primavera Transição e Turbulência., 2000.

Silvestrini J.H. **Simulação Numérica Direta e de Grandes Escalas de Escoamentos Transicionais e Turbulentos.** In: Coleção Cadernos de Turbulência. Associação Brasileira de Ciências Mecânicas – ABCM. Rio de Janeiro. Vol. 2, Cap. 1, p. 1–81., 2003.

Souza J. F. A de. Oliveira, L. R de. Azevedo, J. L de. Soares, I. D. Mata, M. M. **Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem.** Revista Brasileira de Geofísica 29(1): 21-41., 2011.

Spalart P.R. **Strategies for turbulence modelling and simulations.** International Journal of Heat Fluid Flow 21, 252–263., 2000.

Stangroom P. **CFD Modelling of Wind Flow Over Terrain.** Nottingham - UK., 2004.

Streeter V. L. **Conceitos Ligados ao Escoamento de Fluidos e Equações Fundamentais.** In: Streeter, Victor L. Mecânica dos Fluidos. Tradução de: Celso da Silva Muniz et. al. São Paulo., 1977.

Tamura T and Ono, Y. **LES analysis on aeroelastic instability of prisms in turbulent flow.** J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 91, 1827–1846., 2003.

Tamura T., Cao S., Okuno A. **LES study of turbulent boundary layer over a smooth and a rough 2D Hill model.** In: ETMM6, pp. 257–266., 2005.

Tamura T., Nozawa K., Kondo K. **AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings.** In: Proceedings of the CWE, pp. 161–164., 2006.

Tamura T., Okuno A., Sugio Y. **LES analysis of turbulent boundary layer over 3D steep hill covered with vegetation.** J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 95, 1463–1475., 2007.

Taylor G. I and Karman T. V. **Journal Aeronautical Society**, v.41, p.1109., 1937.

The National Research Council. **Environmental impact of wind energy projects.**, 2007.

The World Water Development Report 2014: **Water and Energy.**, 2014. Disponível em <http://www.unwater.org/worldwaterday/world-water-development-report/en/>

T.R. Oke, **Boundary Layer Climates**, 2nd Edn, Routledge, Cambridge., 1987.

Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yoshikawa M., Shirasawa T. **AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings.**Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96, pp.1749-61., 2008.

UNFCCC, **Protocolo de Kyoto.**, 2011. [Online] Disponível em: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php [Acessado em Outubro de 2013].

Vasconcelos P. **Energia em Expansão.** Renergy Brasil n°5, p. 47-60., 2011.

Verkaik J.W. **On wind and roughness over land.** Wageningen: Wageningen Universiteit., 2006.

Vermeir J., Runacres M., De Troyer T. **CFD modelling and measurements of the atmospheric boundarylayer for micrositing of small wind turbines.**, 2012.

Versteeg H.K and Malalasekera W. “**An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**”, Longman Scientific & Technical,Londres., 1995.

Vilicic F. **Rendição Nuclear.** Veja edição 2220 - ano 44 - n°23, p. 96-98., 2011.

Walker S. L,**Building mounted wind turbines and their suitability for the urban scale - A review of methods of estimating urban wind resource.** Energy and Buildings 43 1852–1862., 2011.

Wallace J. M. and Hobbs P. **Atmospheric Science: An Introductory Survey.** 2nd ed. Elsevier Inc., 2006.

Wenzel G. M., Lopes H. F., Alé J. A. V. **Estudo da implementação de sistema eólico em prédio da empresa auxiliadora predial.** IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Recife-PE de 22 a 25 de Agosto 2006.

Wise A., Sexton D. and Richards D. **Effects Due to Groups of Buildings** [and Discussion]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences (1934-1990) -(1199):469., 1971.

World Energy Council. **New Renewable Energy Resources: Opportunities and Constraints 1990-2020**. London, Kogan Page., 1993.

European Wind Energy Association/ EWEA. Forum For Energy and Development – FED. **Wind Force 10 – A Blueprint to Achieve 10% of the World’s Electricity from Wind Power by 2020**. London. 1999.

Xiao Y. Q., Li C., Ou J. P., Song L. L. **CFD Approach to the Micrositing of Wind Turbines in Complex Terrain**. Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments - ASCE, p. 1992-2000., 2010.

Yang T., Wright N. G. and Etheridge D. W. **A comparison of CFD and full; scale measurements for analysis of natural ventilation**. International Journal of Ventilation , 337;348., 2006.

Youssef F., Visser S. M., Karssenberg D., Erpul G., Cornelis W. M., Gabriels D., Poortinga. A. **The effect of vegetation patterns on wind-blown mass transport at the regional scale: A wind tunnel experiment**. Geomorphology. Volumes 159–160, Pages 178–188., 2012.

ANEXO A

A.1 Função definida pelo usuário para perfil de velocidade do vento na entrada do domínio

```

/*****
realvelprofile.c
UDF for specifying a steadystate velocity profile boundary condition
*****/

#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(inlet_velocity, thread, index)
{
    real x[ND_ND];
    real z;
    face_t f;

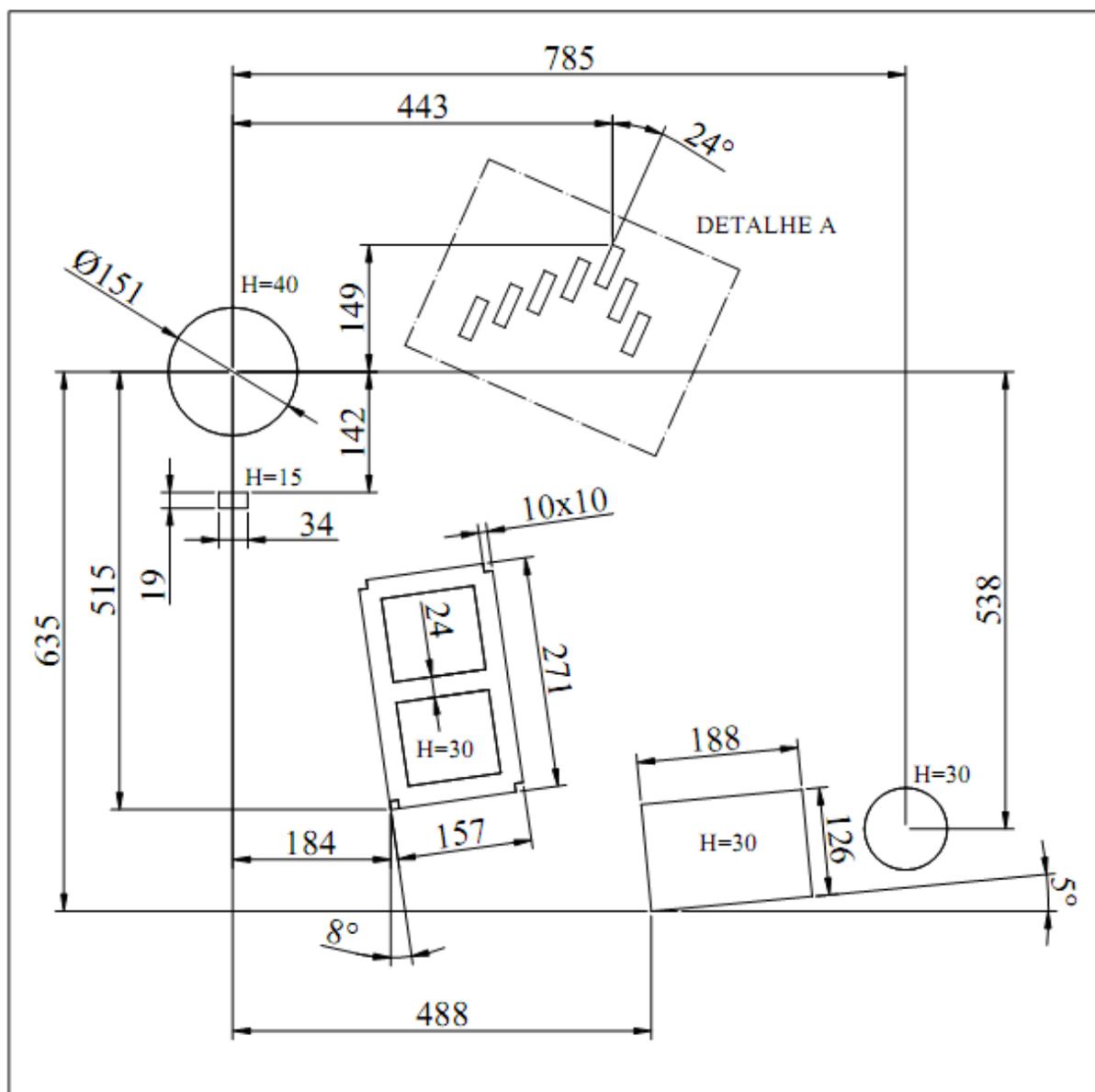
    begin_f_loop(f, thread)

        {
            F_CENTROID(x,f,thread);
            z = x[2];
            F_PROFILE(f, thread, index) = 5.4775 * pow ((z/50),.2275); }
    end_f_loop(f, thread) }

```

APÊNDICE A

A.1 Geometria proposta - Prédios do entorno



Distâncias em metros, sendo H a altura dos edifícios

