

JEFFERSON KÜCHLE

EMPREGO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL NA ANÁLISE
DO POTENCIAL EÓLICO DE UMA MICRORREGIÃO EM LAGUNA

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.

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

Porto Alegre
2010



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

**EMPREGO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL NA
ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO DE UMA MICRORREGIÃO EM LAGUNA**

JEFFERSON KÜCHLE

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

**Prof. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica**

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr. PAULO OTTO BEYER
UFRGS / DEMEC**

**Prof. Dr. HORÁCIO A. VIELMO
UFRGS / DEMEC**

**Prof. Dr. SÉRGIO LUIZ FREY
UFRGS / DEMEC**

**Porto Alegre
2010**

AGRADECIMENTOS

agradeço a minha família, mãe *Jane*, ao meu irmão *Juliano* e cunhada *Renata* pessoas presentes nesta caminhada antes mesmo dela iniciar.

a minha orientadora, pessoa especial, *Prof. Dra. Adriane Petry* que guiou-me pelo caminho do conhecimento.

ao *Msc. Eng. Guilherme Piccoli*, pessoa brilhante que com dedicação permitiu-me aprendizado constante.

à Empresa Ciber equipamentos Rodoviários, em especial ao *Eng. André Franceschini*, disponibilizou-me tempo e espaço físico para o desenvolvimento do trabalho.

“Viver é como andar de bicicleta:
é preciso estar em constante movimento
para manter-se em equilíbrio.”

Albert Einstein

KÜCHLE, J. Emprego da Dinâmica dos Fluidos Computacional na Análise do Potencial Eólico de uma Microrregião em Laguna. 2010. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RESUMO

Através da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) verifica-se o comportamento dos ventos na localidade de Laguna, Santa Catarina, sob a influência da topografia acidentada do terreno e efeitos de mudança de rugosidade. Estudos analíticos realizados por Dalmaz (2007), e dados de vento medidos indicam alto potencial eólico na microrregião em estudo e interesse. Desenvolve-se no trabalho a detalhada modelagem da região, e a definição do domínio e condições de contorno aplicadas. Na revisão bibliográfica encontram-se todas as suposições de engenharia adotadas embasadas em trabalhos pertinentes. Após as simulações, em posse dos perfis numéricos de velocidade do vento, objetiva-se comparar os resultados obtidos ao dado medido “in loco” e assim analisar os resultados em toda a microrregião de uma forma geral. A potência das turbinas eólicas está relacionada ao cubo da velocidade do vento. A análise do campo de velocidades traz informações valiosas à conversão de energia eólica na microrregião de Laguna.

PALAVRAS-CHAVES: Energia Eólica, Turbinas Eólicas, Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), Energias Alternativas, Potencial Eólico de Santa Catarina.

KÜCHLE, J. Use of Computational Fluid Dynamics Analysis of Wind Power Potential of a Micrositing in Laguna. 2010. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ABSTRACT

Analyses by Computational Fluid Dynamics (CFD) the field of winds in the town of Laguna, Santa Catarina, and the influence of topography and the effects of terrain roughness. Analytical studies performed by Dalmaz (2007), and measured wind data indicate high wind energy potential in the micrositing study and interest. Developed detailed modeling of terrain, and the definition of the domain and boundary conditions applied to it. In the review are all assumptions based on referenced engineering relevant work. After the simulations and takes the numerical profiles of wind speed, the objective is to compare the results to the data measured on the spot and thus to analyze the results across the micro-region in general. The power of wind turbines is related to the cube of wind speed. Field analysis provides valuable information to the conversion of wind energy in the Laguna micrositing.

KEYWORDS: Wind Energy, Wind Turbines, Computational Fluid Dynamics (CFD), Alternative Energy, Wind Power, Potential of Santa Catarina.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
2.1. ENERGIA EÓLICA.....	1
2.2. CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA (CLA).....	2
3. METODOLOGIA DE ANÁLISE	4
3.1. Local de Análise – Microrregião de Laguna.....	4
3.1.1. Dados dos Ventos da Região	5
3.2. EMPREGO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	6
3.2.1. Modelagem Matemática – Dinâmica dos Fluidos Computacional	6
3.2.2. Modelagem do Terreno	7
3.2.3. Domínio e Condições de Contorno	8
3.3. REGIÃO E PONTOS DE INTERESSE	8
3.4. MALHA DE VOLUMES FINITOS	9
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	9
4.1. QUALIDADE DA MALHA E CONVERGÊNCIA DO RESULTADO.....	9
4.2. PLANOS DE VELOCIDADES	10
4.2.1. Plano a 50 metros	11
4.2.2. Plano a 100 metros	11
4.2.3. Plano a 150 metros	12
4.3. PERFIL DA CAMADA LIMITE NOS PONTOS.....	12
4.3.1. Perfil de Velocidades no Morro do Tamborete	13
4.3.2. Perfil de Velocidades - Morro Mais Alto da Microrregião	13
4.3.3. Perfil de Velocidades – Cidade de Laguna	14
5. CONCLUSÕES.....	15
6. REFERÊNCIAS	16
7. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	17
8. APÊNDICE	18
9. ANEXO.....	19

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a significativa parcela de 85,4% da energia elétrica total é obtida de forma hidráulica, muito suscetíveis a fatores climáticos e estações do ano. Uma questão estratégica é diversificar a matriz de energia elétrica. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério das Minas e Energia (MME), de toda a eletricidade produzida no país em 2009, apenas 6% foram gerados da biomassa e 0,3% eólica. Também no ano passado, a capacidade de geração de energia eólica no Brasil cresceu 77,7% sobre o ano anterior, passando de 341 MW (megawatts) para 606 MW, segundo o Conselho Global de Energia Eólica. O crescimento foi maior do que o registrado nos EUA, de 39%, e na Europa, de 16%. Um forte indicativo de que a energia eólica está deixando de ser uma fonte de energia interessante apenas do ponto de vista ambiental, mas tornando-se competitiva economicamente em relação às outras formas.

Em muitos locais onde existe potencial para a instalação são áreas de reservas, com terras caras ou, ainda, áreas cuja propriedade não está bem definida, caso das consideradas de usucapião, fato que causa entraves aos projetos. A ampliação da capacidade instalada e, conseqüentemente, da geração de energia eólica no Brasil passa necessariamente pelo conhecimento das áreas com potencial de geração.

No Estado de Santa Catarina existem três localidades potenciais para instalação de parques eólicos inclusos no Programa Proinfra. Estão situados nos municípios de Laguna, Água Doce, e Bom Jardim da Serra. Regiões de grande potencial eólico já conhecido.

O Parque Eólico Horizonte entrou em funcionamento em 2003 no município de Água Doce, e conta com a capacidade total instalada de 4,8 MW. Em Bom Jardim da Serra, serão construídas quatro fazendas eólicas que gerarão 93 MW. Serão investidos R\$ 513,31 milhões. Já em Água Doce, serão produzidas 129 MW em seis usinas que receberão investimento de R\$ 738,27 milhões. Peças dos aerogeradores estão atualmente chegando ao Porto de Santos, provindas da Argentina, Indústrias Metalúrgicas Pescarmona S.A. (Impsa).

O grande potencial eólico coincide com topografia acidentada do terreno do estado de Santa Catarina, principalmente no litoral catarinense, especificamente Laguna. Esta característica exige um estudo detalhado da influência da topografia na geração de energia eólica. A predominância de incidência de vento provindo da direção Nordeste faz com que os morros situados no litoral atuem como obstáculos, gerando esteiras de turbulência nas regiões adjacentes e influenciando o potencial total disponível. Entretanto terras situadas entre morros podem apresentar um escoamento de velocidade acelerada.

Aprofundar-se no conhecimento dos fatores inerentes à energia eólica e também das características construtivas dos aerogeradores usualmente empregadas é a próxima etapa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ENERGIA EÓLICA

A conversão da energia eólica consiste na captação de uma parcela da energia presente na movimentação das massas de ar da atmosfera, com origem em três fenômenos: a rotação do planeta, seu aquecimento não uniforme pela radiação solar e a inclinação do eixo de rotação (CUSTÓDIO, 2002). Portanto o vento é considerado uma forma renovável e ilimitada de energia baseando-se nestes fenômenos termo-físicos.

Ao longo de milhares de anos a humanidade se beneficiou desta energia nos barcos à vela e moinhos de grãos. Com o passar dos séculos a energia eólica passou a ser empregada no bombeamento de água e com o desenvolvimento de novas tecnologias seu emprego começou a ser voltado à obtenção de energia elétrica.

As turbinas eólicas atuais são máquinas rotativas que convertem a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação das pás através de geometrias aerodinâmicas. A energia mecânica de rotação é então convertida em energia elétrica, através de um acoplamento entre o cubo do rotor e o gerador elétrico. Esta não é uma nova tecnologia, porém os avanços tecnológicos recentes e as políticas governamentais permitem que esta forma de obtenção de energia elétrica comece a firmar-se economicamente atrativa frente às demais formas de energia.

As turbinas são em geral classificadas de acordo com suas características construtivas e de funcionamento. Principalmente a rotação, o tipo de gerador, o sistema de controle de rotação, o número de pás, e a potência nominal. Em relação à forma construtiva as turbinas eólicas de eixo horizontal são comercialmente mais viáveis em comparação com turbinas eólicas de eixo vertical. Além disto, estas apresentam maiores valores de coeficiente de potência, operam em alturas mais elevadas da camada limite atmosférica, onde o vento é mais intenso e uniforme, e são mais estáveis mecanicamente, podendo assim, assumir tamanhos maiores (CARCANGIU, 2008).

A energia a que uma turbina eólica está sujeita corresponde à energia cinética associada à massa de ar que se desloca a uma velocidade assumida como constante v (m/s). Esta massa ao atravessar a seção plana transversal do rotor da turbina horizontal (m^2) em um determinado tempo delimita uma potência disponível. Esta potência é proporcional à velocidade do vento ao cubo pela equação 1:

$$P_{dis} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

onde ρ é a massa específica do ar e v é a velocidade média do vento no centro do rotor (cubo).

O recurso eólico do local independe das características das turbinas e pode ser evidenciado em termos da densidade de potência disponível por área varrida (W/m^2).

A potência não pode ser integralmente convertida em potência mecânica no eixo da turbina, uma vez que o ar, depois de atravessar o plano das pás, tem de sair com velocidade não nula. (CASTRO, 2008). A aplicação de conceitos da mecânica de fluidos permite demonstrar a existência de um máximo teórico para o rendimento da conversão eólica - mecânica: o seu valor é 59,3%, e é conhecido por Limite de Betz. O rendimento efetivo da conversão numa turbina eólica depende da velocidade do vento e é dado pela equação 2.

$$C_p(u) = \frac{P_m}{P_{dis}} \quad (2)$$

Onde P_m é a potência máxima que pode ser extraída pelo limite de Betz e P_{dis} é a potência total da massa de ar que cruza a área.

2.2. CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA (CLA)

A troposfera é a camada atmosférica mais próxima do solo, estendendo-se até aproximadamente 12 km de altura. Nesta região a superfície terrestre exerce importante influência sobre o escoamento atmosférico sendo fortemente influenciado pelas tensões cisalhantes e forças de empuxo térmico devido à sua interação com a superfície terrestre, pela aceleração de Coriolis, devida à rotação da Terra, e também pelos movimentos de grande escala na atmosfera, como os ventos geostróficos e térmicos (Custódio, 2002).

A camada limite é a porção atmosférica onde encontra-se as variações de velocidade ao longo da altura devido à rugosidade do terreno e obstáculos terrestres. Um modelo de camada limite atmosférica (CLA) utilizado com sucesso para baixas altitudes é o perfil de velocidades aproximado pela Lei Logarítmica presente na equação 3:

$$v_h = \frac{v^*}{k} \ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \quad (3)$$

Onde k é a constante de Kármán (aproximadamente igual a 0,4), v^* é a velocidade crítica de cisalhamento, h é a altura do ponto em questão e z_0 é o comprimento de rugosidade tabelado para o terreno.

Pela equação a velocidade do vento cresce à medida que nos afastamos do nível zero do solo com distribuição logarítmica. Camada limite logarítmica está apresentada na figura 2.1.

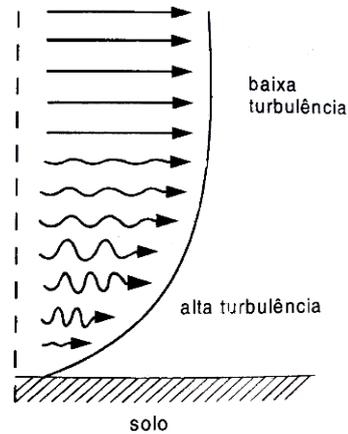


Figura 2.1 Perfil logarítmico da camada limite atmosférica (fonte: Carvalho, 2003)

Igualando duas camadas limites em uma mesma reta de alturas chegamos à equação (4).

$$v(h) = v_{ref} \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{ref}}{z_0}\right)} \quad (4)$$

A variável h é a altura em m em que se procura saber a velocidade, h_{ref} é a altura em m em que foram feitas as medições, v_{ref} é a velocidade em m/s na altura h_{ref} , e z_0 é o comprimento de rugosidade do solo em metros.

A velocidade do vento em qualquer altura pode ser determinada analiticamente pela equação (4) a partir de medidas de velocidade realizadas em outras alturas, altura de referência, e conhecendo-se a rugosidade do terreno na região. Esta equação possui a principal vantagem de não ser necessário o conhecimento da velocidade crítica de cisalhamento nem a constante de Kármán. Basta conhecer a rugosidade do terreno no ponto e possuir um dado de velocidade a uma altura conhecida. A partir destas premissas define-se o perfil de camada limite terrestre matematicamente a ser utilizado posteriormente na modelagem.

O comprimento de rugosidade é um número positivo e um parâmetro que representa a altura abaixo da qual a velocidade do vento é nula. Este valor está intrínseco ao desenvolvimento da camada limite atmosférica no terreno analisado. Na tabela 2.1 temos os valores de classe e o comprimento de rugosidade para diferentes características de terreno.

Tabela 2.1 – Classe e comprimento de rugosidade de acordo com o terreno

Classe	z_0 (m)	Características do terreno
0,0	0,0002	Mares e lagos
0,5	0,0024	Terrenos com vegetação totalmente rasteira
1,0	0,03	Terreno com vegetação rasteira
1,5	0,055	Terreno com vegetação rasteira e alguns arbustos espaçados a 1250m
2,0	0,1	Terreno com vegetação rasteira, alguns arbustos distantes e pequenas construções
2,5	0,2	Terreno com pequenos vilarejos, crescimento de vegetação ou arbustos.
3,0	0,4	Pequena cidade, campos com muitas e/ou árvores altas, floresta ; terreno desnivelado.
3,5	0,8	Grande cidade, terreno extremamente desnivelado
4,0	1,6	Capitais; terrenos extremamente montanhosos

A equação (4) é uma aproximação da camada limite atmosférica real, e leva em consideração apenas a influência da rugosidade do terreno no perfil de velocidades, sem considerações a respeito do efeito de estratificação térmica da atmosfera. Deve ser utilizada para regiões próximas ao solo, com altura inferior a 150 metros.

Não é recomendada a disposição de turbinas eólicas na esteira de turbulência de corpos de qualquer natureza, principalmente na esteira orientada na direção do vento dominante. Os equipamentos ficam sujeitos a um escoamento de menor potencial cinético e também a uma maior intensidade de turbulência, que pode acarretar avarias por fadiga dos componentes estruturais e aerodinâmicos.

3. METODOLOGIA DE ANÁLISE

A metodologia de análise consiste de uma simulação numérica, embasada na bibliografia corrente. Medições de vento da região são as condições de entrada de dados.

A modelagem do terreno e definição do domínio e condições de contorno da simulação é parte do estudo. Assim como o conhecimento dos dados de vento já realizados.

Os perfis de camada limite encontrados fornecem as velocidades incidentes nos aerogeradores a serem posicionados no local ponto-a-ponto.

3.1. LOCAL DE ANÁLISE – MICRORREGIÃO DE LAGUNA

A microrregião escolhida pertence ao Estado de Santa Catarina, Região Sul do Brasil, e está situado dentro do município de Laguna, no litoral catarinense. O regime de ventos é favorável tanto em velocidade quanto em constância conforme dados de vento previamente medidos e apresentados por Dalmaz (2007). Um parque eólico na região contará com a facilidade de integração com a rede elétrica, situando-se muito próximo à cidade e às linhas de transmissão.

Considerando a principal direção de incidência do vento, o posicionamento do parque eólico em uma região posterior aos principais acidentes topográficos da região, é a motivação do trabalho e traz questões a serem respondidas.

O mapa com imagens de satélite da região é apresentado na figura 3.1, com indicação do ponto das medições de vento realizadas, Morro do Tamborete.

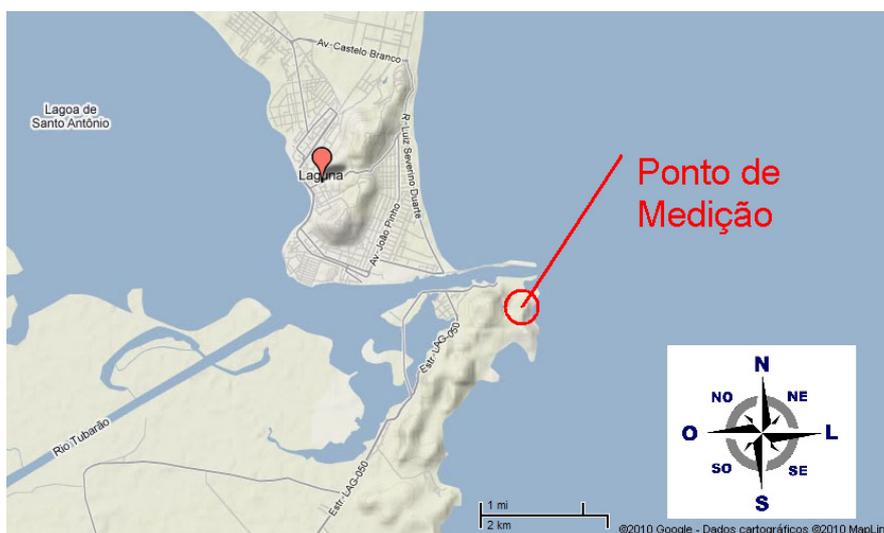


Figura 3.1 Imagem de satélite da microrregião de Laguna – SC

3.1.1. Dados dos Ventos da Região

Pelo Atlas Eólico Brasileiro, observa-se que na região litorânea da Região Sul existe um alto potencial eólico conforme figura A2 do Anexo A.

A tese apresentada por Dalmaz (2007) evidencia grande potencial eólico da região. Nestes estudos são apresentados valores de duas fontes de dados. Existem previsões de vento pelo modelo meso-escala, chamado ETA, do Centro de Previsão de Tempo e Estudo Climáticos (CPTEC/INPE) e dados de medidas de vento pela CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina).

Os dados de previsão do vento em meso-escala fornecidos pela CPTEC/INPE possuem resolução de 40 x 40 km. Resolução bastante baixa para análise de microrregião. Já os dados fornecidos pela CELESC forma tomados em torres anemométricas a 30 e 48 metros de altura em várias localidades do Estado de Santa Catarina.

Em Laguna na coordenada - 28° 30' 2,7", 48° 44' 55,5" - Morro do Tamborete, encontra-se uma torre anemométrica. A estação em Laguna está instrumentada com um conjunto de medição constituído de dois anemômetros e uma veleta, da marca NRG 40. Os anemômetros instalados são de três conchas, fabricadas em PVC. As veletas são do tipo “rabo de andorinha”. Desta torre extrai-se os dados de vento "in loco" utilizados na simulação computacional da microrregião de Laguna.

O sistema de aquisição é Data Logger marca NRG 9200-plus, de faixa de medição entre 0 e 97,3 m/s. A incerteza de medição é de 0,4 m/s e a resolução de 0,1 m/s. Credita-se incerteza de ângulo de 1,4 °. Este equipamento permite o armazenamento de dados de velocidade média, de ângulo da direção média, e respectivos desvios padrão. Os intervalos de medição podem ser escolhidos entre 10 e 60 min. Para as medidas foram utilizados intervalos de 10 min. Essas médias são calculadas a partir de dados processados a cada 2 s.

A verificação da curva de calibração dos anemômetros, indicada pelo fabricante, foi realizada no LAC – Laboratório de Aerodinâmica das Construções, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, conforme Silva et al (2004). Os dados obtidos com médias de 10 min são ideais para o estudo do potencial eólico do local. Com médias de velocidade em intervalos entre 10 min e 2 h consegue-se uma boa distinção entre variações de grande escala e de micro-escala, devido a turbulência ou rajadas, Molly (2005).

Através das medidas foram levantados os dados mensais e anuais de vento na localidade de Laguna. A figura 3.1.1 mostra as velocidades médias anuais para dois anos. Medida também a direção de predominância da incidência dos ventos na região por Dalmaz (2007).

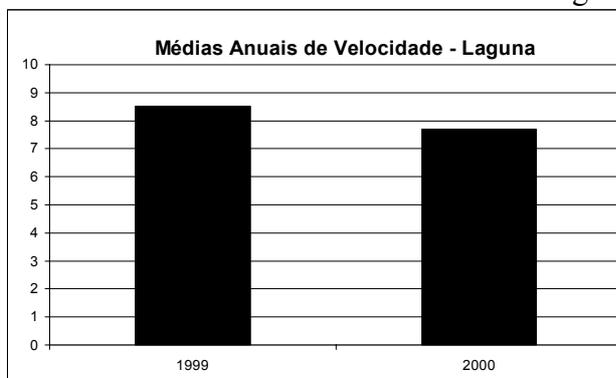


Figura 3.1.1 Médias anuais do vento em Laguna (fonte: Dalmaz 2007)

São necessários nas simulações parâmetros de vento que realmente representem uma boa parcela dos dias de um ano. Algumas médias mensais são bastante superiores a estas velocidades apresentadas, e não é difícil encontrar médias mensais com velocidades na ordem

de 10 m/s. Objetiva-se o comportamento médio do vento. A velocidade adotada como velocidade da simulação numérica é a velocidade de 7 m/s a uma altura de 50 metros do solo; camada limite logarítmica plenamente desenvolvida.

A direção de predominância de incidência do vento é muito relevante para a implementação do vento na simulação numérica. Quanto menor a variação da direção de incidência, melhores resultados podemos visar, pois para cada direção de vento é necessária uma simulação distinta. A figura 3.1.2 evidencia as direções de predominância da incidência do vento na estação de medição em dois anos distintos.

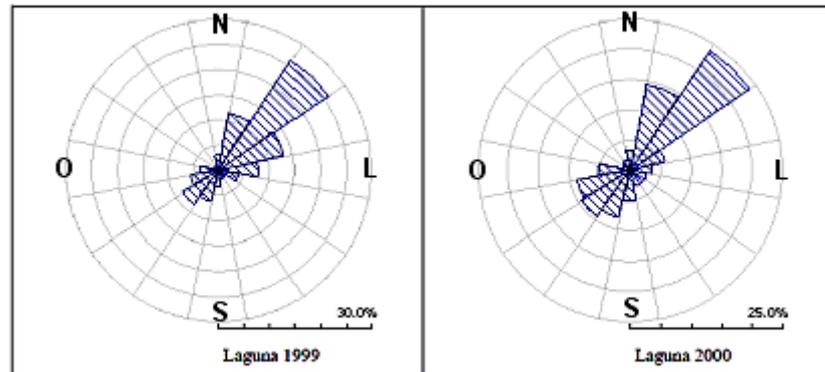


Figura 3.1.2 Direção de incidência dos ventos de Laguna (fonte: Dalmaz 2007)

Através do gráfico observa-se que a principal direção de incidência do vento na localidade de Laguna é Nordeste. Fato condizente com o Atlas Eólico do Potencial Brasileiro, presente na figura A1 do Anexo A, que indica a mesma direção de incidência do vento para a região litorânea de Santa Catarina.

3.2. EMPREGO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

Definida a microrregião de interesse e a direção predominante de incidência do vento na microrregião, modela-se a topografia do terreno, passo inicial da simulação.

Os fundamentos da Dinâmica dos Fluidos Computacional e do método dos volumes finitos serão embasados assim com as condições de contorno adotadas no domínio.

3.2.1. Modelagem Matemática – Dinâmica dos Fluidos Computacional

O equacionamento fundamentado na mecânica dos fluidos e resolvido por intermédio de um método numérico em uma plataforma computacional é a base de resultados deste trabalho.

A análise numérica computacional é baseada no Método dos Volumes Finitos e nas Equações de Navier Stokes com Média de Reynolds (RANS), onde as mesmas são avaliadas considerando a média sobre intervalos de tempo suficientemente grandes para o estudo da turbulência. Introduzem-se modelos para representar os efeitos totais da turbulência no escoamento (Petry, 2002). As equações médias utilizadas no cálculo da conservação da massa e da quantidade de momento linear são apresentadas no Anexo B do presente trabalho.

O critério de convergência adotado é de $1E-5$, razoável para este tipo de problema.

O modelo de turbulência empregado nas simulações é o $k-\epsilon$, definindo k como sendo a energia cinética do fluido, e ϵ a dissipação de energia cinética. Este modelo $k-\epsilon$ é o mais utilizado na indústria, pois apresenta bons resultados e robustez satisfatória.

O modelo de turbulência $k-\epsilon$ faz a hipótese de difusão no gradiente, para relacionar as tensões de Reynolds à velocidade média e à viscosidade turbulenta. A viscosidade turbulenta

3.2.3. Domínio e Condições de Contorno

O domínio utilizado possui altura total de oito vezes o maior obstáculo, sendo 1000 metros totais. As limitações laterais ficam mais distantes entre si e estão a um mínimo de 500 metros de qualquer morro. A face de saída é afastada em 2000 metros do último obstáculo nesta região e a face de entrada permanece inalterada. Basicamente após as modificações coloca-se a microrregião de interesse no centro do domínio de modo que ela não sofra a influência das condições de contorno impostas às faces do domínio. O domínio da simulação possui 6500 metros por 7500 metros de comprimento após o afastamento das limitações.

As corretas condições de contorno determinam a confiabilidade dos resultados obtidos e devem ser embasadas no tipo de análise a ser realizada. No *software* comercial CFX v.12, implementa-se para as limitações laterais e no topo do domínio a opção de parede com deslizamento. Esta limita o escoamento com cisalhamento livre na parede. É uma consideração razoável, pois o escoamento é paralelo à parede e esta encontra-se a uma distância segura da região de interesse.

Na saída utiliza-se uma condição de saída de pressão estática zero, assim o fluido pode deixar o domínio sem restrição ao escoamento.

Na condição de entrada adota-se um perfil de velocidades logarítmico com velocidade de 7 m/s a 50 metros do chão. O escoamento entra no domínio pela face orientada a Nordeste (NE), na região de mar aberto, com intensidade de turbulência de 5%.

Para o terreno seleciona-se a opção de parede sem deslizamento e com altura de rugosidade diferente para dois terrenos distintos. No mar, seguindo a tabela 2.1, adota-se a altura de rugosidade de 0,0002 m. Para os morros e cidade presentes aplica-se a altura de rugosidade de 0,4 m, condizente com construções baixas e vegetação alta.

3.3. REGIÃO E PONTOS DE INTERESSE

Os pontos de interesse são os locais de onde extraem-se os dados detalhados a respeito do comportamento da camada limite e velocidade de vento em contornos.

Um dos pontos de interesse de análise por simulação numérica encontra-se sobre o Morro do Tamborete. A medida obtida por Dalmaz (2007) é uma média entre a velocidade a 40 metros e a 48 metros de altura a partir do morro. Assumiremos para simplificar o problema que o dado de vento medido encontra-se neste ponto a 40 metros de altura a partir do morro, portanto 88 metros a partir do nível do mar.

Baseado nas médias anuais levantadas, a faixa de velocidades que espera-se obter neste ponto a partir da simulação por volumes finitos, é de 7,5 a 8 m/s.

Três pontos trazem informações do escoamento antes, no local e após sua passagem pelo morro do centro de Laguna. Um ponto na linha de vento sobre o mar em uma região não perturbada, um ponto sobre o morro e um ponto 2 km após o morro.

Mais três pontos estão posicionados na linha de vento que passa entre os dois morros, sobre a cidade de Laguna. Também avalia-se o perfil da camada limite antes, sobre a cidade e após passagem.

Pela simulação numérica pode-se relacionar a medida obtida sobre o Morro do Tamborete com o comportamento do vento passante sobre a região assim como a formação da esteira de turbulência dos morros e sua zona de influência. Reduções na velocidade e principalmente a turbulência do escoamento afetam negativamente as turbinas eólicas. Uma turbina posicionada na zona de maior turbulência sofre fadiga de seus componentes.

3.4. MALHA DE VOLUMES FINITOS

A malha utilizada é uma malha formada por camadas de prismas próximos ao solo, que melhor aproximam o terreno, e após hexaedros diferentemente espaçados objetivando sempre razões de aspecto suaves entre elementos.

Os prismas na base encontram-se na região de maior variação de velocidade da camada limite, e os hexaedros nas regiões de menor variação. Uma malha muito utilizada em bibliografias de simulação de terrenos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Modela-se uma primeira simulação com um domínio com a altura de dez vezes o maior obstáculo do terreno, seguindo bibliografias de túneis de vento, resultando em 1250 metros de altura de domínio. Nesta simulação inicial os limites laterais do domínio encontravam-se muito próximos aos morros da microrregião, e à região de interesse, gerando distorções significativas nos resultados próximos. Então posteriormente reconstruiu-se o domínio com menor altura, oito vezes o maior obstáculo, e afastam-se as limitações laterais até uma distância mínima de 500 metros de qualquer morro.

Os resultados esperados são as velocidades do escoamento na componente horizontal. Lembrar que a potência disponível na turbina eólica é proporcional ao cubo da velocidade do vento no ponto de instalação, fortemente dependente da velocidade.

As velocidades serão avaliadas por planos de alturas e por gráficos da camada limite em alguns pontos específicos. Através dos resultados averiguar a influência dos morros na geração de energia eólica em regiões posteriores e a incidência de turbulência no equipamento.

4.1. QUALIDADE DA MALHA

Utiliza-se no estudo quatro malhas diferentes de mesma estruturação, com maior ou menor refinamento dos elementos. Quatro simulações foram realizadas no *software* CFX v.12 sob as mesmas condições de contorno na finalidade de verificar o comportamento das malhas.

A tabela 4.1 relaciona o número de elementos da malha com a velocidade sobre o Morro do Tamborete, e também com a velocidade média computada na saída do domínio.

Tabela 4.1 Independência de malha – número de elementos pelas velocidades

Tamanho da Malha Número de Elementos	Velocidade a 40 metros Morro do Tamborete	Velocidade Média Saída
249.497	7,812 m/s	8,12488 m/s
421.941	7,716 m/s	8,12430 m/s
927.826	7,705 m/s	8,12493 m/s
1.542.677	7,778 m/s	8,12534 m/s

Para uma melhor visualização dos dados observar a figura 4.1 logo abaixo.

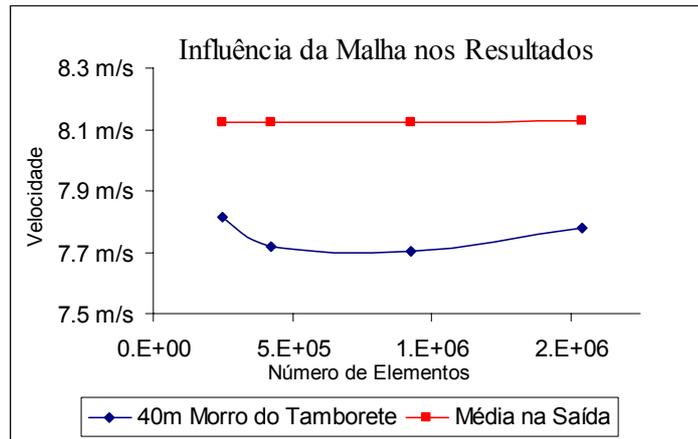


Figura 4.1 Influência da malha na velocidade em um ponto e média

Pelos dados pode-se concluir que acima de 1 milhão de elementos temos menor influência da malha nos resultados de velocidade obtidos na simulação, suficiente para continuar a análise.

Para extrair os resultados utiliza-se a maior malha de 1.542.677 elementos.

4.2. PLANOS DE VELOCIDADES

No *software* comercial CFX v.12 temos a opção de avaliar regiões ou contornos de velocidade em planos. Utilizando-se desta ferramenta decide-se avaliar o comportamento do vento e sua perturbação em diferentes alturas. Através destes planos de altura procura-se avaliar o efeito dos morros e das diferentes rugosidades no comportamento do vento na região. Estudar a formação da esteira após os morros e sua zona de efeito.

Três planos de velocidades nas componentes xy do domínio são avaliados. São planos posicionados a altura de 50, 100 e 150 metros.

A orientação do terreno na simulação numérica está na figura 4.2 e segue a orientação da microrregião. Percebe-se também que a microrregião encontra-se centralizada no domínio, distante das condições de contorno a ele impostas. O norte aponta para cima.

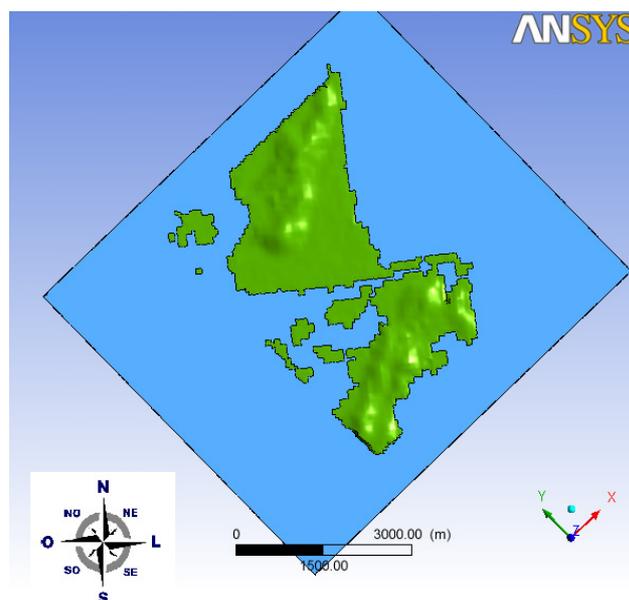


Figura 4.2 Orientação da microrregião e domínio da simulação

4.2.1. Plano a 50 metros

O plano posicionado a altura de 50 metros em relação ao nível do mar. É o plano de altura onde encontram-se as maiores influências da topografia do terreno no comportamento do vento na região (figura 4.3). Na microrregião muitos morros superam os 50 metros.

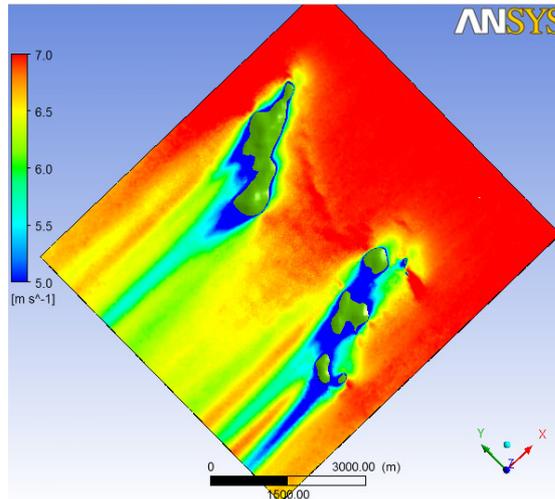


Figura 4.3 Velocidades no plano posicionado a 50 metros do nível do mar

A esteira de turbulência dos morros estende-se pelos 4 quilômetros e deixa o domínio. Não recomenda-se a disposição de aerogeradores nesta região de turbulência devido à fadiga dos componentes mecânicos e estruturais.

As velocidades na esteira são da ordem de 5,5 m/s e o escoamento proveniente do mar 7 m/s. Uma redução máxima de 22% na velocidade. Em potência uma redução de 52 %.

Para esta altura de 50 metros e nas regiões de menor velocidade da figura, temos uma significativa redução na potência disponível do vento.

4.2.2. Plano a 100 metros

Alguns poucos pontos na região ultrapassam a altura de 100 metros, o morro do centro de Laguna possui a altura de 125 metros aproximadamente. O plano de 100 metros a partir do nível do mar está na figura 4.4.

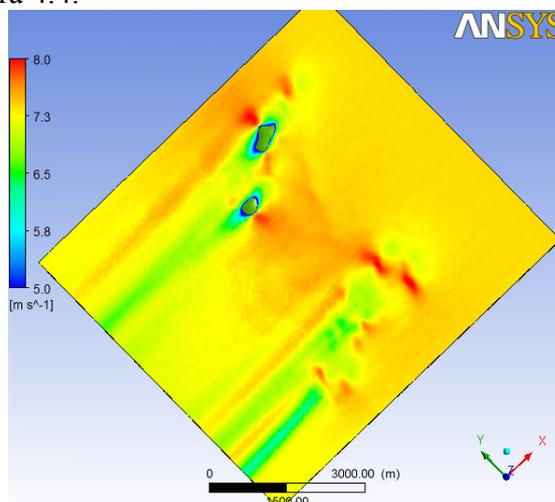


Figura 4.4 Formação da esteira no plano posicionado a 100 m do nível do mar

Percebe-se claramente a formação da esteira de menor velocidade média, em torno de 6,5 m/s, enquanto o resto do escoamento apresenta 7,0 m/s. A esteira se alonga por uma distância considerável. Pela simulação tem-se que como área perturbada pelo menos 4 quilômetros posteriores aos morros da microrregião. É uma redução de 7% na velocidade do vento e 20 % na potência disponível pelo vento.

4.2.3. Plano a 150 metros

O plano a 150 metros avalia o comportamento do vento em camadas superiores à altura dos morros. Colinas e morros com curvas suaves, tais como os da microrregião de Laguna aceleraram o escoamento sobre si. Neste plano presente na figura 4.5 avalia-se este efeito e a formação da esteira de arrasto.

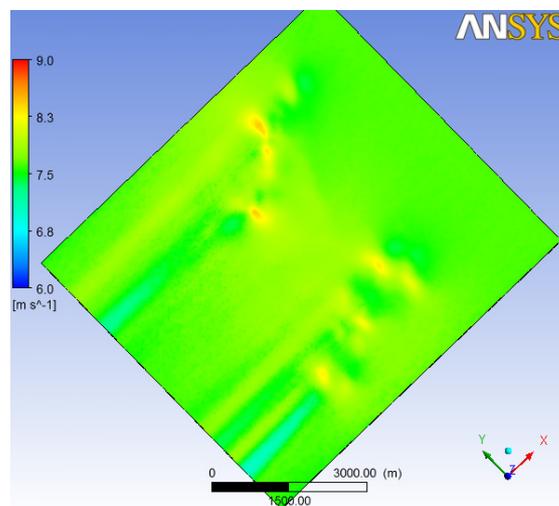


Figura 4.5 Contorno de velocidades no plano a 150 metros do nível do mar

Neste plano analisado observa-se um aumento de velocidade pontual característico sobre os morros mais altos da região.

Caracteriza-se também uma mínima, quase imperceptível, redução na velocidade do escoamento na região. Portanto para esta altura temos que a potência disponível permanece inalterada.

4.3. PERFIL DA CAMADA LIMITE NOS PONTOS

O perfil de velocidades em alguns pontos é um dado de simulação mais acurado. Permite avaliar a variação da velocidade pela altura, cota z .

No apêndice A, figura a1, encontra-se o plano vertical colorido por velocidades. Está posicionado na mesma linha de escoamento que passa sobre o morro mais alto da região. Os pontos de extração da camada limite estão marcados por linhas amarelas na figura a1.

A análise consiste em levantar os perfis de velocidade para três pontos ao longo de uma linha de escoamento, verificando assim as variações no desenvolvimento da camada limite.

No Morro do Tamborete verifica-se a velocidade antes e sobre o morro. Após o morro não avalia-se pois a cadeia de morros estende-se por uma maior distância..

4.3.1. Perfil de Velocidades no Morro do Tamborete

O perfil de velocidades no Morro do Tamborete é o perfil que relaciona as medições apresentadas por Dalmaz (2007), com os dados obtidos via simulação, e está na figura 4.3.1. A medição por Dalmaz é aferida como uma média entre a altura de 30 metros e 48 metros sobre o morro. Na simulação considera-se como análoga uma medida a 40 metros sobre o Morro do Tamborete, Laguna SC.

Temos no perfil as velocidades da altura de 48 metros a 548 metros em relação ao nível do mar. Ou 500 metros sobre o morro.

Apresenta-se também o perfil de velocidades não perturbado, obtido no mar aberto a 2 quilômetros antes do morro.

Os dois perfis estão presentes na figura 4.6 com escala de altura relativa ao solo.

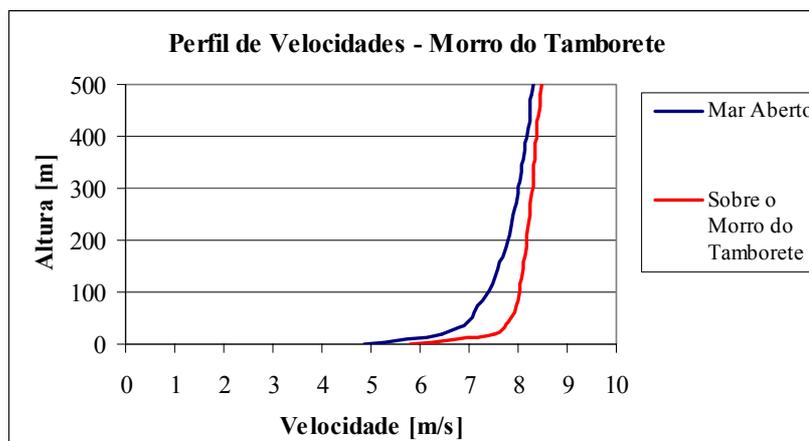


Figura 4.6 Perfil de velocidades antes e sobre o Morro do Tamborete

Analisando a velocidade a 40 metros sobre o Morro do Tamborete, obtém-se a relação com a velocidade apresentada por Dalmaz (2007).

Medindo 40 metros sobre o morro do Tamborete encontra-se 7,8 m/s de velocidade do vento, enquanto no mar aberto para esta mesma altura relativa somente 6,9 m/s. A medida sobre o Morro do Tamborete apresenta um acréscimo de aproximadamente 11,5% no valor da velocidade do vento que entra pelo mar. Fato devido à aceleração do escoamento causada pelo morro.

4.3.2. Perfil de Velocidades - Morro Mais Alto da Microrregião

Três pontos ao longo de uma linha de corrente que passa sobre o morro mais alto da região são avaliados: um sobre o mar aberto, um 3 quilômetros antes do morro; um sobre o morro; e um deles 3 quilômetros após o morro. Nos pontos são traçados perfis de velocidade de 0 a 500 metros relativos ao solo (figura 4.7).

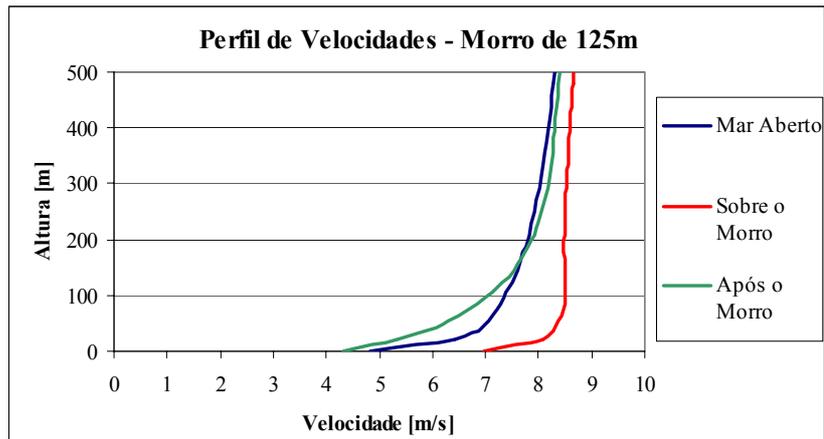


Figura 4.7 Perfis de velocidade antes, sobre e após o morro mais alto da microrregião

O perfil de velocidades é condizente com os resultados experimentais e analíticos. Verifica-se aceleração do escoamento logo acima do morro, porém em alturas superiores há uma recuperação da velocidade do escoamento.

O perfil de velocidades após o morro apresenta menor velocidade em alturas inferiores a 150 metros. Após 150 metros de altura temos uma pequena aceleração no escoamento, em torno de 0,25 m/s.

4.3.3. Perfil de Velocidades – Cidade de Laguna

Para avaliar o grau de perturbação que a cidade causa no escoamento devido a sua rugosidade, segue-se o mesmo procedimento de levantar três perfis de velocidade ao longo de uma linha de corrente que corta a região urbanizada, em alturas de 0 a 500 metros relativos ao nível do mar. Pode-se observar os três perfis de velocidade na figura 4.8.

A cidade encontra-se entre dois conjuntos de morros na microrregião de estudo, analisando-se um vento de direção Nordeste (NE). Procura-se um possível “efeito venturi”, uma aceleração da velocidade do escoamento na região da cidade.

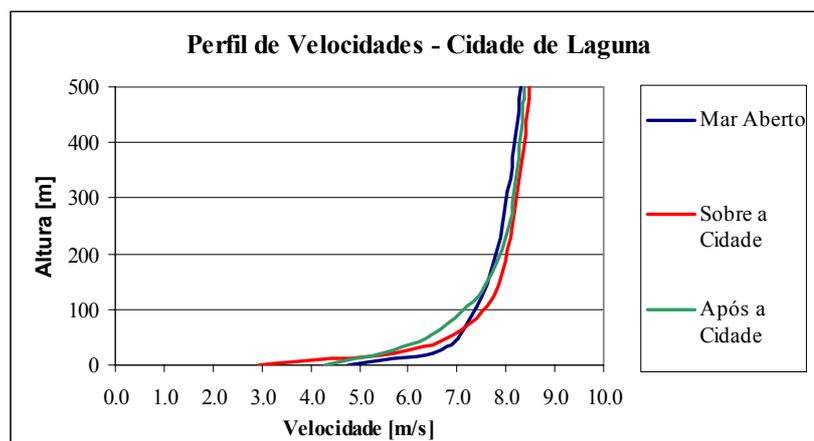


Figura 4.8 Três perfis de velocidade do vento que passa sobre a cidade de Laguna

Pelos gráficos, sobre a Cidade de Laguna, temos uma desaceleração no escoamento em alturas menores que 60 metros, e uma aceleração em alturas superiores a 60 metros.

Após a Cidade de Laguna observa-se uma recuperação no perfil de velocidades para alturas superiores a 180 metros. Não é evidente nenhuma aceleração de velocidade nesta linha de escoamento. Portanto o efeito da estricção do escoamento devido aos morros não ocorre.

5. CONCLUSÕES

A modelagem do terreno é o desafio inicial do estudo. O terreno é irregular e a aproximação por curvas de nível torna-se insatisfatória neste caso. Necessitou-se de dados de medição via satélite ponto-a-ponto e um posterior tratamento de dados. Após as primeiras simulações percebe-se que o domínio encontra-se muito próximo aos morros gerando distorções nos resultados. No trabalho de Xiao e Chao (2010) desconsidera-se o efeito das geometrias próximas às fronteiras do domínio. Nova modelagem de terreno é então iniciada com um novo domínio maior.

Analisando o plano de 50 metros percebe-se a maior redução na velocidade do vento e potência disponível, principalmente nas regiões dentro do domínio de 4 quilômetros quadrados situadas nas esteiras dos morros.

No plano de 100 metros, a topografia ocasiona uma pequena redução na velocidade e potência. Enquanto no plano posicionado a 150 metros, praticamente não há alteração na velocidade do escoamento.

A camada limite sobre os morros apresenta um “embarrigamento”. É um característico aumento de velocidade em relação ao escoamento que entra na região pelo mar. Porém para alturas superiores estabiliza-se, condizendo com as bibliografias consultadas.

Um posterior estudo do melhor modelo de turbulência a ser empregado pode ser conduzido. Xiao e Chao (2010) desenvolvem a análise do modelo de turbulência.

Novos domínios podem ser estudados com dimensões máximas ampliadas. Também pode-se levantar o grau de dependência dos resultados com o domínio empregado.

O estudo da microrregião de Laguna trouxe resultados relevantes e atenciosamente embasados na bibliografia referenciada.

6. REFERÊNCIAS

- AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. de. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília, 2001.
- CARCANGIU, C. E., 2008. “**CFD-RANS Study of Horizontal Axis Wind Turbines**”, PhD Thesis, Università degli Studi di Cagliari, Itália;
- CARVALHO, P., **Geração Eólica**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2003.
- CASTRO, RUI M.G. **Introdução à Energia Eólica**. Universidade Técnica de Lisboa, 2008. 88p.
- CUSTÓDIO, R. S., **Parâmetros de Projeto de Fazendas Eólicas e Aplicação Específica no Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- DALMAZ, A., **Estudo do Potencial Eólico e Previsão dos Ventos para Geração de Eletricidade em Santa Catarina**. Tese de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2007.
- MOLLY, J. P. **Centrais eólicas: técnicas, planejamento, financiamento, verificação**. In: CURSO DE ENERGIA EÓLICA, 2005, Fortaleza – CE, maio 2005.
- PETRY, A.P., 2002. “**Análise Numérica de Escoamentos Turbulentos Tridimensionais empregando o Método dos Elementos Finitos e Simulação de Grandes Escalas**”, Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2002.
- PICCOLI, G. L. **Análise da Viabilidade de uma Fazenda Eólica Empregando Dinâmica dos Fluidos Computacional**. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- SILVA, G. K. da; PASSOS, J. C; COLLE, S; REGUSE, W; BEYER, H. G. **Metodologia de avaliação do potencial de geração eólica para o estado de Santa Catarina**. In: III CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2004, Belém – PA. 10-13 agosto 2004, 10 p.
- XIAO, Y.; CHAO, L. **CFD Approach to the Micrositing of Wind Turbines in Complex Terrain**. The Research Center of Urban & Civil Engineering Disaster Prevention & Reduction, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen, Guangdong, China, 2010.

7. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

CFX Version 11.0, **Solver modeling, Solver theory**. ANSYS Inc., 2006.

FOX, R. W.; McDONALD, A.T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 4.ed., Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 1995.

LOREDO & SOUZA. A. M.; SCHETTINI. E. B. C.; PALUCH. **Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento**. In: MÖLLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. Turbulência. Volume 4: Rio de Janeiro. ABCM, 2004.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos. 1995

8. APÊNDICE

8.1. APÊNDICE A

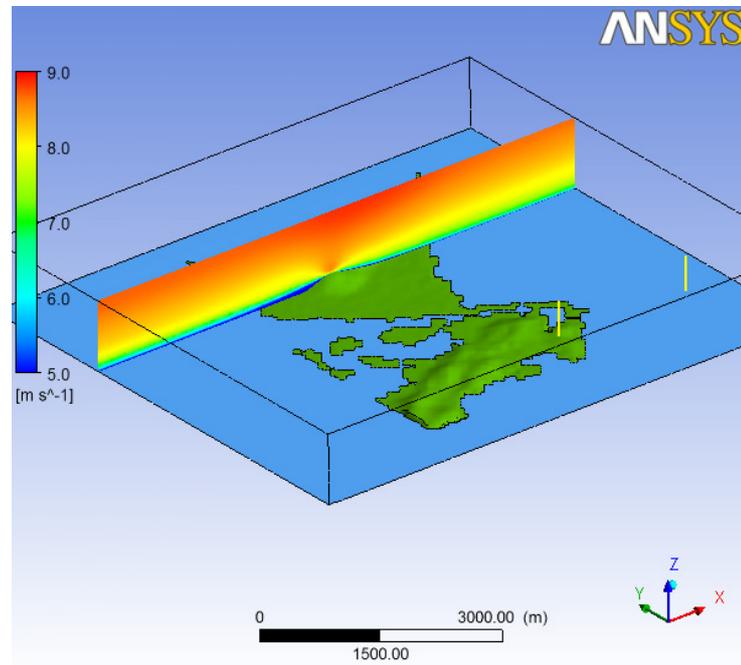


Figura a1 Plano vertical de velocidades do escoamento sobre o morro mais alto

9. ANEXO

9.1. ANEXO A



Figura A1 Direção de incidência dos ventos na Região Sul do Brasil
(Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. 2001)

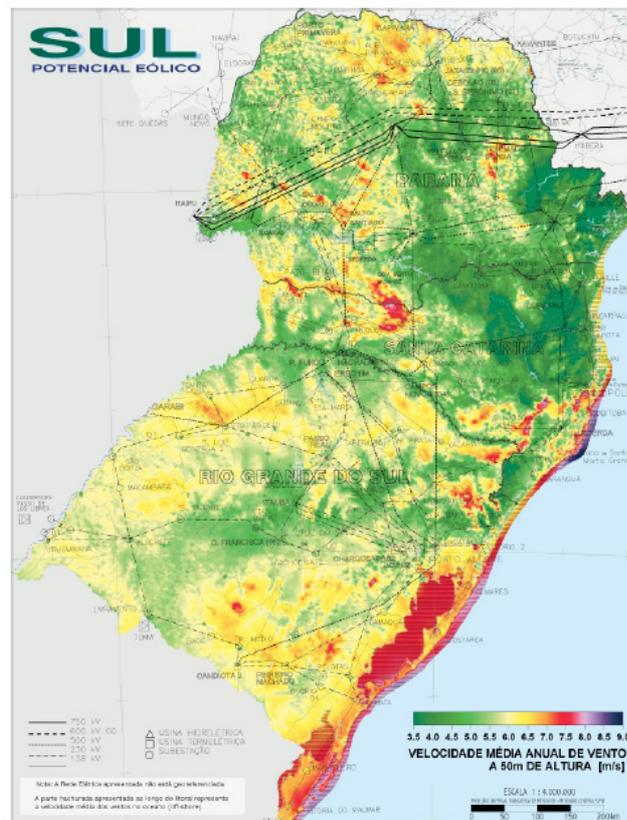


Figura A2 Velocidade média anual dos ventos na Região Sul do Brasil
(Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001)

8.2. ANEXO B

Apresenta-se a modelagem matemática empregada na simulação fluidodinâmica e também do modelo de turbulência κ - ε adotado.

Equação de Navier-Stokes Média em Reynolds (1) e conservação da massa (2) para um fluido incompressível.

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = \nabla \cdot (-\rho \delta + \mu(\nabla U + (\nabla U)^T)) + S_M \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2)$$

Na equação 3 encontra-se a equação da conservação de quantidade de movimento linear alterada para o modelo da turbulência κ - ε utilizado na simulação numérica.

Por definição κ é a energia cinética e ε é a dissipação cinética turbulenta.

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - (\mu_{\text{eff}} \nabla U) = \nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla U) + B \quad (3)$$

Temos que a viscosidade efetiva na equação (4).

$$\begin{aligned} \mu_{\text{eff}} &= \mu + \mu_t \\ \mu_t &= C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \end{aligned} \quad (4)$$

A pressão efetiva trata-se de $p' = p + (2/3) \kappa$.

As duas equações do modelo κ - ε utilizado estão presentes abaixo (5).

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) &= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \end{aligned} \quad (5)$$

Onde $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_ε e σ_k são constantes e P_k é a produção de turbulência devido a efeitos viscosos e de empuxo.