

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DO USO DE CFD PARA AVALIAÇÃO DO VENTO EM UM CAMPO DE TESTE DE
TURBINA EÓLICA DE PEQUENO PORTE

por

Guilherme Brust Orso

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2014



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO DO USO DE CFD PARA AVALIAÇÃO DO VENTO EM UM CAMPO DE TESTE DE
TURBINA EÓLICA DE PEQUENO PORTE

por

Guilherme Brust Orso

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof^a. Dr^a. Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Sergio Viçosa Möller

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 14, Novembro 2014.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial minha família: Marli, Hilário e Juliana e minha namorada, Raquel Barraza, por todo apoio e suporte durante a execução deste trabalho. À professora Adriane Petry pela orientação e oportunidade de desenvolver este estudo, ao Dalmedson pelo auxílio prestado, de grande valia, e à ANP-PRH-38 pela oportunidade de bolsa de pesquisa oferecida durante um período do curso.

ORSO, G. B. “**Estudo do Uso de CFD para Avaliação do Vento Em Um Campo de Teste de Turbina Eólica de Pequeno Porte**”. 2014. 14p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo numérico do escoamento do ar em um domínio computacional tridimensional que representa a camada limite atmosférica (CLA) em sua porção inferior. Alguns obstáculos presentes no local são modelados por blocos que representam simplificada sua geometria, sendo outros apenas implementados por seu comprimento de rugosidade, que é adicionado nas condições de contorno. A análise do comportamento do vento na região é necessária diante da intenção de instalar um laboratório de teste de desempenho de turbina eólica na região de Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil. É utilizada a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) como ferramenta de análise e estuda-se a sua aplicação para este caso. Utiliza-se a formulação das médias de Reynolds (RANS) e o modelo de turbulência $k-\omega$ SST para fechar o equacionamento, sendo a solução obtida através do software de simulação de fluidos ANSYS Fluent 14.0, pelo método dos volumes finitos. Os resultados numéricos demonstram inconsistência para o primeiro domínio considerado, sendo então proposto um domínio ampliado, com os resultados se mostrando coerentes com o comportamento do vento esperado em regiões com essas características.

PALAVRAS-CHAVE: Energia eólica, turbina eólica, camada limite atmosférica (CLA), dinâmica dos fluidos computacional (CFD).

ORSO, G. B. “**Study of the Use of CFD in Wind Analysis In a Small Wind Turbine Test Site**”. 2014. 14p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

This work is a numerical study of the air flow in a computational tridimensional domain which represents the atmospheric boundary layer (ABL) in the lower portion. The most near obstacles are geometrically modelled and others are represented by the roughness length implemented on the boundary conditions. The necessity on assessment of the wind flow in the area is surrounded by the installation of a wind-turbine performance test laboratory in Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil. The Computational Fluid Dynamics is employed as analysis tool, using Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) formulation and turbulence model $k-\omega$ SST on the closure of the equation system. The solution is performed with ANSYS Fluent 14.0, using Finite Volume method. Numerical results shows a nonconformity with expected for domain 1, so a larger domain is proposed, where the results are in agreement to real air flows structure over this type of terrain.

KEYWORDS: Wind Energy, Wind Turbine, Atmospheric Boundary Layer (ABL), Computational Fluid Dynamics (CFD).

INDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
2.1. Centros de teste de aerogeradores e normas do setor	1
2.2. Aplicações da Engenharia do Vento Computacional	2
2.3. Energia Eólica	2
2.4. Regime de ventos na região	4
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1. Camada limite atmosférica	4
3.1.1. Perfil de velocidade dentro da CLA	4
3.2. Modelos de turbulência	5
4. METODOLOGIA.....	6
4.1. Modelo matemático	6
4.2. Modelo computacional.....	6
4.2.1. Descrição da região de interesse	6
4.2.2. Domínio.....	7
4.2.3. Geração de malha	8
4.2.4. Condições de contorno.....	9
4.2.5. Solução	10
5. RESULTADOS.....	10
6. CONCLUSÃO.....	11
7. REFERÊNCIAS.....	13

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de reconfiguração da matriz energética mundial, incrementando a parcela de energias renováveis, é senso comum e indiscutível. A energia eólica vem a ser uma excelente opção por sua disponibilidade e baixo custo em relação às outras fontes renováveis, como a energia solar. Dentro deste contexto, com intenção de incentivar e desenvolver a indústria nacional, foi criado um projeto de implementação de um laboratório de testes para turbinas eólicas de pequeno porte pelo Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC) da UFSM (Universidade Federal de Santa Maria). O laboratório será localizado na Estação Marinha de Aquicultura - EMA, que fica na cidade de Rio Grande – RS que pertence à FURG (Universidade Federal de Rio Grande). O laboratório será composto de uma torre anemométrica responsável pela medição de intensidade e direção do vento e a turbina em teste, além de outros equipamentos relacionados à aquisição e transmissão de dados.

O principal propósito do laboratório é a obtenção das características de saída da turbina eólica. Como o local de implantação da turbina e da torre se encontra próximo à obstáculos que podem gerar alterações na velocidade do vento nesta área, faz-se necessária uma análise da esteira de turbulência gerada por essas construções. Devido ao fato de que medições em campo envolvendo aquisição e tratamento de dados demandariam tempo e custos adicionais, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD – Computational Fluid Dynamics), técnica comumente usada na EVC (Engenharia do Vento Computacional), vem a ser uma excelente alternativa. Apesar de menor confiabilidade, a gama de resultados obtidos é maior, pela área que abrange a análise e pela possibilidade de visão geral da distribuição dos efeitos de turbulência. Assim sendo, o estudo da utilização de CFD é realizado neste trabalho, com o objetivo de avaliar a influência da esteira aerodinâmica das edificações existentes próximas ao campo de testes sobre o vento incidente no ponto de instalação das turbinas em teste. As simulações permitem que algumas recomendações da literatura sejam ajustadas para o caso e uma abordagem inicial seja delineada. Resultados são obtidos com um modelo simplificado das edificações, ainda necessitando de aprimoramento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Centros de teste de aerogeradores e normas do setor

O órgão internacional que atualmente regula o setor de energia eólica através de normas técnicas é o IEC (International Electrotechnical Commission). Esta série de normatizações é desenvolvida pelo Comitê Técnico 88 do IEC, que é composto por representantes de 25 países membros e 13 observadores, entre eles o Brasil. No país, somente algumas normas da IEC vêm sendo traduzidas, utilizando as demais como referência. O Brasil é representado no IEC pelo COBEI (Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicações) em decorrência de um acordo com a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Dentre as normas pertinentes às turbinas eólicas, a que engloba o assunto tratado neste trabalho é a IEC 61400 parte 12. Ela fornece uma metodologia que garante consistência, acuracidade e reprodutibilidade na medição e análise de desempenho energético de turbinas eólicas.

Fora do Brasil existem diversos centros de teste de turbina eólica, a Dinamarca, pioneira na área de certificação de aerogeradores junto com a Alemanha, possui 3 centros de testes, em Hovsoro, Osterild e Brande, este último o mais expressivo, com capacidade para testar turbinas de 6MW ou até de maior capacidade. Nos Estados Unidos existe um centro que em 2012 foi o primeiro capaz de prever os efeitos da esteira de turbulência gerada pela turbina em outros aerogeradores em uma fazenda de geração, sendo que anteriormente esse tipo de análise só seria possível por CFD ou túnel de vento. No Brasil existe o Centro de Testes de Turbinas Eólicas (CTTE) em Olinda – PE, que faz parte de um grupo da Universidade Federal de Pernambuco. Alguns laboratórios utilizam ventiladores para realizar levantamento de curva de potência, como PUCRS (Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul), porém, a

área de atuação das pás é bastante reduzida. Além disso, testes também são realizados acoplando o aerogerador a um veículo. Segundo Gipe, 2004, é consenso mundial que ajustes finos podem ser efetuados em túneis de vento e em veículos em movimento, porém, para levantamento de desempenho, é essencial testar em campo sob ação natural do vento.

2.2. Aplicações da Engenharia do Vento Computacional

A utilização de CFD no estudo da CLA em sua porção inferior (0 – 200m) normalmente está relacionada a análise de dispersão e deposição de poluentes, do efeito de chuvas de vento, climatização de ambientes e conforto de pedestres em relação ao vento local [Blocken, 2007]. Segundo Moreira, 2007, também utiliza-se CFD em projeto de linhas de transmissão de alta tensão, onde analisa-se o balanço de isoladores e resfriamento de cabos, fatores críticos nesta área.

Dentro deste campo, verifica-se alguns estudos nos quais um modelo físico é inserido em um domínio computacional tridimensional. Yang, 2008 estuda a influência de dois importantes parâmetros em simulações de CLA: determinação de uma CLA homogênea e a correta determinação dos parâmetros de turbulência. Através da comparação com dados de túnel de vento, o autor verifica a influência dos parâmetros do modelo de turbulência nos resultados e o quanto as condições de contorno estabeleceram uma CLA em equilíbrio.

Blocken et al., 2004, analisa o comportamento do vento em passagens de pedestres localizadas em vãos no térreo de edifícios na cidade de Antwerp (Flanders, Bélgica). Um conjunto de edificações de aproximadamente 5, 8, 20 e 60m são modeladas e aplicadas em um domínio computacional de dimensões 900 x 700 x 190 m³. Os resultados são utilizados como justificativa para propor um sistema automático de abertura e fechamento das portas deste local em função da direção do vento. Utiliza o modelo *realizable* k- ϵ , que diferente do k- ϵ padrão utiliza funções especiais, que permite levar em conta os gradientes adversos de pressão e os pontos de separação e recirculação.

Fontella, 2014, realiza um estudo do comportamento do vento em uma área urbana para possível aproveitamento do potencial eólico, comparando os resultados à experimentos e também utiliza o modelo *realizable* k- ϵ . Tabrizi, 2014 et all., avalia a utilização do modelo de turbulência k- ω SST em conjunto de um atlas (WasP), que contém informações de velocidade do vento locais, para avaliar a instalação de aerogeradores no telhado de um galpão industrial. O autor procura regiões em que possam haver recirculações, rajadas de vento e áreas de estagnação, fatores que poderiam afetar a geração de energia ou os equipamentos em si.

Outra linha de estudos está relacionada à terrenos complexos, como a dissertação de Dalmedson, 2012, que apresenta, através de CFD, o estudo do potencial eólico em uma região de topografia complexa e o comportamento do vento na mesma. São utilizados dois modelos de turbulência, k- ϵ e k- ω SST. Moreira, 2007, realiza o mesmo tipo de estudo na região de Askervein, South Uist, Escócia e Acuruí, em Minas Gerais, Brasil e utiliza o modelo de turbulência k- ϵ . Os resultados são comparados à dados de torres anemométricas instaladas no local. Loureiro et all., 2008, compara simulações com diferentes modelos de turbulência, dentre eles o k- ω SST, utilizando uma colina com grau de inclinação acentuado como obstáculo ao escoamento da CLA.

2.3. Energia Eólica

Segundo dados do IEA (International Energy Agency), atualmente, 2,6% da energia renovável no mundo provém da energia eólica, se prevê que em 2050 este valor chegará a 18%. Além disso, os dados indicam que a União Européia se destaca como a região que mais produz energia pelo vento, e estimando-se que em 2050 seja ultrapassada pela China, o maior expoente atual, segundo gráfico da Figura 2.1,

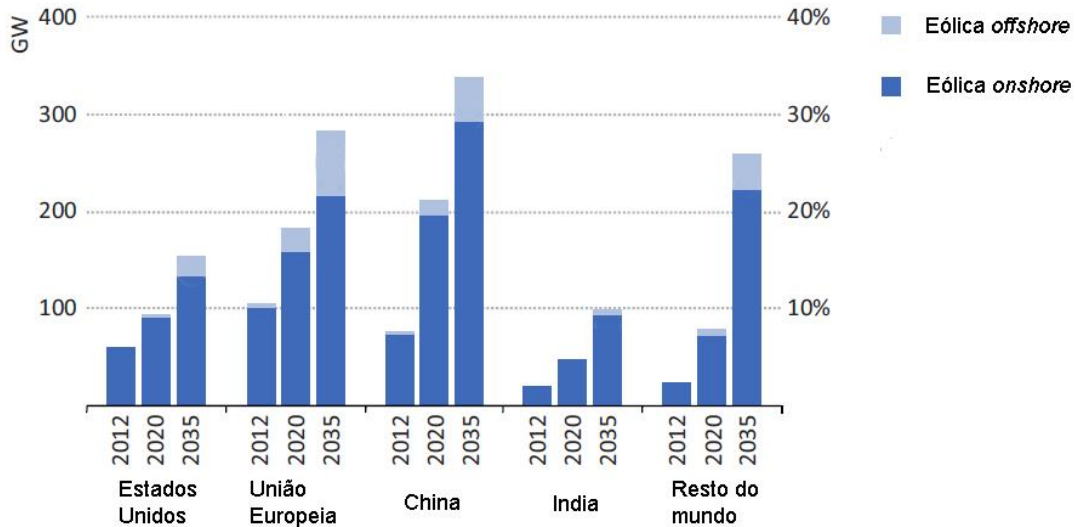


Figura 2.1 – Situação e projeção para capacidade instalada por região.

No Brasil é crescente o incentivo do governo à empreendimentos relacionados à energia eólica. Uma das formas é pela inclusão dessa fonte renovável aos Leilões de Energia, dados obtidos do boletim de Novembro de 2014 da ABEEOLICA (Associação Brasileira de Energia Eólica) – Figura 2.2 – demonstram a evolução da capacidade instalada de 2005 até uma previsão de 2018, indicando um quadro positivo.

Outras medidas tomadas pelo governo são: a inclusão de projetos destinados ao mercado livre de energia ao REIDI (Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura), que resulta em isenção de PIS e Cofins na compra de equipamentos, e o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) que abriu caminho para a fixação da indústria de componentes e turbinas eólicas no país.

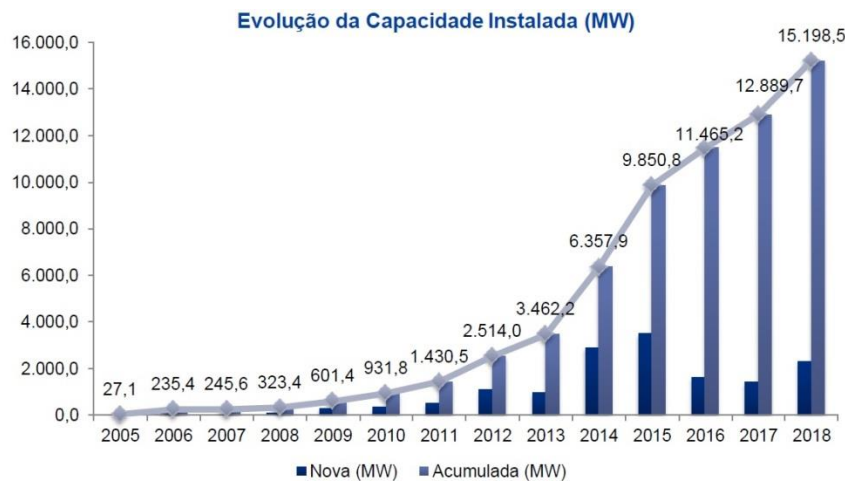


Figura 2.2 – Quantidade de energia leiloadada pelo governo de 2009 até 31 de julho de 2014 em MW.

Para o caso de turbinas destinadas à microgeração (até 100kW), e minigeração (entre 100kW e 1MW) temos além dos incentivos citados acima a criação da Resolução Normativa Nº 482 de 2012, que regulamenta a geração de energia alternativa residencial na forma de compensação, onde o consumidor ao efetuar a micro ou minigeração passa a emprestar sua energia excedente e a toma de volta na forma de créditos de energia, que ficam disponíveis por

36 meses. Apesar do incentivo e regulamentação, o custo inicial de instalação ainda é alto para pequenos clientes de concessionárias se tornarem autossuficientes.

2.4. Regime de ventos na região

A direção de vento predominante para a região de Rio Grande – RS foi verificada, sendo encontrado dados nas Normais Climatológicas fornecidas pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e Atlas Eólico do Rio Grande do Sul. Além disso, uma abordagem mais completa sobre a estrutura da CLA de uma região próxima (26km em linha reta), é descrita em Saraiva et al., 2013, em que é estimada a altura da CLA por análise espectral da turbulência da componente zonal do vento. Dados de energia cinética turbulenta e velocidade de fricção e comprimento de rugosidade são então obtidos pela autora com a manipulação dos registros das medições.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Camada limite atmosférica

A CLA é a porção da atmosfera em que efeitos do solo causam alterações em seu formato e constituição pela troca vertical de quantidade de movimento, calor e umidade. Este é um fenômeno de difícil definição mas com características peculiares, como a dinâmica tridimensional, irregular e randômica [Boçon, 1998]. Em escala planetária, define-se a CLA como uma fina camada adjacente à superfície da terra, cujo escoamento é caracterizado por alto número de Reynolds, ou seja, um escoamento turbulento. Esta camada pode variar de 300 à 1000m de altitude, no ciclo diário de aquecimento e resfriamento do solo, porém, essa instabilidade não é considerada neste trabalho.

3.1.1. Perfil de velocidade dentro da CLA

Devido a comprovações experimentais, o perfil de velocidade do vento é comumente representado por uma função logaritmica na forma:

$$\frac{\bar{V}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (3.1)$$

Onde z_0 é o comprimento de rugosidade, κ é a constante de von Kàrmàn, que comumente assume o valor de 0,4, u_* representa a velocidade de corte, ou também denominada velocidade de fricção e z é a altura. A velocidade de fricção representa, matematicamente, a inclinação do perfil logaritmico junto ao solo.

Para se determinar o perfil de velocidades no local é necessário o conhecimento da velocidade de corte, segundo Moreira, 2007, este termo pode ser estimado sabendo-se a velocidade do vento à uma determinada altura do solo. Dessa forma, para este parâmetro, a partir da equação 3.1 manipulada:

$$u_* = \frac{\kappa u(z)}{\ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right)} \quad (3.2)$$

Substituindo na equação equação 3.2 a altura de referência z_{ref} e a velocidade de referência medida nesta altura, u_{ref} , obtém-se:

$$u_* = \frac{\kappa u_{ref}}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (3.3)$$

Substituindo em 3.2 e rearranjando, tem-se:

$$u(z) = u_{ref} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z + z_0}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref} + z_0}{z_0}\right)} \quad (3.4)$$

Outra modelagem de perfil de velocidade da CLA utilizado é o da lei de potência, porém, por não representar bem as velocidades próximas do solo, não foi utilizado.

3.2. Modelos de turbulência

Para captar a turbulência em todas suas escalas de tamanho e frequência através da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD – Computational Fluid Dynamics) é necessária uma malha extremamente fina e intervalos de tempo muito pequenos nos cálculos da solução, essa é a modelagem adotada pelo método de simulação numérica direta (DNS – Direct Numerical Simulation), onde as equações de Navier-Stokes são resolvidas diretamente. Os modelos de turbulência são utilizados em decorrência da dificuldade de processamento computacional para resolver problemas práticos com a formulação acima.

Franke et al., 2004 estipula como principal fonte de erros em CFD a não correta escolha do modelo de turbulência. Ferziger et al., 1996, relatam que diferentes simulações que utilizam o mesmo modelo, mas realizadas por diferentes autores, produzem resultados discrepantes entre si da mesma forma que, ou se não maiores, que simulações de diferentes modelos mas de mesmos autores. Esta citação é reproduzida por Blocken et al., 2011, mostrando-se mesmo com o passar dos anos, ainda uma realidade.

Tratando a turbulência estatisticamente, associando valores médios e uma flutuação para as variáveis dependentes na equação de Navier-Stokes, surgiu a formulação RANS (Reynolds Average Navier-Stokes). A transformação das propriedades discretas em médias faz com que surjam mais duas variáveis ao problema, então duas equações diferenciais são adicionadas pelos modelos de turbulência, para cada eixo coordenado, que realizam o chamado fechamento do sistema de equações. Existem modelos mais antigos ou de restrita aplicação que utilizam apenas uma equação, mas não serão abordados por não haver aplicação prática em casos como o aqui estudado.

O modelo mais comum, amplamente estudado e utilizado na EVC é o $k-\varepsilon$, que similarmente à outros modelos de duas equações utiliza o conceito de viscosidade turbulenta, mais informações sobre este são encontradas em [Dalmedson, 2012]. Este modelo tem dificuldade em descrever o comportamento do escoamento na porção inferior da CLA, onde os efeitos viscosos são predominantes, tendo um baixo número de Reynolds associado. Justamente pelo fato de o modelo $k-\varepsilon$ indicado para alto número de Reynolds, não é recomendado para regiões próximas à parede [Moreira, 2007]. Segundo Wilcox, 1993, e Franke et al., 2004, o modelo $k-\omega$ vem a ser uma evolução do $k-\varepsilon$, ele calcula analiticamente as soluções na região próxima à parede [Loureiro et al., 2008], diferente do $k-\varepsilon$, que utiliza funções de parede para descrever o fluxo nesta camada da CLA.

O modelo proposto por Menter, 1994, chamado $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport – Transporte de tensões cisalhantes) veio a corrigir uma deficiência dos dois modelos citados acima, que é a superestimativa da viscosidade turbulenta e uma pobre previsão dos pontos de

recirculação do escoamento resultante. Este modelo surgiu da necessidade na área de CFD relacionada a aeronáutica, onde o descolamento da camada limite está associada ao *stall*, fenômeno responsável pela perda de sustentação de um perfil aerodinâmico. Este modelo é utilizado em simulações de CLA em casos de semelhante modelo computacional, como Yang et al., 2008. Outros estudos que simulam a CLA através deste método e obtendo variações aceitáveis em relação à dados experimentais são [Loureiro, 2008; Dalmedson, 2012; Tabrizi, 2014]. Este último, através de comparações com medições em campo de velocidade local, obteve erros de 19,1% em média, sendo atribuídos como causa dos maiores erros a não conformidade do modelo com alguns obstáculos que foram inibidos ou simplificados.

Outros modelos poderiam ser utilizados, como o LES (Large Eddy Simulation). Devido ao custo computacional necessário desta metodologia, não foi considerado uma possível opção. Outra linha utilizada em Blocken et al., 2004, seria o $k-\varepsilon$ *realizable*, que se baseia no transporte do tensor de Reynolds. Por demandar condições de contorno mais complexas relacionando perfil de velocidade de entrada, “k” e “ ε ”, não foi considerada uma opção para o referido trabalho, além do maior tempo de processamento necessário, segundo Dalmedson, 2012.

4. METODOLOGIA

4.1. Modelo matemático

A simulação utiliza o Método dos Volumes Finitos e a formulação RANS (Reynolds Average Navier-Stokes – médias de Reynolds. Para o fechamento do sistema de equações é utilizado o modelo de turbulência $k-\omega$ SST, cujo uso foi verificado no campo da EVC apresentando resultados satisfatórios. As equações do modelo de turbulência podem ser encontradas no manual do ANSYS Fluent 14.0.

4.2. Modelo computacional

4.2.1. Descrição da região de interesse

A região que será inserida no domínio computacional é apresentada na Figura 4.1. Primeiramente é traçado um círculo de raio igual a 300m que delimita a área onde os obstáculos à barlavento são representados por sua geometria real, seguindo orientação de [Franke et al., 2004]. A região 1 por estar localizada lateralmente à região de interesse é considerada idêntica à região 2. As regiões 2, 4 e 5 são representadas por suas rugosidades, atribuindo este valor nas condições de contorno. A superfície extremamente irregular das dunas da região 2 não permite uma modelagem geométrica, além do deslocamento das mesmas sob a ação do vento. A região 4 é de vegetação alta, não havendo modelos confiáveis de representação deste tipo de obstáculo, é utilizado também uma rugosidade relativa à este terreno, obtida a partir de dados experimentais.

O círculo em azul é onde a torre e a turbina serão instaladas, determinando esta como a região de interesse. A região 3 é onde as construções e obstáculos são modelados de acordo com sua geometria. Para isso, através de imagens de satélite e de vistas da rua pelo Google Earth© foi possível estimar a localização e altura das construções. Um modelo tridimensional foi criado em Autocad, já incluindo a separação das superfícies que receberão altura de rugosidade como condição de contorno para parede. Este modelo é então exportado para o ICM CFD em formato ACIS (.SAT), onde uma malha foi criada.

Os terrenos foram classificados segundo a norma NBR 6123, 1988, que fornece valores para o comprimento de rugosidade de acordo com a categoria do terreno, as descrições da norma encontram-se na Tabela 4.1. A Tabela 4.2 descreve cada terreno e sua classificação pela norma.

Tabela 4.1 – Descrição dos terrenos segundo NBR 6123.

Descrição	Comprimento de rugosidade
Categoria I: Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente.	0.005
Categoria II: Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas.	0.07
Categoria III: Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas.	0.3
Categoria IV: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada.	1
Categoria V: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados.	2.5

Tabela 4.2 – Descrição e classificação de cada região.

Região	Descrição	Categoria	Comprimento de Rugosidade (m)
1	Blocos de casas de 1 pavimento . Altura \approx 3m	x	x
2	Dunas. Altura \approx 2m	III	0,3
3	Construções de 1 e 2 pavimentos. Altura \approx 3m e 6m, respectivamente	x	x
4	Vegetação alta de pinheiros. Altura \approx 10m	IV	1
5	Blocos de casas de 1 pavimento . Altura \approx 3m	IV	1



Figura 4.1 – Identificação das regiões do domínio.

4.2.2. Domínio computacional

As fronteiras do domínio foram criadas de forma a não influenciar os campos de pressão e velocidade. Franke et al., 2004, sugere que para prédios onde as dimensões

horizontais são maiores que as verticais, a área ocupada pela fachada à barlavento deve ser de no máximo 3% da área da seção transversal do domínio. Foi adotado o valor de 0,1%, bastante inferior ao recomendado devido à largura das construções representadas geometricamente. A entrada e a saída do domínio encontram-se afastados 236m e 420m respectivamente, o que significa 1,36L e 2,91L, onde L é a distância entre as extremidades das construções representadas geometricamente. Os valores são considerados aceitáveis, utilizando critério análogo ao do distanciamento lateral do domínio, área ocupada por construções é igual a 0,0007% da seção longitudinal. Entende-se que este critério, no segundo caso, constitui-se de uma adaptação, porém, na falta de outros adequados, foi utilizado. Cabe ressaltar que encontra-se mais facilmente na literatura valores de referência para afastamento de fronteira de entrada e saída para construções com alta razão de aspecto, mas no caso estudado temos diversas pequenas construções que juntas constituem uma baixa relação de aspecto. A altura do domínio é de 500m, onde espera-se que seja suficiente para que a porção superior do escoamento absorva os efeitos da perturbação dos obstáculos, sem que haja também o efeito reverso. Os limites do domínio no plano horizontal podem ser conferidos na Figura 4.1, sua orientação permite a entrada do vento predominante na região, o nordeste, perpendicular à entrada, sem ajuste das componentes da velocidade. O domínio 1 é apresentado em linha de cor preta e o domínio 2 em amarelo. A região de interesse, onde se encontra a turbina e a torre anemométrica, está representada por um círculo azul.

As dimensões referentes à Figura 4.3, que apresenta o domínio e o modelo inserido, possui dimensões para o primeiro domínio de $x = 800\text{m}$, $y = 500\text{m}$ e $z = 500\text{m}$. Um segundo domínio é criado de forma a verificar a mudança dos resultados ao afastar as fronteiras, as dimensões são de $x = 1200\text{m}$, $y = 800\text{m}$, $z = 200\text{m}$. A altura foi reduzida para manter um número de volumes finitos que não tornasse computacionalmente proibitivo o processamento e o pós-processamento.

4.2.3. Geração de malha

A malha foi gerada levando em consideração fatores que frequentemente são foco de preocupação na bibliografia pesquisada, como a discretização do domínio próximo às paredes.

O estudo de sensibilidade da solução em relação ao refinamento da malha é realizado para os dois domínios, observando-se a componente da velocidade na direção x em um local dentro da região de interesse, conforme Figura 4.2, à 20m do solo. São geradas 3 malhas para o primeiro domínio e 4 malhas para o segundo, descritas na Tabela 4.3. Verifica-se baixa variação dos valores de velocidade para o ponto escolhido na Figura 4.2, assegurando a independência dos resultados em relação à malha.

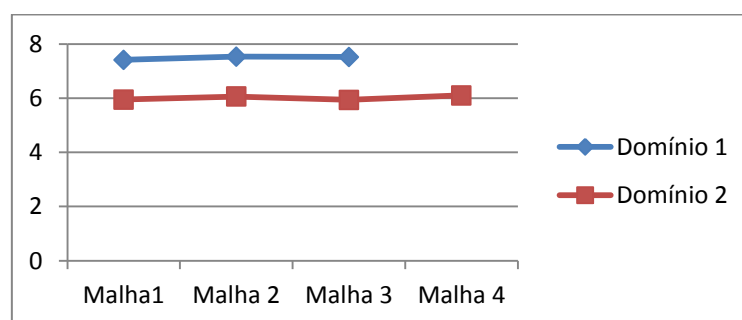


Figura 4.2 – Influência do refinamento das malhas na velocidade em um ponto na localização da torre

Tabela 4.3 – Número de células das malhas utilizadas no teste de independência de malha.

	Nº de células ($\times 10^6$)	
	Domínio 1	Domínio 2
Malha 1	3,6	2,9
Malha 2	5,2	4,8
Malha 3	8,6	6,1
Malha 4	x	9,3

Para o segundo domínio foi utilizado o mesmo critério de geração e a malha final possui 9351254 células, tomando como base as distribuições encontradas na malha 3 para as 3 direções principais, somente balanceando de acordo com a variação das dimensões e mantendo o refinamento próximo à parede.

4.2.4. Condições de contorno

As condições de contorno impostas são descritas a partir da Tabela 4.4 e Figura 4.3.

Tabela 4.4 – Condições de contorno.

Região	Condição de contorno
A	Saída livre, pressão estática zero
B	Perfil de velocidade horizontal conforme equação 3.4
C	Simetria
D	Simetria
E	Simetria
F	Parede, comprimento de rugosidade = 0,3m
G	Parede, comprimento de rugosidade = 1m
H	Parede, comprimento de rugosidade = 1m

Para a entrada do domínio o perfil de velocidade foi imposto conforme equação 3.4, para isso, tomou-se como referência dados do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, cujos dados referem-se à medições realizadas exatamente no mesmo local. A direção representativa da direção na rosa dos ventos é Nordeste. É indicado valor de 8m/s para velocidade do vento à 50m de altura.

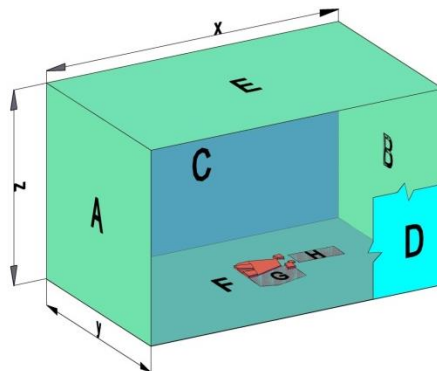


Figura 4.3 – Representação genérica dos domínios 1 e 2, suas fronteiras e indicação dos locais das condições de contorno.

4.2.5. Solução

A solução do conjunto de equações que regem o problema foi obtida com o programa comercial ANSYS Fluent 13.0. O critério de convergência adotado foi de $2,5E-4$ para os resíduos de continuidade, k , w e velocidade. O algoritmo SIMPLE é utilizado no acoplamento pressão-velocidade e regime permanente é assumido. O recurso computacional disponível para processamento é pós-processamento é um computador pessoal com processador Intel Core i3 Dual Core de 3.2Ghz e com 8GB de memória RAM.

5. RESULTADOS

Para analisar as perturbações no campo de velocidade do vento em uma determinada área, é necessário observar o comportamento dos vetores de velocidade na localização da turbina e da torre meteorológica, à 20m de altura, altura média na qual operam os eixos de rotor de aerogeradores de pequeno porte, porém, é importante ressaltar aqui a ocorrência de uma anomalia nos resultados para o domínio 1, onde ocorre um repentino acréscimo da componente u de velocidade junto ao solo, até uma altura de aproximadamente 9m, onde ele reassume o formato logaritmico no restante da altura. Isso é demonstrado através dos perfis de velocidade para diferentes posições ao longo de x de 0m, 400m e 800m, mantendo $y=0$. (Figura 5.1a). Já para o segundo domínio (Figura 5.1b), são apresentados os perfis de velocidade para 4 posições, demonstra-se que o perfil de velocidade mantém-se ao longo de x , absorvendo os efeitos de rugosidade do solo e incidindo sobre as construções um perfil plenamente desenvolvido. Nota-se também no domínio 2 um perfil que parece tender ao encontrado no domínio 1, porém, somente no final. Supõe-se que essa perturbação, então, seja decorrente da proximidade da saída do domínio em relação aos obstáculos, já que no domínio maior ela parece ser absorvida e não transmitida à todo resto do modelo.

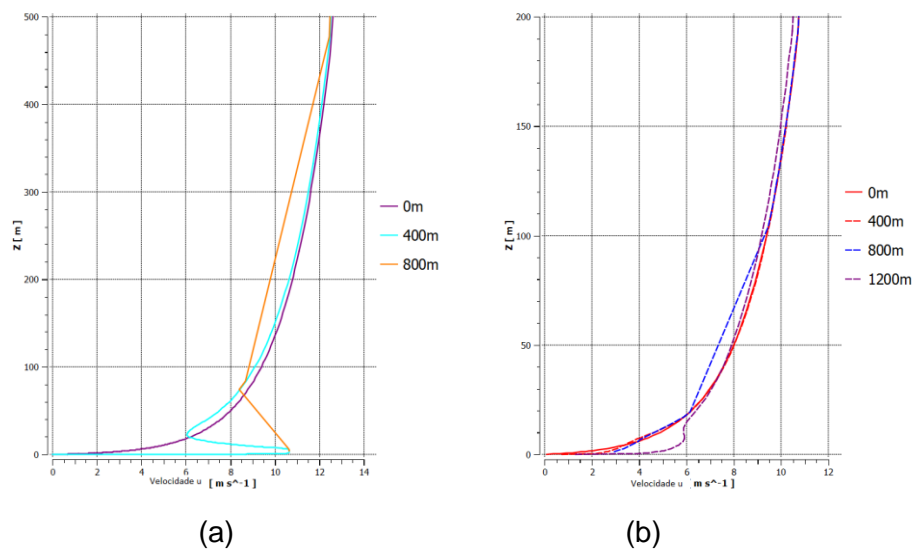


Figura 5.1 – a) Perfil de velocidade horizontal em 3 posições : 0m, 400m e 800m ao longo de x em $y = 0$. b) Perfil de velocidade horizontal em 4 posições : 0m, 400m, 800m e 1200m ao longo de x em $y = 0$.

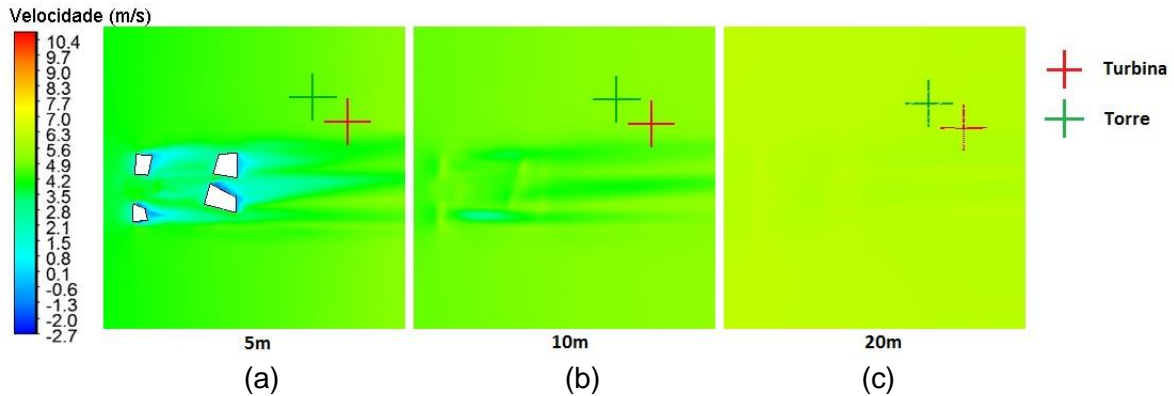


Figura 5.2 – Vetores de velocidade em um plano à 5m (a), 10m (b) e 20m (c) de altura.

O campo de velocidade é apresentado em 3 planos horizontais a 5, 10 e 20m de altura na Figura 5.2 para o domínio 2, onde verifica-se que a esteira aerodinâmica já não é mais perceptível. Mesmo para as alturas de 5 e 10m, podemos ver na Tabela 5.2 que os valores de velocidade apresentam pequenas diferenças.

Tabela 5.2 – Diferenças de velocidade entre localidades torre e turbina.

	Torre	Turbina	Diferença (%)
5m	4,73	4,86	-2,75
10m	5,04	5,05	-0,20
20m	6	5,94	1,00

6. CONCLUSÃO

A utilização de CFD para análise do escoamento do ar sobre um terreno com edificações é avaliada.

Foi simulado um domínio onde as edificações foram modeladas por blocos e o entorno representado pelo comprimento característico de sua rugosidade. O vento nordeste, predominante na região, foi inserido no domínio na fronteira de entrada. A malha utilizada para obtenção dos resultados com este domínio foi a mais refinada dentre as 3 analisadas, não tendo apresentado dependência dos valores de velocidade em um determinado ponto em relação ao seu refinamento. Este domínio inicial apresentou resultados com perturbações, especialmente na região de saída. A expansão do domínio inicial demonstrou uma melhor adequação ao problema, apresentando resultados mais consistentes. Os resultados da simulação deste domínio, para a malha mais refinada dentre as 4 analisadas, são apresentados. Pela análise preliminar das velocidades consideradas em um ponto e dos campos de velocidade nos planos, é possível observar que a região proposta como local de instalação do centro de testes é adequada por não estar dentro da esteira aerodinâmica das construções. A diferença relativa de velocidade nos dois pontos considerados é de aproximadamente 1%. Esta diferença, nesta proporção, considerando a estrutura turbulenta do vento próximo ao solo, provavelmente não será o motivo das maiores variações encontradas em campo. Isso demonstra a adequação do local à obtenção de curvas de desempenho de turbinas eólicas para a direção de vento estudada.

Neste trabalho procurou-se estabelecer condições de simulação que reproduzissem situações de teste que pudessem estar de acordo com as normas citadas, que é objetivo deste projeto de laboratório. Para outras direções de vento é necessária a análise específica para cada direção. Em relação ao posicionamento relativo entre turbina e torre a norma pertinente fornece dados suficientes, não sendo considerado este detalhamento. Algumas simplificações

foram assumidas, como a representação dos obstáculos, que apesar de ter sido bastante simplificada, representa no conjunto, satisfatoriamente, o terreno do local e as construções presentes. Os valores de comprimento de rugosidade baseados em norma não é muito flexível, possuindo apenas alguns níveis de classificação, onde nem todos os terrenos conseguem se encaixar perfeitamente.

O estudo deste tipo de problema através de CFD utilizando o modelo de turbulência $k-\omega$ SST envolvendo áreas urbanas modeladas geometricamente é inédito dentro do GESTE (Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos) da UFRGS, grupo este ligado ao projeto de criação do laboratório em questão, de onde surgiu a motivação para este estudo. Além dos obstáculos inerentes ao pioneirismo, os contratempos do processo de criação do modelo e geração de malha tomaram bastante tempo deste estudo. Algumas recomendações a testes futuros devem ser consideradas, como a comparação com dados experimentais obtidos em campo.

7. REFERÊNCIAS

- Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., “**CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems**”. Atmospheric Environment 41 (2), 238–252, 2007.
- Blocken, B. J. E., Stathopoulos, T., Carmeliet, J. and Hensen, J. L. M., “**Application of computational fluid dynamics in building performance simulation for the outdoor environment: an overview**”, Journal of Building Performance Simulation, 4(2), pp. 157 -184, 2011.
- Boçon, F. T., “**Modelagem Matemática do Escoamento e da Dispersão de Poluentes na Microescala Atmosférica**”, Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 1998.
- Dalmedson, G. R. F. F., “**Análise da Aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional para Avaliação do Potencial Eólico em Terrenos Complexos**”, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- do Amarante, O. A. C., da Silva, F. J. L., Custódio, R. S., Gravino, N., “**Atlas Eólico do Rio Grande do Sul**”, SEMC/RS, 2002.
- Ferziger, J., and M. Peric. “**Computational Methods for Fluid Dynamics**”, 3rd ed. Springer, 2001.
- Fontella, C. R. F., “**Análise Numérica do Escoamento Turbulento em Área Urbana Empregando Simulação de Grandes Escalas**”. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.
- Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A.G., Krüger, H.W., Schatzmann, M., Westbury, P.S., Miles, S.D., Wisse, J.A., Wright, N.G., “**Recommendations on the use of CFD in wind engineering**”. von Karman Institute, Sint-Genesius-Rode, Belgium, 2004.
- Gipe, P., “**Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm, and Business**”, 2nd Edition
- Google Earth©. Acessado em 05/11/2014.
- IEA/Energy Research Institute (ERI) (2013), “**Technology Roadmap: Wind Energy**”, OECD/IEA, Paris, 2013.
- IEA/Energy Research Institute (ERI) (2013), “**World Energy Outlook**”, OECD/IEA, Paris, 2013.
- Loureiro, J.B.R., Alho, A.T.P., Silva Freire, A.P., “**The numerical computation of near-wall turbulent flow over a steep hill**”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96, pp. 540–561, 2008.
- Menter, F. R., “**Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications**”. AIAA Journal. 32(8). 1598–1605, 1994.
- Moreira, G.A.A., “**Modelagem numérica da camada limite atmosférica com validação experimental**”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil, 2007.

NBR-6123. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. [S.1.]. 1988.

Saraiva, L. B. Krusche, N. . **“Estimation of the Boundary Layer Height in the Southern Region of Brazil.American Journal of Environmental Engineering”**, American Journal of Environmental Engineering. v.3, p. 63-70, 2013

Yang, W., Quan, Y., Jin, X., Tamura, Y., Gu, M., **”Influences of equilibrium atmosphere boundary layer and turbulence parameter on wind loads of low- rise building”**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96 (10–11), 2080–2092, 2008.

Tabrizi AB, et al., **“Performance and safety of rooftop wind turbines: Use of CFD to gain insight into in Flow conditions”**, Elsevier, Renewable Energy, 1-10, 2013.

Wilcox, D. C., **“Turbulence Modeling for CFD”**. DCW Industries, Inc. La Canada, California. 1993.