

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

SIMULAÇÃO DE GRANDES ESCALAS DO ESCOAMENTO DE AR SOBRE MODELO DE
TERRENO COMPLEXO: ESTUDO COMPARATIVO COM EXPERIMENTO EM TÚNEL DE
VENTO E MODELAGEM NUMÉRICA VIA RANS

por

Felipe Wagner Gusberti

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, junho de 2015



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

SIMULAÇÃO DE GRANDES ESCALAS DO ESCOAMENTO DE AR SOBRE MODELO DE
TERRENO COMPLEXO: ESTUDO COMPARATIVO COM EXPERIMENTO EM TÚNEL DE
VENTO E MODELAGEM NUMÉRICA VIA RANS

por

Felipe Wagner Gusberti

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. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

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

Orientador: Prof. Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Prof. Paulo Arthur Beck

Prof. Paulo Smith Schneider

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, junho de 2015.

GUSBERTI, F. W. SIMULAÇÃO DE GRANDES ESCALAS DO ESCOAMENTO DE AR SOBRE MODELO DE TERRENO COMPLEXO: ESTUDO COMPARATIVO COM EXPERIMENTO EM TÚNEL DE VENTO E MODELAGEM NUMÉRICA VIA RANS. 2015. 19. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

O presente estudo apresenta Simulação de Grandes Escalas (*Large Eddy Simulation* – LES) de um escoamento sobre um terreno complexo e para isso, foi desenvolvida uma simulação de um terreno de escala reduzida, similar a um terreno analisado em experimento em túnel de vento, usando o programa ANSYS Fluent 13, que faz uso do método de volumes infinitos para solucionar as equações de transporte. Para tal, a discretização temporal apropriada foi definida e quatro malhas com quantidades diferentes de células foram simuladas e avaliadas por meio da aquisição das medições de velocidade em 9 linhas verticais alocadas no perfil de interesse da superfície do terreno. Depois disso, notou-se que o resultado numérico aproximou-se do resultado em túnel de vento na medida em que a quantidade de células foi aumentada, de modo que a malha de maior qualidade foi a malha 4, sendo esta a malha com a maior quantidade de células, apresentando uma diferença relativa média de 10,6% em comparação com as medições do experimento em túnel de vento. Além disso, os perfis de velocidade obtidos na simulação são consistentes com o problema em túnel de vento e as maiores diferenças foram mais concentradas nas proximidades da superfície do terreno, no entanto isso pode ser explicado pela falta de acuracidade do modelo Smagorinsky junto à parede e pela negligência da rugosidade superficial na simulação, contudo, as maiores diferenças relativas foram observadas nos pontos de aquisição de dados localizados a jusante do morro, onde foi notada uma região de descolamento. Além disso, os resultados da malha 4 foram comparados com resultados numérico de simulações similares, com a mesma geometria, usando modelos RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) e observou-se que a malha 4 obteve uma diferença relativa média com 16,7 pontos percentuais a menos quando comparada com o caso RANS sem rugosidade superficial e uma diferença relativa média com 9,1 pontos percentuais a menos quando comparada com o caso RANS com rugosidade superficial, representando uma diminuição relativa da diferença relativa média de 61% e 46% respectivamente. Ainda foi observado que o caso LES aproximou-se do comportamento do caso experimental mostrando, também uma aproximação qualitativa. Concluindo, com o objetivo de melhorar os resultados, é sugerida a aplicação de LES considerando a rugosidade superficial do problema e uma análise da influencia dos diferentes modelos de sub-malha.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Eólica, Simulação de Grandes Escalas, Dinâmica dos Fluidos

GUSBERTI, F. W. LARGE EDDY SIMULATION OF AIR OVER A COMPLEX TERRAIN MODEL: COMPARISON STUDY WITH WIND TUNNEL EXPERIMENT AND NUMERICAL MODEL BY RANS. 2015. 19. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

This study presents Large Eddy Simulation – LES of atmospheric flows over a complex terrain and for such, a numerical simulation of a reduced scale terrain, similar to the terrain evaluated in a wind tunnel experiment, was developed using the software ANSYS Fluent 13, which uses the finite volume method to solve the transport equations. For that, the correct time-step was chosen by time discretion analysis and 4 meshes with different cell quantities were simulated and evaluated by means of the acquisition of the velocity data in 9 vertical lines allocated in the profile of interest of the terrain surface. After that, it was noticed that the numerical results approached the wind tunnel results as the cell amount was increased, so the best quality mesh found was the mesh 4, which has the highest number of cells, presenting an average relative difference of 10,6% in comparison with the wind tunnel experiment velocity measurements. Also, the velocity profiles obtained in the simulation are consistent with the wind tunnel problem and the higher differences were mostly present near the terrain surface however this can be explained by the low accuracy of smagorinsky model considering near wall results and by the absence of wall roughness in the simulation, withal, the larger relative differences were observed in the data acquisition points located downstream of the hill, where was noticed a wake region. In addition to that, the mesh 4 results were compared with numerical results of a similar simulation, with the same geometry, using RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) models and was observed that the mesh 4 had an average relative difference 16,7 percentage points lower when compared to the RANS case with no surface roughness and an average relative difference 9,1 percentage points lower when compared to the RANS case with surface roughness, therefore, a relative average difference reduction of 61% and 46% respectively. Yet, it was observed that the LES case got closer to the behavior of experimental case, showing also a qualitative approximation. In conclusion, in order to improve the results, is suggested the application of LES in the problem considering the surface roughness and an evaluation of different sub-grid models influence.

KEYWORDS: Wind Power, Large Eddy Simulation, Fluid Dynamics.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3	MODELAGEM MATEMÁTICA	2
3.1	As equações fundamentais.....	2
3.2	Modelagem da turbulência.....	3
4	METODOLOGIA	5
4.1	Modelagem Numérica.....	6
4.2	Dados experimentais	6
4.3	Modelo Geométrico Computacional	7
4.4	Similaridade	8
4.5	Discretização de malha.....	8
4.6	Condições de Contorno	9
4.7	Discretização Temporal	9
5	RESULTADOS	11
5.1	Perfil de velocidades obtido	12
5.2	Comparação entre resultados RANS e LES	13
6	CONCLUSÕES.....	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
	ANEXO I	16
	APÊNDICE I	17
	APÊNDICE II	18

1 INTRODUÇÃO

A demanda por energia elétrica tem crescido significativamente e com isso, aumentam os níveis de emissões de poluentes. Pode-se citar como um exemplo de caso extremo, o nível de contaminação atmosférica em Pequim, na China, onde até mesmo o nascer do sol não pode ser visto devido a grande quantidade de partículas em suspensão, sendo assim, em 2014 foi simulado em painéis televisivos como campanha de *marketing* [Zero Hora, 2014]. Deste modo, amplia-se a necessidade de buscar fontes de energia renováveis e de baixas emissões de poluentes atmosféricos. Esta necessidade impulsiona o desenvolvimento de sistemas de produção de energia baseados em fontes limpas e renováveis, tornando-se ainda mais pertinente após a tendência à diminuição do uso de energia nuclear devido ao acidente de Fukushima em 2011, no Japão. Sendo assim, a demanda pela utilização de energia eólica está em crescimento.

No Brasil, a implantação de parques eólicos está em ascensão. O Plano Decenal de Energia 2023 (PDE 2023) emitido pela EPE, 2014, estima um aumento da geração eólica de 5.452 MW em 2014 para 22.439 MW em 2023, representando um acréscimo de 412% em 10 anos na matriz eólica, por tanto, a necessidade de reduzir os riscos econômicos e aumentar a viabilidade de implantação de parques eólicos é evidente.

Para desenvolver a análise do *layout* de uma usina eólica, o tipo de máquina, o fabricante, a altura da torre, a potência instalada, a previsão de geração anual e o respectivo fator de capacidade (estudo conhecido como *micrositing*), leva em consideração as características do vento incidente, o desenho da turbina e a geometria do terreno, sendo este último, normalmente um fator impeditivo para o empreendimento em terrenos complexos devido à dificuldade de previsão do comportamento do escoamento atmosférico nesta condição. Uma metodologia adequada para determinar a distribuição espacial da velocidade do vento em um terreno complexo é fundamental para aprimorar este estudo. Neste sentido, o presente estudo pretende contribuir com a avaliação de resultados obtidos através da Simulação de Grandes Escalas (LES) em escoamentos atmosféricos sobre terrenos complexos a fim de avaliar a utilização deste método. O estudo é desenvolvido através da realização de simulações numéricas sobre um modelo reduzido, avaliado experimentalmente no Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann, com simulação da Camada Limite Atmosférica, publicado por Mattuella, 2012. Os resultados são comparados com os dados experimentais e com resultados numéricos de simulações RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), desenvolvidas por Freitas Filho, 2012.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Freitas Filho, 2012, fez um estudo comparativo entre os resultados de uma simulação numérica computacional e os resultados obtidos em um ensaio de túnel de vento, a fim de validar uma metodologia para análise *micrositing* em um terreno de superfície complexa. O estudo experimental foi realizado por Mattuella, 2012, onde um modelo reduzido de um terreno complexo foi estudado simulando experimentalmente a camada limite atmosférica no túnel de vento Professor Joaquim Blessmann. Freitas Filho, 2012, emprega o método dos Volumes Finitos com diferentes modelos de turbulência RANS. O estudo é dividido em três casos. No primeiro, a rugosidade superficial do terreno é desconsiderada e o modelo $k-\omega$ *SST* foi aplicado. No segundo caso a rugosidade superficial foi estipulada de acordo com o modelo do ensaio em túnel de vento e foi utilizado o modelo de turbulência $k-\varepsilon$. No terceiro caso, a rugosidade superficial foi estipulada do mesmo modo que no segundo e o modelo de turbulência utilizado foi o $k-\omega$ *SST*. Ao comparar os resultados dos campos de velocidade, pode-se obter a localização que apresentou o melhor potencial eólico de uma região.

Fleck, 2012, reproduz numericamente o experimento *Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI*, realizado em 2000 no túnel de vento *Ames* da NASA, e apresenta o estudo da esteira de vórtices produzida pela turbina eólica de duas pás e 10 metros de diâmetro, operando à velocidade constante utilizando o software comercial ANSYS FLUENT versão 13.0 com o método LES. Os dados da simulação foram comparados aos dados experimentais fornecidos por dois anemômetros sônicos instalados 5,8 m à jusante do rotor, sendo o anemômetro 1 afastado horizontalmente 0,45 m do eixo do rotor e o anemômetro 2 afastado 2,45 m do eixo do rotor. Foram verificadas diferenças na ordem de 1% para o anemômetro 1 e 6% para o anemômetro 2. Os dados também foram comparados com estudos recentes em RANS o notou-se uma diferença significativa. As perturbações ultrapassaram a marca dos 10 diâmetros a jusante e atingiram o final do domínio a 15 diâmetros. A esteira não apresentou simetria axial, e o ponto de maior redução na velocidade do escoamento foi detectado fora da linha de centro do rotor.

Sarlak *et al.*, 2015, realizou uma série de simulações LES com a intenção de validar características específicas da simulação de grandes escalas nas interações da esteira de geradores eólicos. Foram modelados dois rotores alinhados e os efeitos da resolução da malha, do tamanho de filtro de escala de sub-malha (*subgrid scale* - SGS), e o número de Reynolds foram investigados para determinadas velocidades de escoamento. Os resultados numéricos foram validados com resultados de medições em túnel de vento em termos da velocidade média, intensidade de turbulência e coeficientes de potência e empuxo. Foi dada uma ênfase especial para o papel dos modelos escala de sub-malha na influência do formato de escoamento e na carga do gerador eólico. Foi descoberto que o modelo de SGS tem pouca influência na previsão da esteira e no desempenho do gerador eólico se comparado com o tamanho de filtro e com a resolução da malha.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Pode-se definir um escoamento laminar como um escoamento em que as partículas fluidas movem-se em camadas lisas, ou lâminas; um escoamento turbulento é aquele em que as partículas fluidas misturam-se rapidamente enquanto se movimentam ao longo do escoamento, devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades [Fox *et al.*, 2012].

Para definir o comportamento de um escoamento como laminar ou turbulento, podemos utilizar o número de Reynolds, Re , definido na equação 3.1.

$$Re \equiv \frac{u.l}{\nu} \quad (3.1)$$

Onde ν é a viscosidade cinemática em m^2/s , u é a corrente axial livre em m/s e l é o comprimento característico do sistema em m , resultando em um parâmetro adimensional.

ν pode ser definido como:

$$\nu \equiv \frac{\mu}{\rho} \quad (3.2)$$

Onde μ é a viscosidade dinâmica em $Pa.s$ e ρ é a massa específica em kg/m^3 .

3.1 As equações fundamentais

As equações de Navier-Stokes são utilizadas para modelar o escoamento, assumindo o fluido do sistema estudado como incompressível, newtoniano e em regime

transiente. Pode-se apresentar tais equações na notação indicial através das equações 3.3 e 3.4 sendo estas a equação de conservação de massa e a equação de conservação de *momentum*, respectivamente [Maliska, 2014].

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.4)$$

Onde, u_i e u_j são os campos de velocidade nas direções principais, p é o campo de pressão, t é o tempo, ν é a viscosidade cinemática, ρ é a massa específica e $i, j = 1, 2, 3$.

3.2 Modelagem da turbulência

Para resolução das equações de fundamentais, pode-se optar por métodos numéricos computacionais onde o sistema é representado por um domínio discreto, tornando possível, em tese, a solução de todas as escalas de comprimento e tempo envolvidas através da abordagem de Simulação Numérica Direta (*Direct Numerical Simulation – DNS*). Porém devido a grande variação das escalas de comprimento e de tempo envolvidas no sistema de escoamento turbulento com números de Reynolds elevados se faz necessária a utilização de métodos de modelagem de turbulência para que o tempo computacional não se torne proibitivo [Fleck, 2012].

Para a representação da influência da turbulência nos problemas de fluidodinâmica, em 1895, Osbourne Reynolds propôs um conjunto de equações que deu origem ao método RANS. Este método é baseado na decomposição das variáveis em médias temporais e suas flutuações, resultando em um sistema com mais incógnitas do que equações. Para tornar possível a solução deste sistema são propostos modelos de turbulência baseados em dados empíricos [Petry, 2002].

O método LES pode ser considerado uma alternativa intermediária entre DNS e RANS [Mo e Lee, 2011]. O método LES foi proposto inicialmente por Smagorinsky, em 1963, baseando-se na decomposição de escalas de Reynolds, separando altas e baixas frequências utilizando um processo de filtragem espacial [Petry, 2002]. Para tanto, as variáveis das equações 3.3 e 3.4 são decompostas em duas partes, sendo estas a parte de grandes escalas e a parte de sub-malha conforme a equação 3.5 [Fleck, 2012].

Nessas equações governantes são separadas em uma parte dita de grandes escalas e em outra parte dita sub-malha:

$$F(\vec{x}, t) = \bar{F}(\vec{x}, t) + F'(\vec{x}, t) \quad (3.5)$$

Onde, $F(\vec{x}, t)$ é uma função genérica, $\bar{F}(\vec{x}, t)$ é a parte de grandes escalas e $F'(\vec{x}, t)$ é a parte de sub-malha. A parte filtrada é dada pela equação 3.6:

$$\bar{F}(\vec{x}, t) = \int_{\underline{}} F(\vec{x}, t) G(\vec{x} - \vec{x}') d\vec{x}' \quad (3.6)$$

Onde $G(x)$ é a função filtro, sendo que uma das formas mais utilizadas é a função filtro por volume, ou filtro *box*, dada pela equação a seguir [Fleck, 2012]:

$$G(\vec{x}) = \begin{cases} 1/\Delta^3; & |\vec{x}| \leq \Delta/2 \\ 0; & |\vec{x}| > \Delta/2 \end{cases} \quad (3.7)$$

Onde Δ é o tamanho característico do filtro, o que define a frequência de corte da filtragem. Aplicando este filtro nas equações 3.3 e 3.4 obtém-se as equações 3.8 e 3.9, abaixo [Fleck, 2012].

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.9)$$

Pode-se notar que nas equações acima o termo do produto filtrado, $\bar{u}_i \bar{u}_j$ é não linear, tornando o sistema não solucionável. Portanto, a equação 4.1 é aplicada para decompor o termo não linear resultando na equação 3.10 abaixo [Fleck, 2012].

$$\overline{u_i u_j} = \overline{(\bar{u}_i + u'_i)(\bar{u}_j + u'_j)} = \bar{u}_i \bar{u}_j + \bar{u}_i u'_j + u'_i \bar{u}_j + \overline{u'_i u'_j} \quad (3.10)$$

Mesmo com a decomposição de variáveis o problema continua não solucionável pela presença de produtos filtrados na equação 3.10. Sendo assim define-se através das equações 3.11, 3.12 e 3.13 o tensor de Leonard, L_{ij} , o tensor de Reynolds sub-malha, τ_{ij} , e o tensor cruzado, C_{ij} , respectivamente [Fleck, 2012].

$$L_{ij} = \overline{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (3.11)$$

$$\tau_{ij} = \overline{u'_i u'_j} \quad (3.12)$$

$$C_{ij} = \overline{\bar{u}_i u'_j} + \overline{u'_i \bar{u}_j} \quad (3.13)$$

Substituindo os tensores acima na equação 3.10, obtemos a equação 3.14 abaixo.

$$\overline{u_i u_j} = \bar{u}_i \bar{u}_j + \tau_{ij} + C_{ij} + L_{ij} \quad (3.14)$$

Substituindo-se esses resultados na equação 3.9, obtém-se as equações governantes filtradas:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - (\tau_{ij} + C_{ij} + L_{ij}) \right] \quad (3.16)$$

Esse sistema possui um número maior de incógnitas do que de equações, caracterizando um sistema aberto, assim como o método RANS [Freire *et al.*, 1998], por tanto é apresentada a seguir a modelagem de sub-malha de turbulência para fechamento do método LES.

3.2.1 Modelagem sub-malha da turbulência.

Na maioria dos modelos de sub-malha é utilizado o conceito de viscosidade turbulenta, conhecido como aproximação de Boussinesq, onde o tensor de Reynolds sub-malha é expresso em função da taxa de deformação gerada pelo campo de velocidades filtrado e da energia cinética turbulenta, conforme na equação 3.17 abaixo [Fleck, 2012]:

$$\tau_{ij} = -\nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3.17)$$

Onde k é a energia cinética da turbulência, δ_{ij} é o Delta de Kronecker, e ν_t é a viscosidade turbulenta. Há diversos modelos para o cálculo de ν_t , entre eles, o modelo de sub-malha de Smagorinsky, 1963, que considera a hipótese de que há equilíbrio local na sub-malha onde a taxa de produção de tensões turbulentas, γ , é igual à taxa de dissipação de tensões turbulentas ε conforme a equação 3.18 abaixo [Fleck, 2012].

$$\gamma = \varepsilon \quad (3.18)$$

A produção de tensões turbulentas pode ser escrita em função do tensor taxa de cisalhamento do campo filtrado, S_{ij} , e da viscosidade turbulenta, ν_t . A dissipação de tensões turbulentas pode ser escrita em função da escala de velocidade, $(\overline{u'_i u'_j})^{3/2}$, e do comprimento característicos sub-malha, l , e uma constante, c_1 [Fleck, 2012].

$$\gamma = -\overline{u'_i u'_j S_{ij}} = 2\nu_t S_{ij} S_{ij} \quad (3.19)$$

$$\varepsilon = -\frac{c_1 (\overline{u'_i u'_j})^{3/2}}{l} \quad (3.20)$$

Também supõe-se, que a viscosidade turbulenta de sub-malha seja proporcional a estas duas escalas, conforme a equação seguinte:

$$\nu_t = c_1 l (\overline{u'_i u'_j}) \quad (3.21)$$

Sendo assim, a viscosidade turbulenta de sub-malha é expressa abaixo:

$$\nu_t = (C_S l)^2 \sqrt{2S_{ij} S_{ij}} \quad (3.22)$$

O comprimento característico, l , é calculado em função de cada célula da malha. A constante de Smagorinsky, C_S , foi determinada analiticamente como sendo igual a 0,18 por Lilly em 1967 para o caso de turbulência homogênea e isotrópica [Fleck, 2012], porém o valor de 0,1 mostrou-se mais adequado para grande parte dos problemas sendo este adotado como padrão no código do software ANSYS Fluent [ANSYS, 2009]

4 METODOLOGIA

O propósito deste trabalho é apresentar um estudo sobre a simulação numérica com o método LES em diferentes malhas e compará-los com resultados, obtidos no estudo sobre um modelo reduzido avaliado em túnel de vento, cedidos pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções – LAC [Mattuella, 2012] e com os resultados numéricos obtidos

por Freitas Filho, 2012, utilizando o método RANS, sem tratamento de rugosidade, para uma mesma geometria de terreno complexo.

4.1 Modelagem Numérica

A análise numérica computacional foi baseada equações de Navier-Stokes filtradas/LES, com modelo de turbulência Smagorinsky-Lilly [ANSYS, 2009]. O programa selecionado, ANSYS Fluent 13, emprega o método de volumes finitos para solução aproximada das equações 3.15 e 3.16. Utilizou-se uma simulação em regime transiente, sem transferência de calor e também se considera o escoamento incompressível. O esquema para o acoplamento pressão-velocidade é o SIMPLE (*Semi Implicit Linked Equations*), desenvolvido por Patankar e Spalding, 1972 [Wilcox, 1998], e a discretização espacial utilizou-se *Implicit-Upwind* de segunda ordem. O critério de convergência é fixado em 1×10^{-5} absoluto. O fluido de trabalho é considerado ar padrão a 25°C.

4.2 Dados experimentais

Os dados experimentais para comparação neste trabalho foram apresentados por Freitas Filho, 2012, e cedidos pelo Prof. Dr. Acir Mércio de Loredou-Souza. O experimento foi realizado no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann localizado no Laboratório de Aerodinâmica das Construções – LAC da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS e foi publicado na tese de doutorado de Mattuella, 2012.

4.2.1 Modelo Experimental

O modelo utilizado foi gerado a partir das curvas de nível do morro do Jaburu localizado no município de Vitória no Estado do Espírito Santo. As medições foram realizadas em um modelo reduzido do morro sobre o piso do túnel de vento. A Camada Limite Atmosférica é simulada através de elementos de rugosidade no experimento em túnel de vento. Foram definidos nove pontos de medição onde foi verificada a velocidade e a turbulência em 20 alturas. As coordenadas dos pontos 1 ao 9 utilizados medidos em túnel de vento são ilustradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Coordenadas da localização dos pontos de medição [Freitas Filho, 2012].

Pontos	X (m)	Y (m)	Z (m)
Ponto 1	1,0629	0,5451	0,1918
Ponto 2	0,9830	0,5479	0,1439
Ponto 3	0,8176	0,5537	0,0842
Ponto 4	0,7013	0,5577	0,0406
Ponto 5	0,5346	0,5635	0,0099
Ponto 6	0,1240	0,5779	0,0000
Ponto 7	1,1392	0,5424	0,1570
Ponto 8	1,2649	0,5380	0,0872
Ponto 9	1,4700	0,5300	0,0087

4.2.1.1 Medição dos perfis de velocidades normalizados

Os dados para cada ponto de medição foram normalizados com uma velocidade de referência a uma cota $Z = 0,45$ metros acima da superfície. As velocidades normalizadas estão apresentadas na Tabela 4.2 e foram obtidas através da razão entre a velocidade medida e a velocidade de referência [Freitas Filho, 2012].

4.3 Modelo Geométrico Computacional

O modelo geométrico computacional foi gentilmente cedido pelo Eng. Mestre Dalmedson Gaúcho R. de Freitas Filho. O domínio computacional foi gerado em escala real com as seguintes dimensões principais: 1880 metros de comprimento, 1312 metros de largura por 193 metros de altura. O comprimento do domínio foi aumentado para diminuir a influência das condições de entrada e saída no resultado. A escala do modelo foi alterada para a escala utilizada no modelo de túnel de vento assim as dimensões principais resultantes foram: 2,99 metros de comprimento, 1,3 metros de largura e 0,9 metros de altura e a superfície do modelo do terreno complexo pode ser visualizado na Figura 4.1.

Tabela 4.2 – Velocidades normalizadas medidas em túnel de vento [Freitas Filho, 2012].

Z (mm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
10	0,827	0,328	0,371	0,340	0,332	0,297	0,071	0,128	0,156
15	0,835	0,424	0,428	0,378	0,379	0,341	0,077	0,123	0,167
20	0,843	0,494	0,456	0,407	0,404	0,367	0,085	0,120	0,174
25	0,845	0,540	0,484	0,423	0,424	0,405	0,085	0,122	0,178
30	0,845	0,574	0,500	0,444	0,440	0,436	0,087	0,120	0,180
40	0,845	0,631	0,539	0,480	0,478	0,481	0,172	0,120	0,197
50	0,846	0,673	0,554	0,511	0,502	0,588	0,494	0,123	0,213
70	0,852	0,721	0,611	0,561	0,551	0,646	0,825	0,125	0,227
100	0,870	0,791	0,677	0,624	0,620	0,686	0,858	0,174	0,240
130	0,886	0,831	0,733	0,683	0,674	0,734	0,877	0,475	0,272
160	0,903	0,860	0,781	0,735	0,705	0,781	0,897	0,835	0,372
200	0,921	0,897	0,828	0,790	0,777	0,835	0,919	0,904	0,589
250	0,947	0,930	0,884	0,854	0,842	0,883	0,948	0,929	0,854
300	0,962	0,953	0,930	0,898	0,889	0,921	0,964	0,951	0,913
350	0,973	0,972	0,959	0,943	0,937	0,959	0,981	0,973	0,946
400	0,986	0,987	0,983	0,976	0,968	0,983	0,990	0,989	0,982
450	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
500	1,011		1,014	1,015		1,009		1,012	1,019
550			1,028	1,033		1,027			
600									

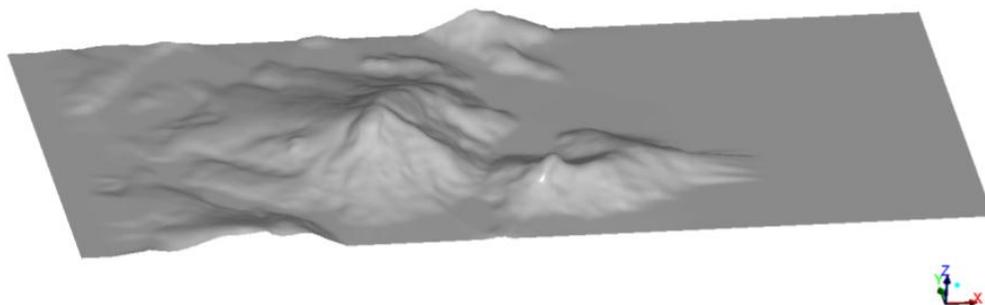


Figura 4.1 – Superfície computacional do terreno estudado utilizada nos experimentos.

4.4 Similaridade

Para assegurar a similaridade entre o experimento em túnel de vento e a simulação, a largura e a altura da seção de entrada do domínio computacional são as mesmas do túnel de vento assim como a geometria do terreno. O perfil de velocidades na entrada do domínio foi definido de modo a ser igual ao perfil de velocidades simulado em túnel de vento. Como o fluido de trabalho também é o mesmo, sendo assim, utilizando a equação 3.1, o número de Reynolds do experimento, Re_e , é igual ao número de Reynolds da simulação, Re_s , resultando em uma condição de similaridade.

$$Re_e = Re_s \quad (4.1)$$

4.5 Discretização de malha

O domínio computacional foi discretizado em elementos finitos utilizando programa ANSYS-ICEM 13.0 baseando-se nas malhas utilizadas por Freitas Filho, 2012. O programa empregado para a simulação numérica utiliza o método de elementos finitos para a discretização do domínio, porém o método de volumes finitos para a obtenção das equações algébricas aproximadas. A discretização foi feita em células hexaédricas e com maior densidade de células nas proximidades da superfície do terreno. Foram geradas 4 malhas variando os seus respectivas quantidades de células conforme a Tabela 4.3. Sendo que a distribuição em z é exponencial com menor espaçamento na parede do terreno de 0,001 m. As demais distribuições de elementos são constantes com exceção das malha 3 e 4, onde foi feito um refinamento maior na região de interesse do escoamento. A Figura 4.2 apresenta a malha 4 como exemplo.

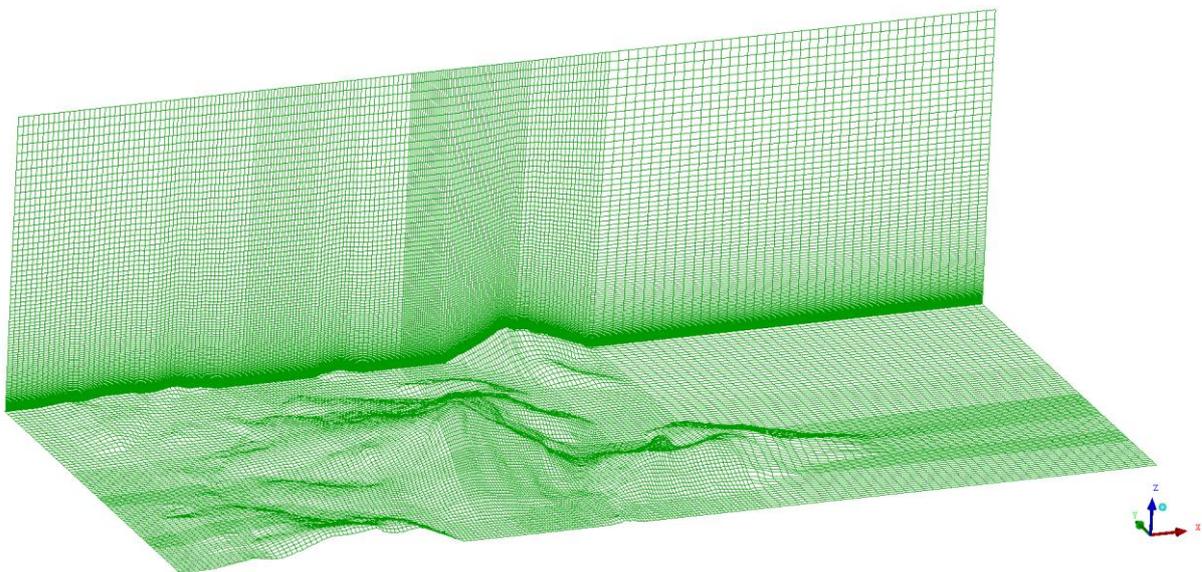


Figura 4.2 – Malha gerada sobre geometria do terreno.

Tabela 4.3 - Características principais de divisão do domínio computacional

Caso	Nº aproximado de células
1	2×10^5
2	4×10^5
3	1×10^6
4	$1,5 \times 10^6$

4.6 Condições de Contorno

As condições de contorno tem influência direta no comportamento do escoamento e, por tanto, devem representar o que foi observado no experimento a ser comparado. Foram adotadas as mesmas condições apresentadas por Freitas Filho, 2012.

4.6.1 Condições de entrada

A opção para o perfil de vento na entrada foi a de *velocity-inlet* [ANSYS, 2009]. Foram atribuídas velocidades nulas para os eixos y e z . Na direção x , foi utilizada uma UDF (*User-Defined Function*), que representa o perfil de Camada Limite Atmosférica simulada na entrada da seção de testes do experimento em túnel de vento, descrita pela Equação 4.2, abaixo [Freitas Filho, 2012].

$$\begin{cases} \frac{U}{U(0,8)} = 1 - \left| \left(\frac{z-0,8}{0,8} \right)^{0,23} \right| & 0 < z < 0,8 \\ \frac{U}{U(0,8)} = 1 - \left| \left(\frac{z-0,8}{0,8} \right)^{0,11} \right| & 0,8 \leq z < 0,9 \end{cases} \quad (4.2)$$

O código em linguagem de programação C, utilizado como UDF é apresentado no Anexo I.

Para o tratamento da turbulência foram utilizadas as entradas de intensidade média de turbulência de 10% e diâmetro hidráulico de 1,06 metros [Freitas Filho, 2012].

4.6.2 Condições de parede e solo

Foi utilizada a condição de parede (opção *wall* do programa ANSYS–Fluent 13.0) sem deslizamento, hidraulicamente lisa, impermeável e adiabática.

4.6.3 Condições de saída

Foi utilizada a condição de escoamento livre (opção *outflow* do programa ANSYS–Fluent 13.0). Nesta condição, os dados de pressão e velocidade são extrapolados do domínio e, não há necessidade de informar nenhuma condição de saída [ANSYS, 2009].

4.7 Discretização Temporal

A discretização temporal se faz necessária para a simulação do problema utilizando a metodologia LES na abordagem da turbulência [Fleck, 2012]. A fim de obter a estabilidade independente do passo temporal, foi utilizado o esquema de equacionamento implícito de segunda ordem [ANSYS 2009].

O passo de tempo máximo foi definido de modo que uma partícula atravessando o domínio em um determinado tempo t_n qualquer e contida em uma célula n esteja contida no espaço ocupado pela célula n e suas células adjacentes no tempo t_{n+1} .

Definindo:

$$t' = t_{n+1} - t_n = \text{Constante} \quad (4.3)$$

Onde t' é o passo de tempo estipulado para a simulação.

Propôs-se a seguinte equação:

$$t' = \frac{u_{m\acute{a}x}}{l_{m\acute{i}n}} \quad (4.4)$$

Onde $u_{m\acute{a}x}$ é a velocidade máxima do escoamento e $l_{m\acute{i}n}$ é a menor dimensão presente em uma célula da malha. A maior velocidade presente no problema está na ordem de

20 m/s, porém, tendo em vista que l_{\min} está contido nas proximidades da parede do terreno, onde a maior velocidade observada em uma simulação previa foi de aproximadamente $u'_{\max} = 10$ m/s. Assim com l_{\min} definido no Item 4.5 como 0,001 metros obteve-se um valor de passos de tempo $t' = 0,0001$ segundos.

4.7.1 Recursos Computacionais

Os recursos computacionais disponibilizados para as simulações foram resumidamente um computador com processador Intel® Core i7-3520M - 2,9 GHz e 8 Gb de RAM, um computador com uso cedido pelo Laboratório de Mecânica dos Fluidos - LMF da UFRGS com processador AMD FX™ 8320 – 3,5 GHz e 16 Gb de RAM e um servidor também com uso cedido pelo LMF com 2 processadores Intel Xeon® X5690 – 3,5 GHz e 48 Gb de RAM neste último foram utilizados 8 núcleos devido ao limite imposto pela licença adquirida.

4.7.2 Aquisição de dados

Foram adquiridos os dados de magnitude de velocidade para cada linha vertical a partir dos pontos indicados na Tabela 4.1 (Figura 4.3) e para cada passo de tempo simulado totalizando um total de passos, n_t , de modo que uma partícula hipotética viajando na velocidade de referência $U_{\infty} = 14.27$ m/s [Freitas Filho, 2012] escoamento atravessasse todo o comprimento, L_D , do domínio após o estabelecimento do escoamento, resultando em um número de passos de tempo $n_t = 2096$, utilizando a equação abaixo:

$$n_t = \frac{L_D}{U_{\infty} t'} \quad (4.5)$$

Como se trata de uma simulação em regime transiente se faz necessária a integração dos dados. Os dados adquiridos foram exportados em um arquivo de texto ASCII para cada passo de tempo. Após a aquisição de dados, foi feita a integração dos arquivos utilizando um programa escrito em linguagem computacional Python. O texto do programa pode ser visto no Apêndice I. Após a integração dos dados, estes foram inseridos como banco de dados em arquivo do software Microsoft Excel 2010.

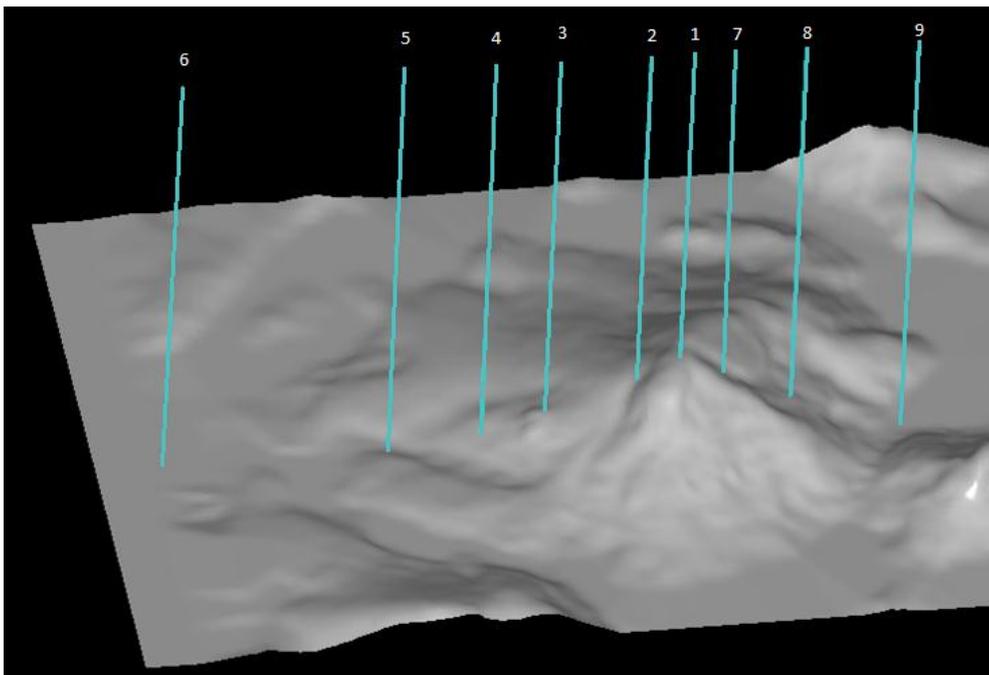


Figura 4.3 – Posição sobre o terreno das linhas verticais de aquisição de dados de medição de magnitude de velocidade.

5 RESULTADOS

No método LES, uma das principais limitações é que as simulações são altamente dependentes das malhas empregadas devido à dependência inerente da operação de filtragem das pequenas escalas [You *et al.*, 2010]. Em outras palavras, o LES como abordado no presente estudo é naturalmente malha-dependente, uma vez que sempre haverá uma parcela a ser simulada. Essa parcela é o modelo sub-malha [Freitas Filho, 2012]. Tal dependência de malha pode ser evidenciada na Equação 3.22 onde se pode notar que a viscosidade turbulenta, ν_t varia com o quadrado do comprimento característico do volume.

Em vista disso, optou-se então por realizar um estudo de qualidade de malha baseada em comparações com resultados experimentais, em que é calculada a diferença relativa às curvas obtidas em túnel de vento com as curvas obtidas nas simulações para cada ponto de interesse. A Tabela 5.1 apresenta as diferenças relativas médias para cada ponto, de acordo com a equação 5.1, abaixo:

$$\text{diferença relativa} = e_r = \frac{|u' - u_e|}{u_e} \quad (5.1)$$

Onde e_r é a diferença relativa para cada medida obtida na simulação em relação às medidas do experimento, u' é a velocidade medida na simulação e u_e é a velocidade medida no experimento. Os perfis de velocidade obtidos nas simulações em comparação com os obtidos em túnel de vento estão apresentados no APÊNDICE II.

Pode-se notar que a malha 4 apresentou a menor diferença relativa. A malha 4 apresentou também, o perfil de velocidades mais similar ao perfil obtido em experimento como pode ser visto na Figura 5.1 por tanto foi considerada a malha de maior qualidade.

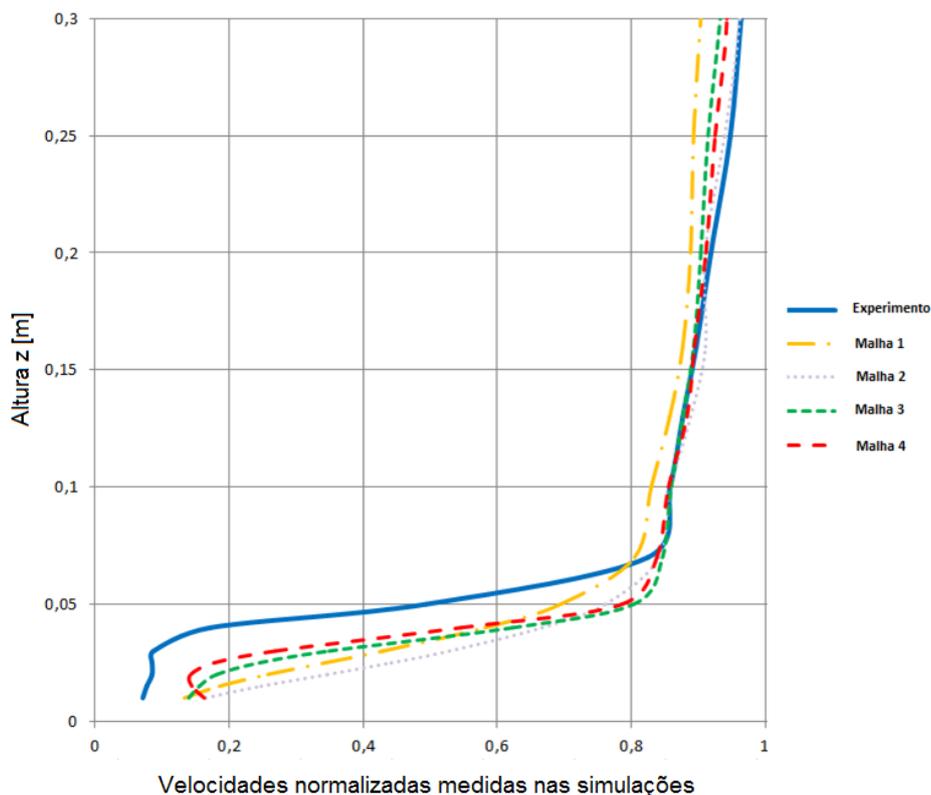


Figura 5.1 – Detalhe próximo à superfície dos perfis de velocidade do experimento e das simulações no Ponto 7

Tabela 5.1 – Diferença média relativa para cada perfil de interesse.

Malha	Nº de células	Erro Relativo									
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8	Ponto 9	Média
1	2×10^5	4,4%	6,7%	4,7%	3,7%	6,1%	2,7%	32,0%	30,6%	31,2%	13,6%
2	4×10^5	3,3%	4,8%	3,6%	5,3%	5,0%	2,5%	26,2%	28,4%	26,3%	11,7%
3	1×10^6	2,6%	5,1%	4,3%	4,5%	5,9%	2,9%	17,9%	32,3%	42,6%	13,1%
4	$1,5 \times 10^6$	2,5%	5,1%	4,2%	4,3%	6,6%	2,7%	14,4%	23,4%	31,9%	10,6%

5.1 Perfil de velocidades obtido

Para fins de avaliação qualitativa do campo de velocidades na zona dos pontos de medição é apresentada, na Figura 5.2, a distribuição de velocidades em um plano contendo as linhas dos pontos de medição 6 e 9, para a malha 4, capturada em um determinado passo de tempo. Pode-se notar uma região de baixas velocidades na parte da face traseira (à direita na Figura 5.2) caracterizando a zona de descolamento, que está na região dos pontos 7, 8 e 9 podendo esta, ser a causa do aumento da diferença relativa dos respectivos perfis.

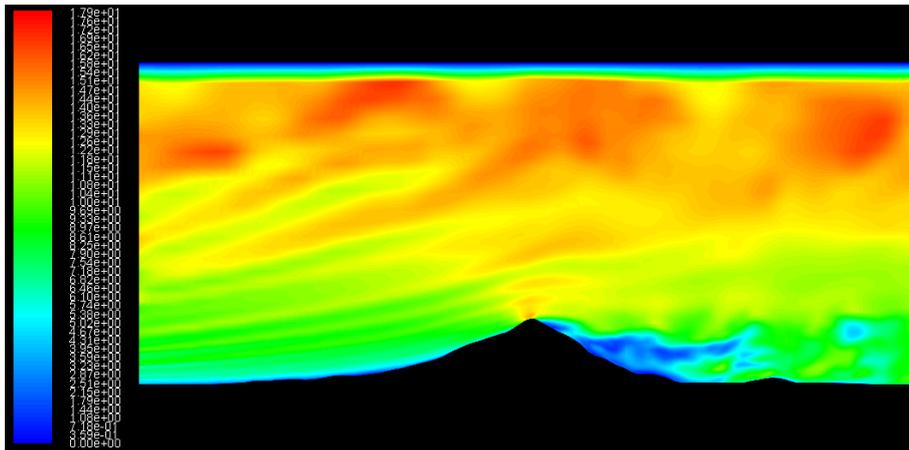


Figura 5.2 – Captura do perfil de velocidades no plano onde constam os pontos de medição.

Estão apresentados para, na Figura 5.3, os vetores de magnitude de velocidade caracterizando a forma da camada limite em um determinado passo de tempo.

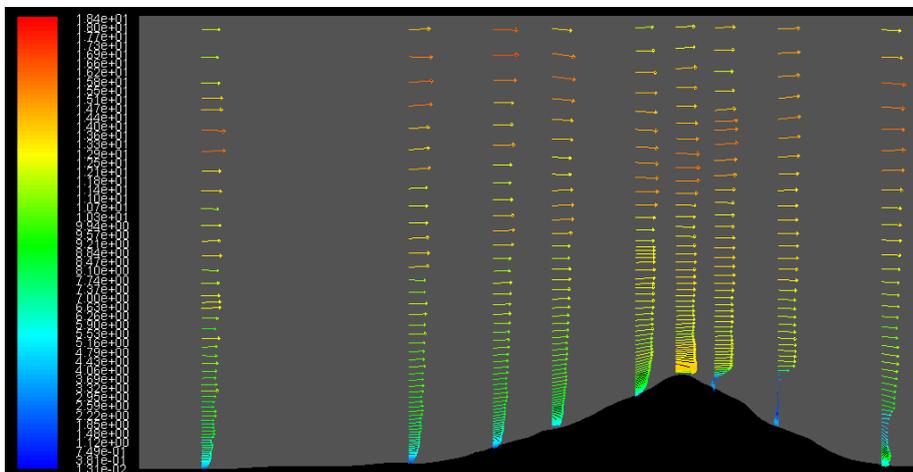


Figura 5.3 – Captura dos vetores de magnitude de velocidade nos pontos de interesse – malha 4.

5.2 Comparação entre resultados RANS e LES

Os resultados obtidos foram comparados com os resultados obtidos por Freitas Filho, 2012 utilizando RANS para a solução do problema e estão apresentados na Tabela 5.2 e graficamente na Figura 5.4.

Tabela 5.2 – Comparação entre resultados de Simulação utilizando RANS e LES

Caso		1 RANS ^[1]	3 RANS ^[1]	Malha 4
Nº de células		2,5x10 ⁶	2,5x10 ⁶	1,5x10 ⁶
Modelo		<i>k-w SST</i>	<i>k-w SST</i>	LES
Rugosidade [m]		0,000 ^[2]	0,005 ^[3]	0,000 ^[2]
Diferença Relativa	Ponto 1	1,3%	1,6%	2,5%
	Ponto 2	17,2%	15,4%	5,1%
	Ponto 3	8,2%	7,7%	4,2%
	Ponto 4	9,3%	8,2%	4,3%
	Ponto 5	13,8%	10,7%	6,6%
	Ponto 6	11,5%	11,5%	2,7%
	Ponto 7	81,2%	53,2%	14,4%
	Ponto 8	38,4%	23,1%	23,4%
	Ponto 9	64,3%	45,1%	31,9%
	Médio	27,3%	19,6%	10,6%

^[1] Simulações apresentadas por Freitas Filho, 2012; ^[2] simulação sem abordagem da rugosidade do terreno; ^[3] simulação com abordagem da rugosidade.

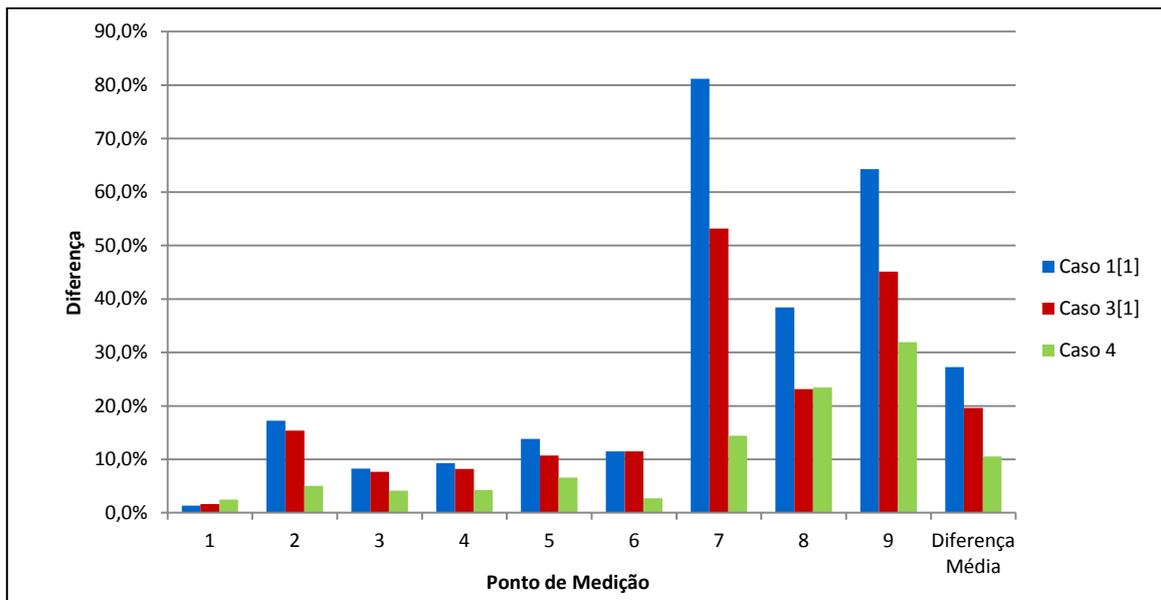


Figura 5.4 – diferença relativa entre resultados numéricos e experimentais relativo dos casos comparados para cada ponto de medição. Casos 1 e 3: ^[1] Simulações apresentadas por Freitas Filho, 2012. Caso 4 – Presente trabalho – malha 4

6 CONCLUSÕES

Os perfis de velocidade obtidos nas simulações foram coerentes com os dados de túnel de vento do problema e apresentaram erro concentrado principalmente nas proximidades do terreno onde, de modo geral, podem-se notar velocidades maiores do que as medidas no experimento. Tal fato pode ser explicado pela negligência da rugosidade superficial presente no modelo utilizado em simulações numéricas.

As maiores diferenças encontradas concentraram-se nos pontos 7, 8 e 9 onde há forte influência da turbulência e do descolamento a jusante do morro. Observa-se uma diminuição de diferenças em relação aos casos simulados por RANS com exceção do ponto 1, onde os erros por RANS foram menores, e do ponto 8, quando comparado com o caso RANS considerando a rugosidade do terreno. O erro médio teve diminuição de 16,7% em relação ao caso RANS sem rugosidade e de 9,1% quando em relação ao caso RANS com rugosidade, sendo assim, respectivamente obteve-se uma redução relativa de erro de 61% e 46%. O que pode caracterizar uma desvantagem para a utilização do método LES é o tempo computacional sendo este na ordem de 5 dias utilizando o servidor cedido pelo LMF.

Observa-se ainda que, ao refinar a malha, as simulações LES aproximam-se do comportamento observado nos resultados experimentais, apresentando além da redução da diferença relativa média, também uma aproximação qualitativa da distribuição de velocidades em cada ponto de avaliação.

Diante das conclusões apresentadas, a fim de melhorar os resultados nas proximidades do terreno, sugere-se empregar o método LES incluindo a abordagem da rugosidade no problema, além disso, pode-se estudar a influência dos diferentes modelos de sub-malha de maneira semelhante ao apresentado por Sarlak *et al.*, 2015.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS. **"ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide"**. Canonsburg: ANSYS, Inc, 2009.
- EPE. **"Plano Decenal de Expansão de Energia 2023"**, Brasília. 2014.
- Filho, D. G. R. D. F. **"Análise da Aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional Para Avaliação do Potenciais Eólico em Terrenos Complexos"**. Porto Alegre, UFRGS, 2012.
- Fleck, G. D. **"Simulação de Grandes Escalas Para ANálise Numérica da Esteira Aerodinâmica da Turbina Eólica NREL UAE Phase VI"**, Porto Alegre: UFRGS, 2012.
- Fox, R. W.; Pritchard, P. J.; Mcdonald, A. T. **"Introdução à Mecânica dos Fluidos"**, Tradução de Ricardo Nicolau Nassar Koury e Luiz Machado. 7ª. ed. Rio de Janeiro, LTC, 2012.
- Freire, A.; Menut, P.; Su, J. **"Turbulência"**, Rio de Janeiro, ABCM, v. 1, 1998.
- Freitas Filho, D. G. R. **"Análise da Aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional Para Avaliação do Potenciais Eólico em Terrenos Complexos"**, Porto Alegre, UFRGS, 2012.
- Lilly, D. K. **"The Representation of Small-Scale Turbulence in Numerical Simulation Experiments"**, Proc. IBM Scientific Computing Symposium on Environmental Sciences, p. 195, 1967.
- Maliska, C. R. **"Transferência de Calor e Dinâmica dos Fluidos Computacional"**, 2ª. ed., Rio de Janeiro, LTC, 2014.
- Mattuella, J. M. L. **"Avaliação em Túnel de Vento do Comportamento da Camada Limite Atmosférica em Terrenos Complexos"**, Porto Alegre, UFRGS, 2012.
- 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.
- Petry, A. P. **"Análise Numérica de Escoamentos Turbulentos Tridimensionais Empregando o Método de Elementos Finitos e Simulação de Grandes Escalas"**, Porto Alegre, UFRGS, 2002.
- Sarlak, H.; Meneveau, C.; SORENSEN, J. N. **"Role of subgrid-scale modeling in large eddy simulation of wind"**, Renewable Energy, v. 77, p. 386-399, 2015.
- Wilcox, D. C. **"Turbulence Modeling for CFD"**, Anaheim, DCW Industries, 1998.
- You, D.; Bose, S.; Moin, P. **"Grid-Independent Large-Eddy Simulation of Compressible Turbulent Flows Using Explicit Filtering"**, "Center for Turbulence Research, Proceedings of the Summer Program", p. 203-210, 2010.
- Zero Hora. **"Pequim mostra nascer do Sol em telões em manhã escurecida pela poluição"**, <http://www.zh.clicrbs.com.br>. Acessado em: 15 jun. 2015.

ANEXO I

O código fonte utilizado para o perfil de velocidades, UDF (*User-Defined Function*) nas simulações,

```
#include "udf,h"
float abs(float x)
{
if( x < 0 )
return -x;
else
return x;
}
DEFINE_PROFILE(inlet_x_velocity, thread, position)
{
real x[ND_ND]; /* this will hold the position vector */
real Z;
real CC;
real VREF = 14,27; /*VELOCIDADE EM Z=0,8*/
real P1 = 0,23; /*EXPOENTE RUGOSO 0,23*/
real P2 = 0,11; /*EXPOENTE LISO 0,11*/
face_t f;
begin_f_loop(f, thread)
{
F_CENTROID(x,f,thread);
Z = x[2];
CC = 1-abs((Z-0,8)/0,8);
if (CC<=0,8)
F_PROFILE(f, thread, position) = VREF*pow(CC,P1);
else
F_PROFILE(f, thread, position) = VREF*pow(CC,P2);
}
end_f_loop(f, thread)
}
```

APÊNDICE I

```

import os

local = "[DIRETÓRIO DA AQUISIÇÃO DE DADOS]"
temp = "filelist.txt"
arquivoa = "dadosa.txt"
arquivo = "dados.txt"
filelist = open(local + temp, "w")
vetor = os.listdir(local)
i = 0
ii = len(vetor)
print(ii)
for i in range(ii):
    a= vetor[i]
    print(a[0:3])
    if a[0:3] == "[NOME DO ARQUIVO DE DADOS]":
        filelist.write(vetor[i] + "\n")
    i = i + 1
filelist.close()
filelist = open(local + temp, "r")
vetor = filelist.readlines()
#primeiro arquivo
filename = vetor[0]
filen= local + filename[:-1]
print(filen)
file1=open(filen, "r")
vetora = file1.readlines()
print (len(vetora))
arquivodados = open(local + arquivoa,"w")
arquivodados.write("n, x, y, z," + filename[-5:-1] + "\n")
ii=len(vetora)
for i in range(1,ii):
    arquivodados.write(vetora[i])
    i=i+1
arquivodados.close()
file1.close()
#proximos arquivos
ii= len(vetor)
for i in range(1,ii):
    print(i)
    filename = vetor[i]
    filen= local + filename[:-1]
    #print(filen)
    file1 = open(filen, "r")
    #print(file1)
    vetorb = file1.readlines()
    arquivodados = open(local + arquivoa,"r")
    vetora = arquivodados.readlines()
    arquivodados.close()
    #arquivodados.remove()
    arquivodados = open(local + arquivoa,"w")
    jj=len(vetorb)
    for j in range(jj):
        if j == 0:
            a=vetora[j]
            b=vetor[i]
            arquivodados.write(a[:-1] + ", " + b[-5:-1] + "\n")
            j=j+1
        else:
            a=vetora[j]
            b=vetorb[j]
            arquivodados.write(a[:-1] + b[-18:])
            j=j+1
    i=i+1
file1.close()
arquivodados.close()
filelist.close()

```

APÊNDICE II

