

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E AMBIENTE
CAMPUS BAGÉ

CECILIA FERRO DA CUNHA

**ESTUDO DO CAMPO DE VELOCIDADES DO VENTO COM UTILIZAÇÃO DOS
MODELOS COMPUTACIONAIS: WRF E WINDSTATION®**

Bagé

2011

CECILIA FERRO DA CUNHA

**ESTUDO DO CAMPO DE VELOCIDADES DO VENTO COM UTILIZAÇÃO DOS
MODELOS COMPUTACIONAIS WRF E WINDSTATION®**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Curso de Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente da Universidade Federal do Pampa, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Romero de Moraes

Bagé

2011

Catálogo na publicação: Elisângela Mota Pires – CRB 10 04/2011

C961e Cunha, Cecília Ferro da

Estudo do campo de velocidades do vento com utilização dos modelos computacionais: WRF e Windstation® [Trabalho de conclusão de curso] / Cecília Ferro da Cunha ; orientador, Marcelo Romero de Moraes. – Bagé, 2011.

58 p. : il., graf.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –
Fundação Universidade Federal do Pampa. Curso Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente.

1. Energia Eólica. 2. Campo de velocidades do vento. 3. Modelagem de terrenos. I. Moraes, Marcelo Romero de. II. Fundação Universidade Federal do Pampa. Curso de Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente. III. Título.

CDU: 621.548

CECILIA FERRO DA CUNHA

**ESTUDO DO CAMPO DE VELOCIDADES DO VENTO COM UTILIZAÇÃO DOS
MODELOS COMPUTACIONAIS WRF E WINDSTATION®**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
Curso de Engenharia de Energias Renováveis
e Ambiente da Universidade Federal do
Pampa, como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia

Área de Concentração: Engenharia de
Energias Renováveis e Ambiente

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em _____.

Banca examinadora:

Profº. Drº. Marcelo Romero de Moraes

Orientador UNIPAMPA

Profª. Drª. Adriane Prisco Petry

UFRGS

Profº. Drº. Carlos Guilherme Neves

UNIPAMPA

*Dedicado à meus pais e minha
irmã.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço de maneira muito especial aos meus pais, Suzana e Claudionor, pelo incentivo incondicional, pelo carinho e pelas oportunidades que me foram dadas.

A minha irmã Raquel, minha melhor amiga e companheira de graduação, pelas noites de estudos em parceria, pelos momentos de descontração e pelo apoio constante.

Ao meu namorado e grande amigo, Rodrigo Dorado, obrigada por aguentar minhas crises e por fazer cada momento especial.

A todos os amigos, de maneira especial, a Ândrea Plotzki, Camila Camejo, Debora Borba, Emanuel Vieira, Ronaldo Oliveira, Silvieli Andres, Ana Paula Roquete, Lidiani Lenz, Sergio Dias, Elisangêla Pires e tantos outros que fizeram parte dos melhores e piores momentos.

Ao Prof. Marcelo Romero de Moraes, pela orientação, paciência, disponibilidade e pelos conhecimentos transmitidos.

Aos professores do curso de Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente e da UNIPAMPA, por fazerem parte da minha formação acadêmica.

Ao Prof. Acir Mércio Loredou- Souza, pelas oportunidades que me foram concedidas.

Ao Prof. Antônio Gameiro Lopes, pelas concessões das licenças do WindStation, e pela oportunidade de cooperação.

Enfim, a todos que de direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A energia eólica representa um recurso energético de grande importância atualmente, devido principalmente à crescente necessidade de fontes capazes de gerar energia sem causar danos ao ambiente. Para que se possa determinar o potencial eólico de uma região é necessário que se conheça as condições do vento no local, bem como as características do terreno. O presente trabalho tem como objetivo apresentar resultados preliminares do acoplamento entre os softwares WindStation® e o Weather Research and Forecasting (WRF), e a possibilidade de complementação entre eles para modelagem do campo de velocidades do vento em terrenos complexos.

Palavras-chave: energia eólica, campo de velocidades do vento, modelagem de terrenos.

ABSTRACT

The Wind energy represents an energy resource of great importance today, due mainly of the growing need for sources capable of generate energy without damage the environment. In order to determine the wind potential of a place is necessary to know the wind conditions on site, as well as the terrain features. The present word aims to show initial results from the interaction between software WindStation® and Weather Research and Forecasting (WRF), and the possibility of complementation between them for modeling the wind field in complex terrain.

Keywords: wind energy, wind field, terrain models

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Circulação geral dos ventos.....	19
Figura 2.2: Comportamento do vento e a CLA.....	23
Figura 2.3: Referente ao perfil de velocidades em relação à rugosidade.....	26
Figura 2.4: Referente ao fluxo de ar através da área transversal.....	29
Figura 2.5: Anemômetro de copo.....	33
Figura 2.6: Localização da cidade de Dom Pedrito.....	36
Figura 3.1: Gráfico da do vento x hora.....	38
Figura 3.2: Mapa de rugosidade.....	39
Figura 3.3: (a)Representação do terreno. (b) Representação 3D do terreno.....	40
Figura 3.4: Referente ao modelo do terreno na interface do WindStation®	41
Figura 3.5: (a)Referente a inserção dos dados de vento. (b) Referente aos parâmetros do domínio.....	41
Figura 3.6: (a) Definição do domínio de cálculo. (b) Zoom do domínio.....	42
Figura 3.7: Condições de contorno. (b) Parâmetros de convergência.....	43
Figura 3.8: Campo de velocidades do vento a 100m de altura as 9:00h. (a)Direção; (b) Magnitude.....	44
Figura 3.9: Campo de velocidades do vento a 100m de altura as 12:00.(a) Direção; (b) Magnitude.....	45
Figura 3.10: Campo de velocidades do vento a 100m de altura as 15:00. (a) Direção; (b) Magnitude.....	46
Figura 3.11: Perfil vertical de velocidades do WindStation as 9:00h.....	47
Figura 3.12: Gráfico do perfil de velocidades para as 9:00h.....	48
Figura 3.13: Perfil vertical de velocidades do WindStation as 12:00h.....	49
Figura 3.14: Gráfico do perfil de velocidades para as 12:00h.....	49
Figura 3.15: Perfil vertical de velocidades do WindStation as 15:00h.....	50
Figura 3.16: Gráfico do perfil de velocidades para as 15:00h.....	51
Figura 3.17:(a)direção de vento a 100m e topografia e (b) magnitude do vento as 9:00h...	52

Figura 3.18:(a)direção de vento a 100m e topografia e (b) magnitude do vento as 12:00h.	53
Figura 3.19: (a)direção de vento a 100m e topografia e (b) magnitude do vento as 15:00h	54
Figura3 20: Fluxograma do funcionamento da interface WRF2WindStation@.....	56
Figura 3.21: Interação WRF2WindStation.....	57
Figura 3.22: Dados oriundo do WRF (amarelo) e domínio de cálculo do WindStation (vermelho).....	58
Figura3.23: Campo de velocidades do vento a 100m de altura as 9:00h. (a) Direção; (b)Magnitude.....	59
Figura3.24: Campo de velocidades do vento a 100m de altura as 12:00h. (a) Direção; (b)Magnitude.....	60
Figura3.25: Campo de velocidades do vento a 100m de altura as 15:00h. (a) Direção; (b)Magnitude.....	61
Figura 3.26: Perfil vertical de velocidades resultante do WRF2WindStation as 9:00h.....	62
Figura3.27: Gráfico do perfil de velocidades para as 9:00h.....	62
Figura 3.28: Perfil vertical de velocidades resultante do WRF2WindStation as 12:00h.....	63
Figura 3.29: Gráfico do perfil vertical de velocidades para as 12:00h.....	63
Figura 3.30: Perfil vertical de velocidades resultante do WRF2WindStation as 15:00h.....	64
Figura 3.31: Gráfico do perfil de velocidades para as 15:00h.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Referente aos valores de rugosidade para diferentes tipos de terreno.....	25
Tabela 2.2: Referente aos valores de parâmetro α	27
Tabela 3.1: Referente aos dados de vento.....	37
Tabela 3.2: Referente aos dados de vento da torre da Fazenda Guatambú.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS

CAPS: Center for Analysis and Prediction of Storm

CLA: Camada Limite Atmosférica

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

ESRL: Earth System Research Laboratory

FAA: Federal Aviation Administration

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

MMM: Mesoscale and Microscale Meteorology

NCAR: National Center for Atmospheric Research's

NCEP: National Centers for Environmental Prediction

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration's

NRL: Naval Research Laboratory

SONDA: Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais

UTM: Universal Transverse Mercator

WRF: Weather Research and Forecasting

ZCIT: Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

Caracteres Arábicos

A : área perpendicular à direção dos ventos

A_t : área da seção transversal

c : fator de escala

C_p : calor específico

DP : densidade de potência

E_c : energia cinética

\dot{E} : fluxo de energia

h : altura desejada

h_0 : é a altura na qual a velocidade do vento foi medida

i, j e k : vetores unitários no sistema de coordenadas cartesianas

K : fator de forma

k : energia cinética turbulenta

m : massa

\dot{m} : fluxo de massa de ar

P : potência disponível no vento

P_a : pressão atmosférica

P_1 : taxa de produção de energia cinética turbulenta

P_r : número de Prandtl laminar

P_{rt} : número de Prandtl turbulento

R : Constante Universal dos Gases

t : tempo

T : temperatura ambiente

u : velocidade

v : velocidade

v_0 : velocidade obtida por medição

\bar{v} : velocidade média do vento

x : direção

z_0 : comprimento de rugosidade

Caracteres gregos

α : expoente de potência no local (adimensional)

δx : unidade de área paralela à direção dos ventos

ρ : densidade do ar

Ω : velocidade angular da terra ($7,29 \cdot 10^{-5} rad/s$)

φ : latitude

η : níveis verticais do WRF

λ_0 : coeficiente de viscosidade

η_0 : viscosidade Newtoniana

μ : viscosidade

μ_t : viscosidade turbulenta

ε : taxa de dispersão de energia cinética turbulenta

σ_k : constante, neste caso é igual a 1.0

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Ventos.....	18
2.1.1 Efeito de Coriolis	21
2.2. Influência do Terreno no Vento	23
2.2.1 Camada Limite Atmosférica	23
2.2.2 Rugosidade.....	24
2.2.3 Obstáculos.....	26
2.3 Perfil de Velocidades	26
2.4 Energia Disponível.....	28
2.4.1 Tratamento Estatístico.....	31
2.5 Medições de Vento.....	32
2.6 Ferramentas Computacionais	33
2.6.1 WRF.....	33
2.6.2 WindStation®.....	34
2.7 Caracterização da Região	36
3 RESULTADOS	37
3.1 Resultados do WindStation®	40
3.2 Resultados do WRF.....	51
3.3 A Interface WRF2WindStation®.....	55
3.3.1 Estrutura geral da Interface.	55
3.3.2 Resultados do WRF2WindStation®	57
4 CONCLUSÕES.....	66

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica é utilizada há milhares de anos para movimentar embarcações, moer grãos, bombear água, e desde o final do século XIX tem sido utilizada para geração de energia elétrica.

No atual contexto mundial este tipo de energia é caracterizada como uma fonte energética indispensável, já que a demanda por energia elétrica atinge níveis cada vez mais elevados na maioria dos países. Aliada a necessidade de expansão da geração de energia, surge a preocupação com a preservação ambiental, uma vez que os impactos gerados pela utilização de combustíveis fósseis e pelo esgotamento dos recursos naturais tornam-se, cada vez mais, insustentáveis.

A grande vantagem da energia eólica é a disponibilidade de vento em toda a superfície terrestre, além de ser um “combustível” totalmente renovável e não poluente. Estes fatos por si só são capazes de justificar o grande crescimento da utilização da energia dos ventos. No entanto, o aproveitamento dessa fonte de energia apresenta algumas dificuldades, uma vez que é desejado que se tenha uma movimentação contínua das massas de ar, o que não ocorre na realidade, por esse motivo, a implementação de usinas eólicas, ou mesmo turbinas individuais, exigem que se conheça de forma bastante aprofundada as características do vento no local de implantação.

Para conhecer as características locais de vento é fundamental que se tenha uma base de dados confiável, pois a eficiência das plantas de geração está intimamente ligada às condições do vento e a um bom conhecimento dos fenômenos climáticos

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) o consumo nacional de energia elétrica cresceu 4.8% no primeiro trimestre de 2011, em relação ao mesmo período do ano anterior, somando 107.231 GW/h. O aumento da demanda energética no país torna indispensável a implementação de fontes de energia eficientes. Segundo dados da mesma fonte, no leilão de energia A-3 foram contratados 44 projetos de energia eólica, totalizando 1067 MW, destes serão instalados no Rio Grande do Sul 492MW. Este dado reforça a importância do conhecimento do comportamento do vento.

Baseado nos fatos anteriormente citados o presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo preliminar do campo de velocidades do vento para a região de Dom Pedrito, Rio Grande do Sul, com a utilização dos softwares WRF e WindStation®.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente trabalho tem como foco principal o campo de velocidades do vento, e seu comportamento a diferentes alturas e interação das ferramentas computacionais WRF e WindStation®.

Para um melhor entendimento do tema a ser abordado faz-se necessário que alguns conceitos sejam apresentados.

2.1 Ventos

Entende-se por vento o movimento das massas de ar presentes na atmosfera, “dois dos principais fatores que influenciam a circulação global são a radiação solar e a rotação da terra”(NELSON, 2009, p 33, tradução nossa). Com isso pode-se perceber que o surgimento dos ventos e a maneira como se comportam na atmosfera é intimamente relacionado ao gradiente de pressão causado pelo aquecimento desuniforme da superfície terrestre, como mostra o trecho abaixo.

Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra. As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase diretamente são mais aquecidas que as regiões polares. (CRESESB, 2008, p.18)

Como consequência maior aquecimento da superfície formam-se zonas de baixa pressão, onde o ar é menos denso e tende a se deslocar para altitudes mais elevadas, enquanto o ar mais frio e denso tende a mover-se para altitudes menores, “dessa forma, os ventos das superfícies frias circulam pelos polos em direção ao equador para substituir o ar quente tropical que, por sua vez desloca-se para os polos”(ALDABÓ,2002, p.30). É possível então explicar-se a circulação geral de ventos com base no modelo de três células, mostrado na Figura 2.1.

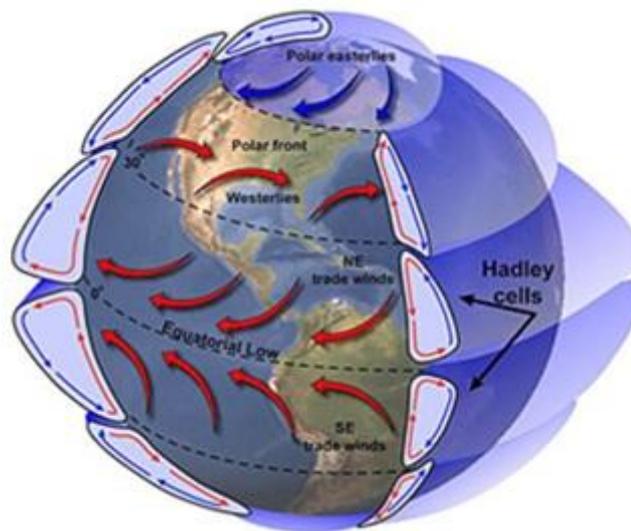


Figura 2.1: Circulação geral dos ventos (Fonte: Departamento de Física da UFPR apud Dorado, 2011)

- Célula de Hadley (célula tropical): Essa célula origina-se a partir da transferência de calor do equador para as latitudes médias de 30° nos dois hemisférios. Como a incidência da radiação solar é maior no equador, o ar sobre dessa parte da superfície é aquecido deslocando-se verticalmente para cima e dirigindo-se no sentido dos polos. Sobre as latitudes médias o ar arrefecido retorna ao Equador em altitudes mais baixas (Proclira, 2007). A elevação do ar quente no equador é frequentemente acompanhada pela formação de tempestades na Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).
- Célula de Ferrel (célula das latitudes médias): circulam em médias latitudes com direção oposta a célula de Hadley, “ nesta célula o ar move-se para os polos e para leste junto a superfície , e no sentido do Equador e para oeste em altitude”(PROCLIRA, 2007). Essas células são ditas termodinamicamente indiretas, já que transportam energia de uma região fria para uma região quente.
- Célula Polar: nesta célula o ar sobe deslocando-se em direção aos polos, uma vez sobre os polos o ar resfriado desce dando origem a altas pressões na superfície, nessas regiões o ar diverge para fora dos centros de altas pressões e flui em direção ao equador, dando origem aos ventos polares de leste (para ambos hemisférios).

Com base no modelo tricelular é possível citar os ventos ditos constantes.

- Alísios: são ventos constantes que sopram dos trópicos para o Equador em altitudes baixas. São ventos úmidos que provocam chuvas nas imediações do Equador. No Hemisfério Sul sopram de sudeste, enquanto no Hemisfério Norte sopram de nordeste.
- Contra- alísios: são ventos que sopram do Equador para os trópicos em altitudes elevadas. São ventos secos.
- Ventos polares: são formados nas regiões polares e circulam em direção ao equador.
- Ventos de Oeste: são ventos com componente predominante de oeste, sopram dos trópicos para os polos.

Embora a circulação atmosférica obedeça ao critério salientado anteriormente, existem escalas menores de movimentação do ar. O modelo supra citado , na realidade, “é complicado pelos efeitos sazonais e geográficos” (Custódio, 2009, p.31)

Os deslocamentos em escalas menores são decorrentes “das diferentes capacidades de refletir, absorver e emitir o calor recebido do sol, inerentes a cada tipo de superfície” (CAMARGO, 2005, p.64), desse fenômeno resultam as brisas, que são classificadas como ventos locais. Exemplos clássicos desse tipo de sistemas são as brisas marinha e terrestre. No período diurno, quando a terra fica mais aquecida do que o oceano o ar sobre a superfície se aquece favorecendo o deslocamento no sentido mar – terra, a esse fenômeno chama-se brisa marítima. À noite o processo é invertido, então o ar desloca-se no sentido terra – mar.

Além dos sistemas de circulação de brisas, existe ainda os ventos de vale e montanha, também denominados de ventos locais, estes são originados por alguns outros mecanismos específicos.

São ventos que sopram em determinadas regiões e são resultantes das condições locais, que os tornam bastante individualizados. A mais conhecida manifestação local dos ventos é observada nos vales e montanhas. Durante o dia, o ar quente nas encostas da montanha se eleva e o ar mais frio desce sobre o vale, [...] no período noturno, a direção em que sopram os ventos é novamente revertida e o ar frio das montanhas desce e se acumula nos vales. (CRESESB, 2008, p.20)

Como mostrado anteriormente, há várias escalas de movimentação do vento na atmosfera. “Na meteorologia, estes movimentos atmosféricos são agrupados em três escalas de comprimento: microescala, mesoescala e macroescala.” (PINHEIRO, 2009)

- Microescala: os fenômenos que ocorrem nessa escala possuem dimensões da ordem de 1m até 1 km e duração de um segundo até uma hora. Exemplos: rajadas de vento e turbulências.
- Mesoescala: nessa escala os fenômenos duram de uma hora a um dia, e possuem dimensões da ordem de 1 km até 100km. Exemplos: tempestades isoladas, sistemas de nuvens, brisas, ilhas de calor.
- Macroescala: possuem dimensões da ordem de centenas de quilômetros e podem durar de um dia até meses. Exemplos: furacões, frentes frias

2.1.1 Efeito de Coriolis

Denomina-se efeito de Coriolis a aceleração aparente de objetos que se movimentam livremente sobre a superfície da Terra, essa aceleração aparente é resultado da rotação da mesma.

Conforme Johnson (2006, nossa tradução), a tendência inicial de movimentação do vento é que este sopra paralelamente ao gradiente de pressão horizontal e perpendicularmente às isóbaras. No entanto essas direções são alteradas pela força de Coriolis. O trecho a seguir descreve esse efeito, imaginando-se dois objetos situados em diferentes pontos do planeta.

Um objeto situado no equador que tem uma velocidade tangencial maior que outro objeto situado mais próximo a um dos polos. Entretanto, a rotação dos dois objetos é a mesma, alterando-se o raio de giro, uma vez que, ao aproximar-se de um dos polos, um objeto aproxima-se do seu eixo de giro. (CUSTÓDIO, 2009, p 21)

Desta forma o momento angular das massas é alterado, então de acordo com a lei da conservação da quantidade de movimento, uma partícula que se desloca no sentido pólo-equador terá um movimento circular com sentido oposto ao sentido de rotação da terra, enquanto uma partícula que se desloque no sentido inverso, terá seu deslocamento no mesmo sentido de rotação da terra.

Segundo Custódio (2009) força de Coriolis, por unidade de massa, é determinada pela seguinte equação:

$$C = 2\Omega v \sin \varphi \quad (2.1)$$

Onde:

Ω = velocidade angular da terra ($7,29 \cdot 10^{-5} rad/s$)

v = velocidade da partícula (m/s)

φ = latitude (°)

Através da citação a seguir pode-se entender como esse efeito é perceptível na atmosfera.

Um vento no hemisfério sul que seja inicialmente direcionado ao longo de uma longitude mudará sua direção para a esquerda, ou seja, se for um vento vindo do sul, mudará para oeste, tornando-se um vento de leste. Se o vento for do norte, mudará para o leste, tornando-se um vento oeste. No hemisfério norte o comportamento é inverso. (CUSTÓDIO, 2009, p.21)

A movimentação resultante do Efeito de Coriolis pode então ser percebida nos deslocamentos com formato circular em torno dos centros de alta ou baixa pressão.

2.2. Influência do Terreno no Vento

2.2.1 Camada Limite Atmosférica

A camada limite atmosférica corresponde à parcela da atmosfera próxima a superfície, “é a região na qual a atmosfera sente os efeitos da presença do solo, através da troca vertical de quantidade de movimento, calor e umidade” (BOÇON, 1998, p.63). Usualmente consideram-se 1000 m acima da superfície

De acordo com Burton (2001, p.18, nossa tradução), os principais eventos que regem a camada limite são: a força do vento geostrófico, a rugosidade da superfície, o efeito de Coriolis e os efeitos térmicos. Segundo Fox et al.(2004, p. 410, nossa tradução) o escoamento de fluidos podem ser divididos em duas regiões, uma adjacente à uma fronteira sólida e outra que cobre o restante do fluxo. Somente na camada próxima à superfície sólida, os efeitos da viscosidade são importantes, a esta região denomina-se camada limite.

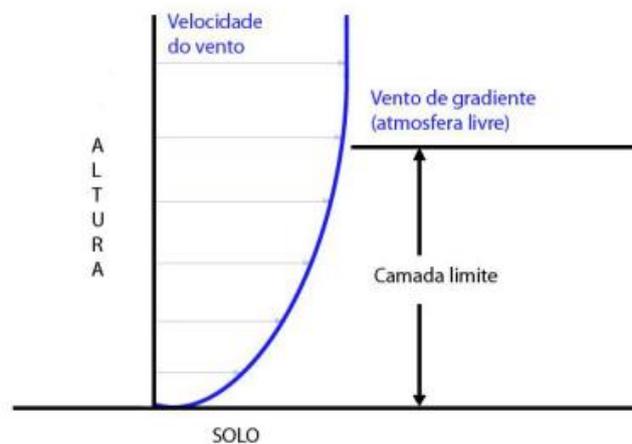


Figura 2.2: Comportamento do vento e a CLA (Fonte: Pinheiro, 2009)

Segundo Moraes (2004, p.64) a CLA apresenta subcamadas, resultantes do ciclo de aquecimento diário e resfriamento noturno, os três principais componentes dessa estrutura são a camada de mistura, a camada residual e a camada estável. Desta forma entende-se que há variações na espessura da CLA ao longo do dia e da noite. O trecho a seguir descreve o comportamento da camada nos diferentes períodos.

A noite, com ventos fracos, a espessura da camada turbulenta é muito menor que durante o dia, até menos de 100m. A influência do resfriamento do solo, que ocorre durante a noite por emissão de radiação infravermelha, é a causa desta diminuição da espessura da camada turbulenta, ou camada de mistura. Com o solo mais frio há um fluxo de calor da atmosfera para este originando um gradiente vertical positivo de temperatura [...] esta camada, que é denominada camada limite estável noturna, cresce durante toda a noite. Quando amanhece a superfície é aquecida pela radiação solar e sua temperatura cresce [...] a camada de ar acima do solo recebe um fluxo de calor da superfície e se aquece também, resultando num gradiente vertical negativo de temperatura que vai destruindo a camada estável noturna. Essa nova camada instável que vai se formando tem nível de intensidade turbulenta alto [...] e aumenta de espessura durante todo o período matutino, acompanhando o aumento de temperatura do solo. À tarde a temperatura começa a diminuir e também o faz a altura da camada turbulenta. (BOÇON, 1998)

Percebe-se então que a altura da CLA é um dado importante na modelagem das condições de vento em um local, sendo uma característica fundamental a ser considerada já que os efeitos de microescala situam-se nesta faixa.

2.2.2 Rugosidade

O terreno influencia diretamente o escoamento do ar sobre a superfície, e é um dos fatores que influencia a velocidade do vento e a intensidade de turbulência na camada limite. Segundo Boçon (2004), terrenos com poucas irregularidades geram menos turbulência ao nível do solo, enquanto terrenos mais “rugosos”, ou seja, irregulares perturbam muito mais o escoamento próximo ao solo, alterando os padrões de escoamento e transporte de propriedades não só na camada superficial, mas em toda a CLA.

A rugosidade pode ser entendida como uma medida de altura até onde a velocidade do vento é igual a zero, medida a partir da superfície. A tabela a seguir mostra valores aproximados para o comprimento de rugosidade z_0 .

Tabela 2.1: Referente aos valores de rugosidade para diferentes tipos de terreno

Tipo de Terreno	Rugosidade (mm)
Gelo	0.01
Mar calmo	0.2
Mar agitado	0.5
Neve	3
Gramma baixa	8
Pasto	10
Campo	30
Plantações	50
Poucas árvores	100
Muitas árvores/ algumas construções	250
Florestas	500
Suburbios	1500
Cidades	3000

Fonte: Manwell et al, 2002 apud Dalmaz, 2007

Segundo Dutra “a rugosidade de um terreno é o conjunto de elementos, formado por árvores, arbustos, vegetação e pequenas construções sobre a superfície do solo, que oferecem resistência a passagem do vento e desviam sua rota”(DUTRA apud MIGUEL, 2004). Dessa forma fica evidente a necessidade de se considerar de que maneira o uso e a cobertura do solo influencia no perfil de velocidade.

Em regiões de terreno complexo as diferentes formas que compõem o relevo atuam como elementos capazes de alterar drasticamente o perfil do vento nessa região, “em cada região climática há uma grande variação do vento em escalas menores, em sua grande maioria definida pela geografia física da região”(BURTON; et al, 2001,p 11, nossa tradução), com isso conclui-se que a observação das características do terreno onde se pretende instalar turbinas eólicas é fundamental para investimento do setor eólico.

2.2.3 Obstáculos

Os obstáculos presentes no terreno afetam de maneira significativa a forma do escoamento. Segundo Custódio (2009), se os obstáculos possuírem grandes dimensões podem provocar sombra, ou seja, produzem uma esteira que afeta a velocidade do vento nas áreas posteriores ao obstáculo.

A determinação da maneira como os obstáculos influenciam o perfil do vento é de difícil determinação, dependem das características do obstáculo (como porosidade e dimensões), e da direção e velocidade do vento.

2.3 Perfil de Velocidades

A velocidade do vento varia seu comportamento conforme a altura. Mapeando-se as velocidades atingidas em diferentes alturas é possível gerar um perfil de velocidades, como mostra a figura a seguir.

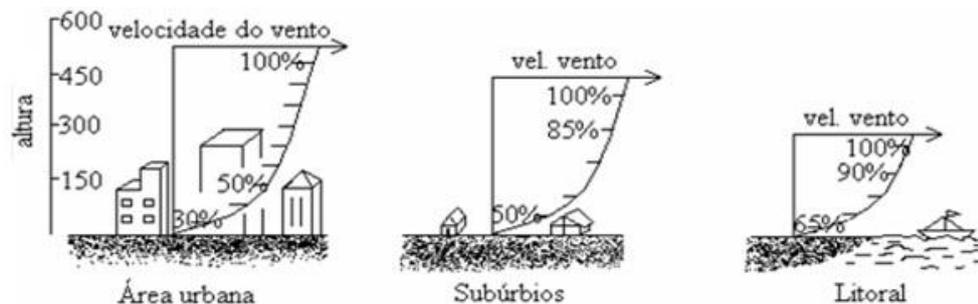


Figura 2.3: Referente ao perfil de velocidades em relação à rugosidade

O comportamento do vento a diferentes alturas pode ser determinado de duas maneiras, através da Lei de Potência ou do Perfil Logarítmico.

Normalmente as medições determinam a velocidade do vento em apenas uma altura, para obter-se o perfil de velocidades é necessário efetuar extrapolações, “pode-se obter a extrapolação da frequência da velocidade do vento por meio da Lei de Potência, modelo

matemático simples, resultado da verificação do comportamento da camada limite sobre uma placa plana” (BLESSMAN apud MIGUEL, 2004). A Lei de Potência é mostrada a seguir.

$$\frac{v_z}{v_{zr}} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (2.2)$$

Onde:

v_z : velocidade média na altura desejada (ms^{-1})

v_{zr} : velocidade média na altura de referencia (ms^{-1})

z : altura desejada (m)

z_r : altura de referencia (m)

α : expoente de potência no local (adimensional)

O parâmetro α é diretamente associado ao comprimento de rugosidade. A tabela a seguir mostra os valores para α .

Tabela 2.2: referente aos valores do parâmetro α

Terreno	α
Superfície lisa, lago, gelo ou oceano	0.10
Gramma baixa	0.14
Vegetação rasteira (até 0.3m)	0.16
Arbustos, árvores ocasionais	0.20
Árvores, construções adicionais	0.22 – 0.24
Áreas residenciais e florestas	0.28 – 0.40

Fonte : Gipe(1995); Hirata (1985) apud Terciote (2002)

De acordo com Tibola (2009), com o aumento da velocidade em função da altura, surge a necessidade que se corrija o valor de velocidade medido em uma determinada altura, já que nem sempre a altura da medição corresponde a altura ideal para se instalar uma turbina

eólica. Com a aplicação da equação supracitada, tem-se uma aproximação para a velocidade na altura desejada.

Outra forma de efetuar a extrapolação dos valores medidos é através da Lei Logarítmica, que segundo Tercio (2002, p.71) representa um modelo mais complexo onde é se considera o escoamento altamente turbulento. A Lei logarítmica é representada pela seguinte expressão.

$$v_z = v_{zr} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (2.3)$$

Onde os termos v_z , v_{zr} , z e z_r tem o mesmo significado dos termos citados na Lei de Potencia. E o termo z_0 é o comprimento de rugosidade.

2.4 Energia Disponível

A disponibilidade da energia do vento está relacionada a vários fatores, como mostrado nas seções anteriores. Segundo Aldabó (2002), o movimento das massas de ar, já descrito, gera correntes de convecção carregadas de energia cinética. Dessa forma pode-se obter uma equação para a energia contida no vento através das leis de Newton, como mostra a equação a seguir.

$$E_c = \frac{m \times v^2}{2} \quad (2.4)$$

Onde m é a massa de ar que passa por uma área A , de varredura das pás em rotação; v é a velocidade de varredura das pás.

Segundo Tercio (2002) pode-se redefinir a expressão como a energia cinética contida em uma amostra de ar, $A \times \delta x$, com densidade do ar ρ , deslocando-se a uma velocidade v , onde A é a unidade de área perpendicular à direção dos ventos e δx é paralelo a direção dos ventos. Tem –se:

$$E_c = \frac{\rho A (\delta x) v^2}{2} \quad (2.5)$$

O valor da densidade volumétrica do ar é dado pela seguinte expressão.

$$\rho = \frac{P_a}{RT} \quad (2.6)$$

Onde:

R é a constante universal dos gases;

P_a é a pressão atmosférica;

T é a temperatura ambiente.

Segundo Custódio(2009, p.40), considerando-se um fluxo de ar a uma velocidade v , movendo-se perpendicularmente a um cilindro, como mostrado a seguir, pode-se definir a potência do vento.

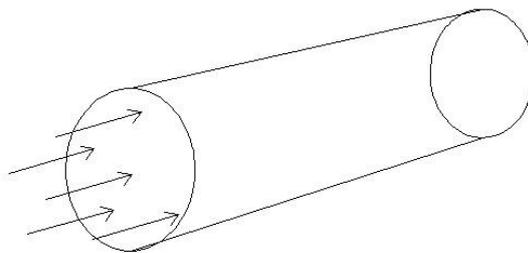


Figura 2.4: referente ao fluxo de ar através da área transversal

Através da equação (2.2) podemos definir a potência, P , disponível como a derivada da energia, dada por:

$$P = \dot{E} = \frac{dE}{dt} = \frac{\dot{m}v^2}{2} \quad (2.7)$$

Onde:

P = potência disponível no vento;

\dot{E} = fluxo de energia;

t = tempo;

\dot{m} = fluxo de massa de ar

O fluxo mássico de ar é dado através da seguinte equação:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A_t \quad (2.8)$$

A_t é a área da seção transversal.

Se a equação (2.6) for substituída em (2.2) obtêm-se a potência disponível no vento que passa pela seção transversal. A potência disponível é então dada por:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_t \cdot v^3 \quad (2.9)$$

A equação (2.7) pode ser escrita por unidade de área, dessa forma tem-se a densidade de potência (DP), como mostrado a seguir:

$$DP = \frac{P}{A_t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (2.10)$$

Conforme Custódio (2009, p. 42) pode-se dizer que a equação (2.8) expressa a potência por unidade de área em função da velocidade do vento no local de implantação de um sistema eólico.

2.4.1 Tratamento Estatístico

O vento tem como uma de suas características mais marcantes a grande variação de velocidade e intensidade, “para determinar a energia produzida pelos ventos durante um certo intervalo de tempo é necessário realizar um tratamento nos dados que os representam, de forma a estratificar as velocidades e frequências em que eles ocorreram” (TERCIOTE, 2002, P.77). Em outras palavras, através do tratamento dos dados é possível que se conheça com que frequência ocorreram ventos em velocidades específicas.

A função densidade de probabilidade que melhor representa a distribuição do vento é a função Weibull. Para essa descrição “utilizam-se dois parâmetros o fator de forma k e o fator de escala c ” (PATEL, 1999), a expressão da distribuição de Weibull é mostrada a seguir.

$$h(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.11)$$

A distribuição de Rayleigh é um caso especial da distribuição de Weibull, “o fator de forma, k , [...] assume valores, geralmente, entre 1.5 e 3, [...] caso seja atribuído um valor constante e igual a 2, tem-se então uma variação da distribuição de Weibull chamada distribuição de Rayleigh” (DALMAZ, 2007). A distribuição de Rayleigh é dada pela seguinte expressão:

$$f(v) = \frac{\pi v}{2 \bar{v}^2} e^{-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2} \quad (2.12)$$

Onde \bar{v} representa a velocidade média do vento

A distribuição de Rayleigh é mais simples de ser utilizada, porém tem limitações, já que utiliza apenas a velocidade média do vento para sua determinação.

2.5 Medições de Vento

Conforme citado anteriormente a potência do vento varia com a velocidade ao cubo, esse fato justifica a importância da precisão nas medições de vento, já que um erro de 10% nas medidas de vento representa uma diferença de aproximadamente 30% na energia gerada.

Conforme Pessanha et al (2011), ainda que o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro seja uma boa fonte de informações e permita identificar áreas mais adequadas para aproveitamentos eólicos, a análise estatística dos registros anemométricos locais fornecem uma estimativa mais precisa do potencial eólico.

Normalmente quando se deseja investir em energia eólica utiliza-se uma torre de medição no local de implantação das turbinas. O fragmento a seguir explica os elementos que compõem a estação anemométrica.

Uma estação anemométrica é uma instalação específica para coleta e armazenamento de dados de vento, como, por exemplo, velocidade e direção. Ela é normalmente composta por dois anemômetros, situados em alturas diferentes, e uma biruta. Os dados são armazenados em um datalogger que podem ser coletados no local ou remotamente. (PINHEIRO, 2009, p.34)

Os anemômetros que compõem a estação são, normalmente, anemômetros de copo. A figura a seguir ilustra esse equipamento.



Figura 2.5: Anemômetro de copo (fonte: Ammonit)

2.6 Ferramentas Computacionais

2.6.1 WRF

O WRF (Weather Research and Forecasting) é um sistema de modelagem numérica de previsão do tempo e de simulações atmosféricas desenvolvido para utilização operacional e pesquisas de mesoescala. Possui um sistema de assimilação de dados e uma arquitetura de paralelismo computacional, através de um único código fonte permite que o WRF seja utilizado em computadores de alto desempenho em conjunto com notebooks. (Skamarock, 2008).

O WRF foi desenvolvido em conjunto pelo National Center for Atmospheric Research's (NCAR), Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM) Division, the National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA), National Centers for Environmental Prediction (NCEP), Earth System Research Laboratory (ESRL), Naval Research Laboratory (NRL), Center for Analysis and Prediction of Storms (CAPS), Universidade de Oklahoma e Federal Aviation Administration (FAA), e conta ainda com a participação da comunidade científica.

Segundo Carvalho (2009), o núcleo de qualquer modelo numérico de simulação consiste na formulação das equações dinâmicas apropriadas juntamente com as técnicas de resolução das mesmas. O sistema de modelagem WRF comporta dois modos de simulações o ARW (Advanced Research WRF) e NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model). O ARW e o NMM diferem quanto à formulação das equações dinâmicas, variáveis utilizadas, e quanto ao método de integração temporal.

Para definição da localização resolução do domínio de cálculo e geração de mapas e dados estáticos (topografia e rugosidade), o WRF conta com a função WPS (WRF Pre-processing System) onde estão contidos os executáveis: `geogrid.exe`, `metgrid.exe` e `ungrib.exe`.

O executável `geogrid` define o domínio e cria arquivos de dados terrestres. O executável `ungrib` efetua o processamento inicial de dados atmosféricos. O programa `metgrid`

combina as saídas dos executáveis geogrid e ungrib, criando uma série de arquivos que podem ser lidos pelo programa real.exe.(NCAR e MMM, 2011). Este ultimo executável interpola os campos meteorológicos produzidos pelo programa metgrid para os níveis verticais (η) definidos no WRF.

2.6.2 WindStation®

É um software para simulação numérica, na microescala, de fluxos turbulentos sobre terrenos complexos.

Os dados de entrada são elevação do terreno, rugosidade e dados de vento. Os dados de terreno e rugosidade entram no formato *raster* (dados em grade) e os dados de vento em arquivos com informações pontuais (dados de estações meteorológicas). Existe também a opção de dados de entrada no formato 3D, neste caso são dados de simulações anteriores com o WindStation, ou dados de modelo de mesoescala, que é a novidade apresentada neste trabalho.

O programa calcula o campo de velocidades do vento em uma grade 3D, permitindo o processamento posterior dos dados, bem como a exportação de dados. O CFD (computational fluid dynamics) resolvido é chamado de Canyon, o sistema de coordenadas generalizado é resolvido com base em um volume de controle aproximado. É resolvido pelos seguintes meios: equações de Navier- Stokes, conservação de energia e turbulência.(Lopes,2011)

A equação de Navier- Stokes é utilizada para descrever o escoamento de fluidos Newtonianos. Segundo Yamaguchi (2008), em muitos problemas de fluxo esta equação é resolvida acoplada as equação da continuidade e conservação de energia.

A equação de Navier- Stokes pode ser definida através da seguinte equação.

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + (\lambda_0 + \eta_0) \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \eta_0 \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \right) + \rho g_i \quad (2.13)$$

Onde:

i, j e k : vetores unitários no sistema de coordenadas cartesianas

ρ : é a densidade do fluido

u : velocidade

λ_0 : coeficiente de viscosidade

η_0 : viscosidade Newtoniana

x : direção

t : tempo

A equação da continuidade é mostrada a seguir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.14)$$

Os termos desta equação já foram apresentados anteriormente.

A equação de conservação de energia é apresentada a seguir;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho C_p u T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho C_p w T) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (2.15)$$

Onde Γ é definido da seguinte maneira:

$$\Gamma = \left(\frac{\mu}{P_r} + \frac{\mu_t}{P_{rt}}\right) \quad (2.16)$$

Os termos P_r e P_{rt} representam o número de Prandtl laminar e turbulento, respectivamente. A variável C_p é o calor específico do fluido.

A equação a seguir é utilizada para modelar a turbulência.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_1 - \rho \varepsilon \quad (2.17)$$

Onde:

μ : viscosidade

μ_t : viscosidade turbulenta

k : energia cinética turbulenta

P_1 : taxa de produção de energia cinética turbulenta

ε : taxa de dispersão de energia cinética turbulenta

σ_k : constante, neste caso é igual a 1.0

Os dados de entrada do terreno e de rugosidade devem ser armazenados em um arquivo de texto em formato ASC II.

2.7 Caracterização da Região

A cidade de Dom Pedrito é situada no Rio Grande do Sul, Brasil, com área de 5192.105 Km² e população de 38916 habitantes (IBGE 2010). A imagem a seguir mostra a localização do município.



Figura 2.6: localização da cidade de Dom Pedrito (Fonte: Wikipédia)

Tem como latitude e longitude os seguintes pontos: 30° 58' 58" S, 54° 40' 22" W. O município faz fronteira ao norte com as cidades de Rosário do Sul e São Gabriel, ao sul com o Departamento de Rivera (Uruguai), a oeste com Santana do Livramento e ao leste com Bagé.

3 RESULTADOS

Considerando-se como objetivo apresentar a interação das ferramentas computacionais WindStation® e WRF, os resultados serão apresentados na seguinte sequência:

1. WindStation®
2. WRF
3. Interação WindStation®/ WRF

Para obtenção dos resultados preliminares utilizou-se como estudo de caso uma data específica, no caso o dia vinte e dois de novembro de dois mil e onze (22/11/2011). Os dados de vento oriundos da torre anemométrica de 10 metros, obtidos através do INMET, são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 3.1: Referente aos dados de vento

Hora	V10(m/s)	V50(m/s)	Direção (°)	HCLA(m)
09	7.6	10.366	177	353
10	9.5	12.957	180	541
11	10.6	14.457	175	629
12	10.9	14.866	168	938
13	11.2	15.276	175	1297
14	9.7	13.23	170	1633
15	9.8	13.366	172	1661
16	9	12.275	168	1689
17	9	12.275	179	1728
18	7.3	9.956	165	1677
19	7	9.547	164	634
20	7	9.547	164	376
21	5.5	7.501	174	463

Os valores de V10 representam a velocidade, medida através da torre anemométrica a cada meia hora, a 10 metros de altura. Os valores de V50 foram obtidos através da equação da Lei Logarítmica (2.3) e representam os valores de velocidade a 50 m de altura. A variável HCLA representa a altura da camada limite atmosférica, obtida através do WRF e a direção do vento é obtida dos dados da torre anemométrica.

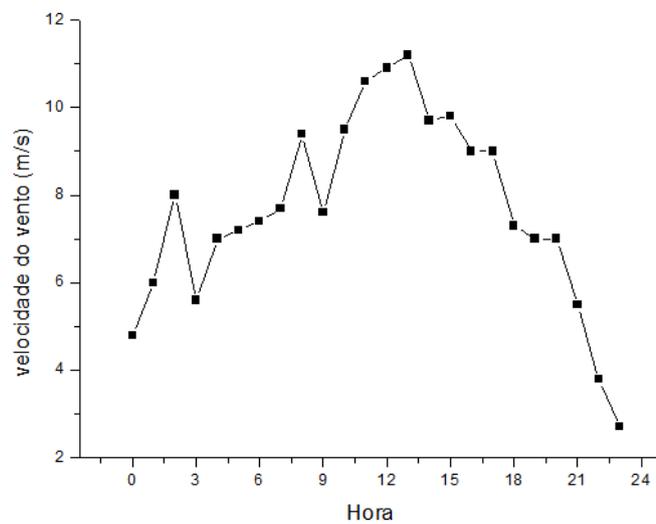


Figura 3.1: Gráfico da velocidade do vento x hora

A figura 3.1 mostra a variação das velocidades do vento da estação meteorológica (a 10m de altura) em função da hora.

Para o comprimento de rugosidade, extraiu-se do WRF $z_0 = 0.12m$. a figura a seguir mostra o mapa de rugosidade resultante do WRF.

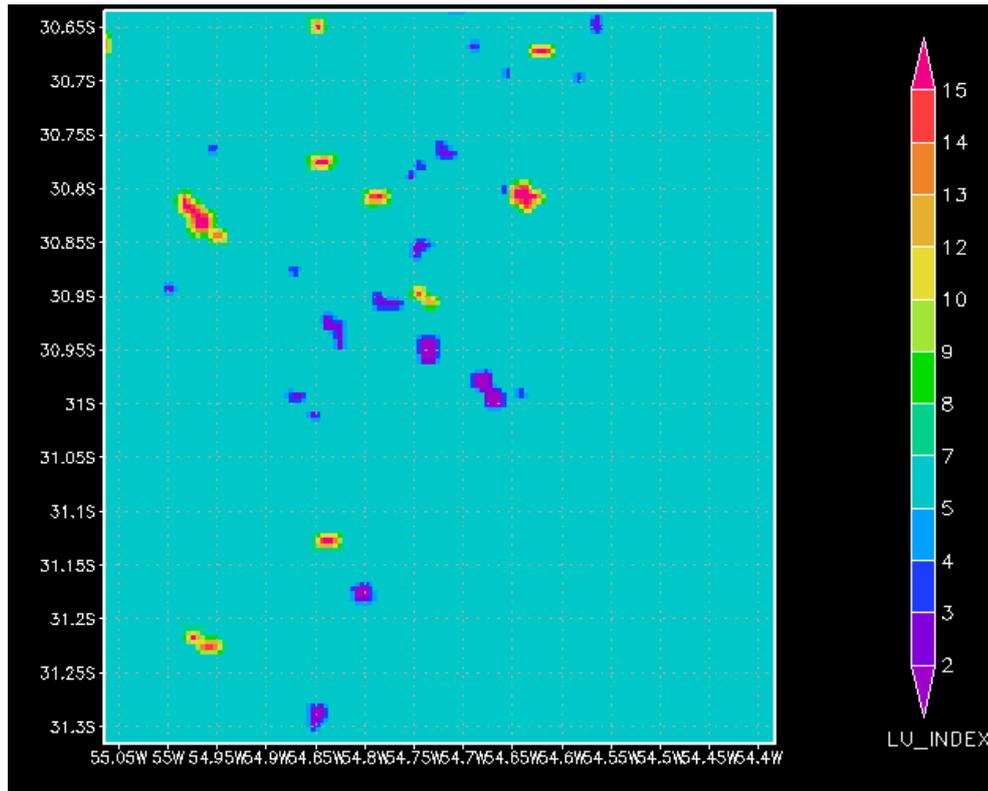


Figura 3.2: Mapa de rugosidade

Comparando-se a Tabela 2.1 com o valor de rugosidade obtido através do WRF pode-se dizer que o valor de 120mm fica entre os valores que caracterizam uma região com poucas árvores e muitas árvores/algumas construções.

A latitude e longitude da torre anemométrica, bem como as coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) são:

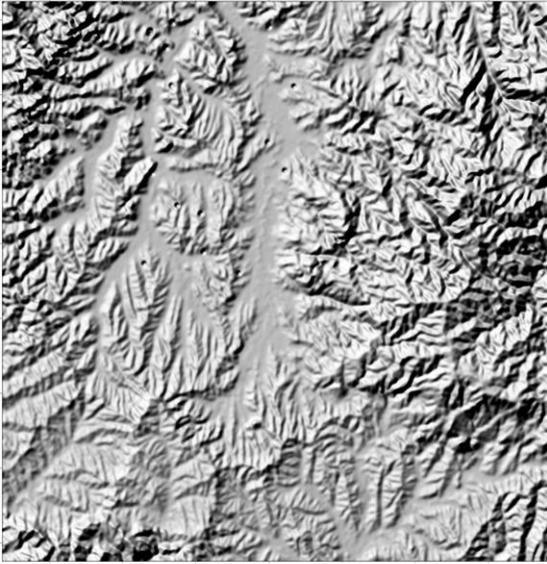
Latitude: -30.9925°

Longitude: -54.8153°

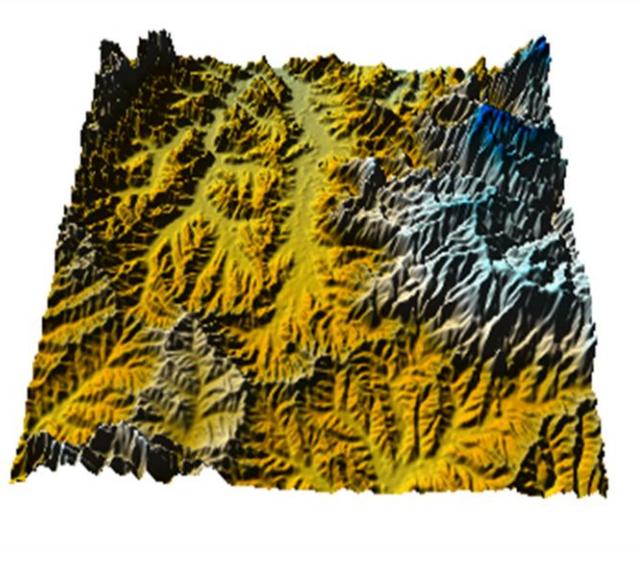
UTMx: 708989.8495

UTMy: 6588825.4498

A figura a seguir mostra as representações do terreno, no caso a região de Dom Pedrito, onde serão realizadas as simulações.



(a)



(b)

Figura 3.3: (a) Representação do terreno. (b) Representação 3D do terreno

Para todos os resultados que serão apresentados considerou-se a altura do solo como altura inicial (h_0).

3.1 Resultados do WindStation®

As simulações que utilizaram o software WindStation® foram rodadas em um notebook com processador Intel Core 2Duo, 2.0GHz e 4GB de memória RAM.

Para rodar o software, inicialmente é necessário gerar os dados do terreno para a região na qual se deseja obter o campo do vento. A figura a seguir mostra o terreno gerado através da plataforma TERREL do software CALPUFF já na interface do WindStation®.

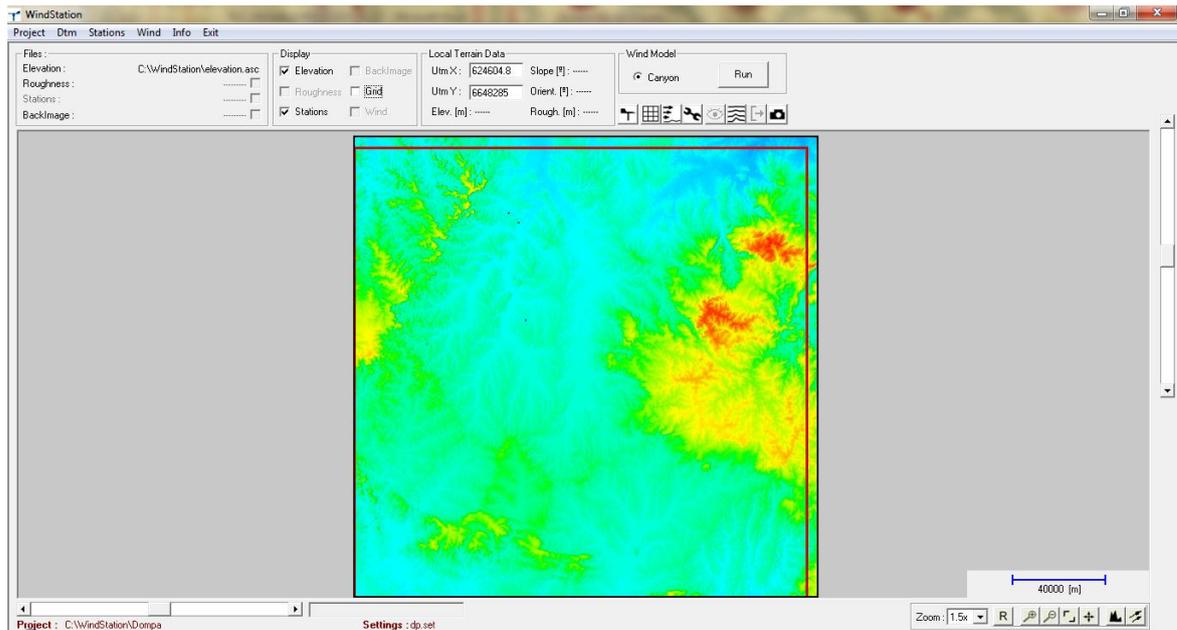


Figura 3.4: Referente ao modelo do terreno na interface do WindStation®.

Em seguida são inseridos os dados de vento, como localização da torre anemométrica (coordenadas UTM), altura das medições, velocidades do vento referente às alturas, altura da camada limite e direção do vento.

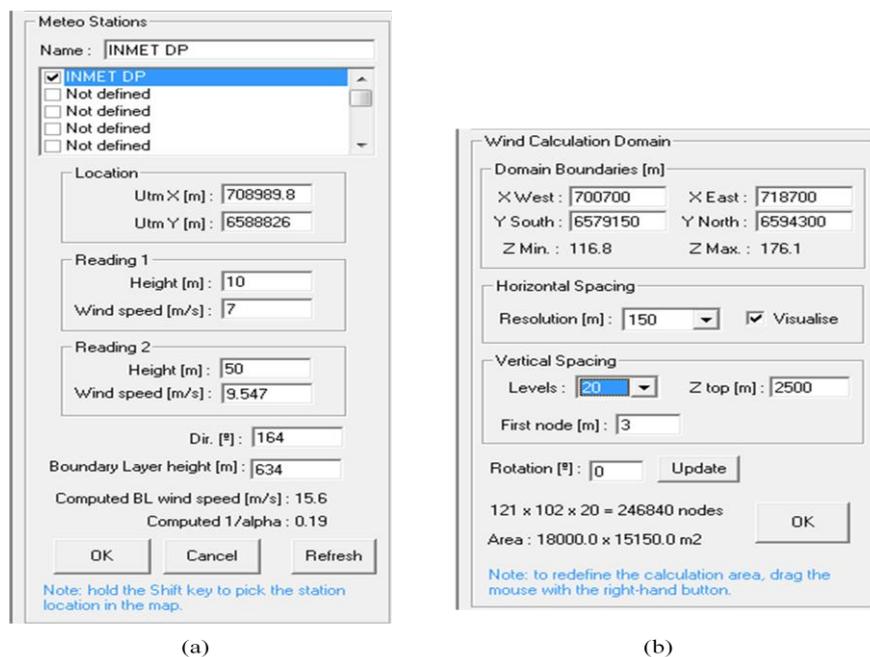


Figura 3.5:(a)Referente inserção dos dados de vento (b) Referente aos parâmetros do domínio

Define-se ainda a região para a qual o campo do vento deverá ser calculado. A figura 3.5 (b) mostra a interface de parâmetros do domínio de cálculo.

A região marcada na figura 3.6 representa uma área de $272,2 \text{ Km}^2$, divididos em 246400 nós.

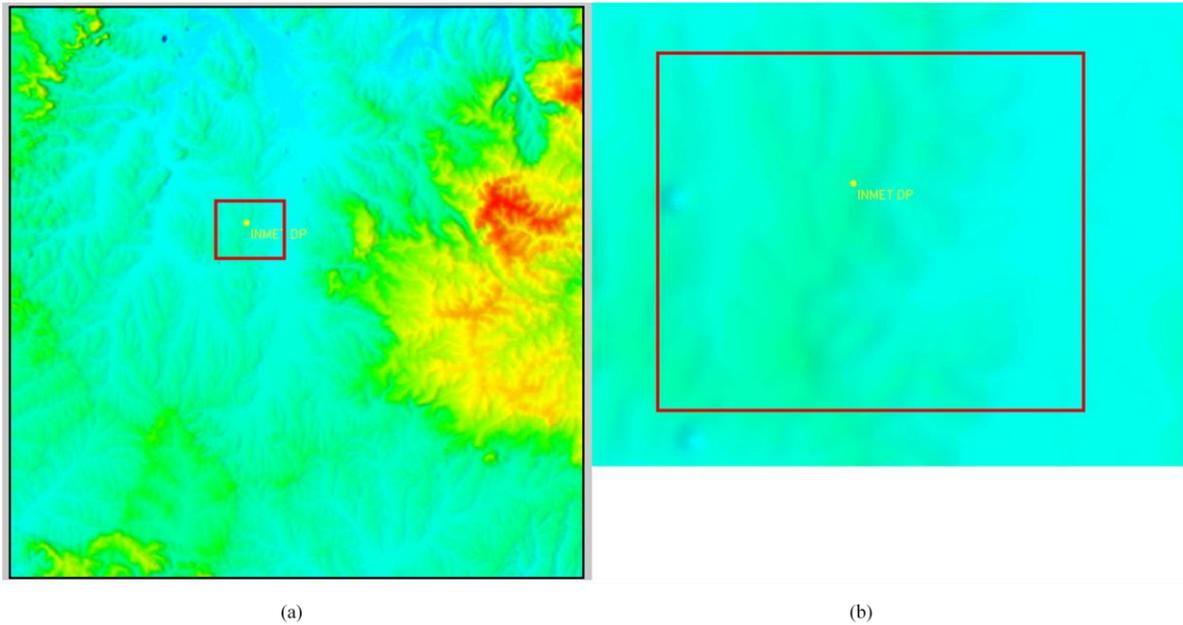
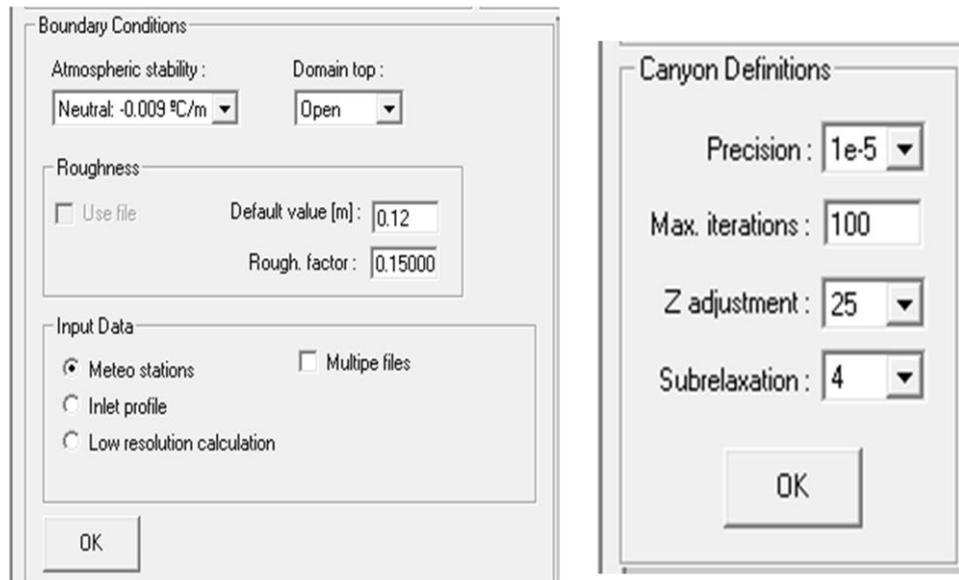


Figura 3.6: (a) Definição do domínio de cálculo. (b) Zoom do domínio

As imagens a seguir mostram as condições de contorno e os parâmetros de convergência.

Definiu-se a como condição de contorno a atmosfera neutra e utilizou-se o topo do domínio aberto. A rugosidade utilizada já foi citada anteriormente



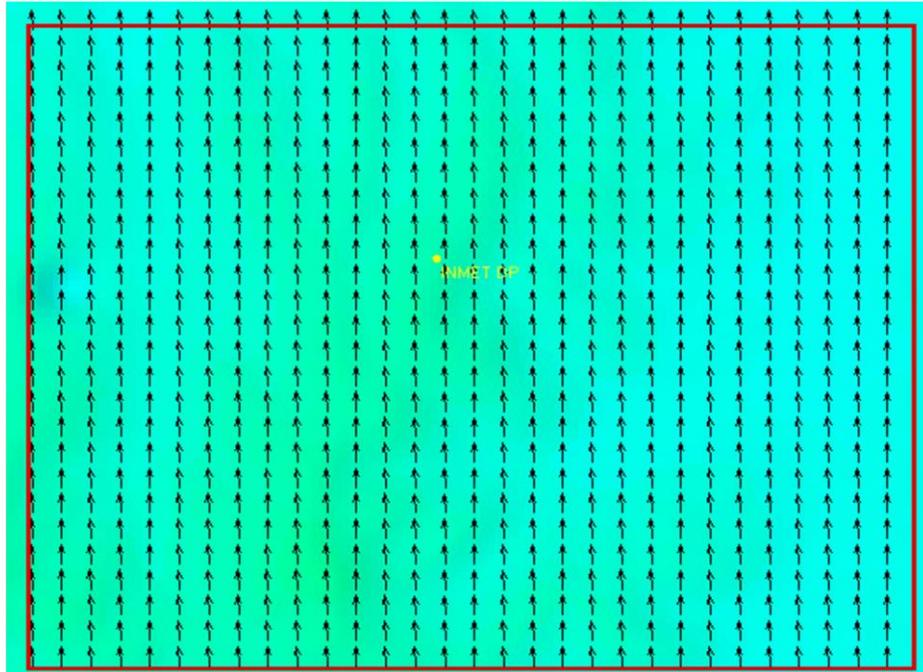
(a)

(b)

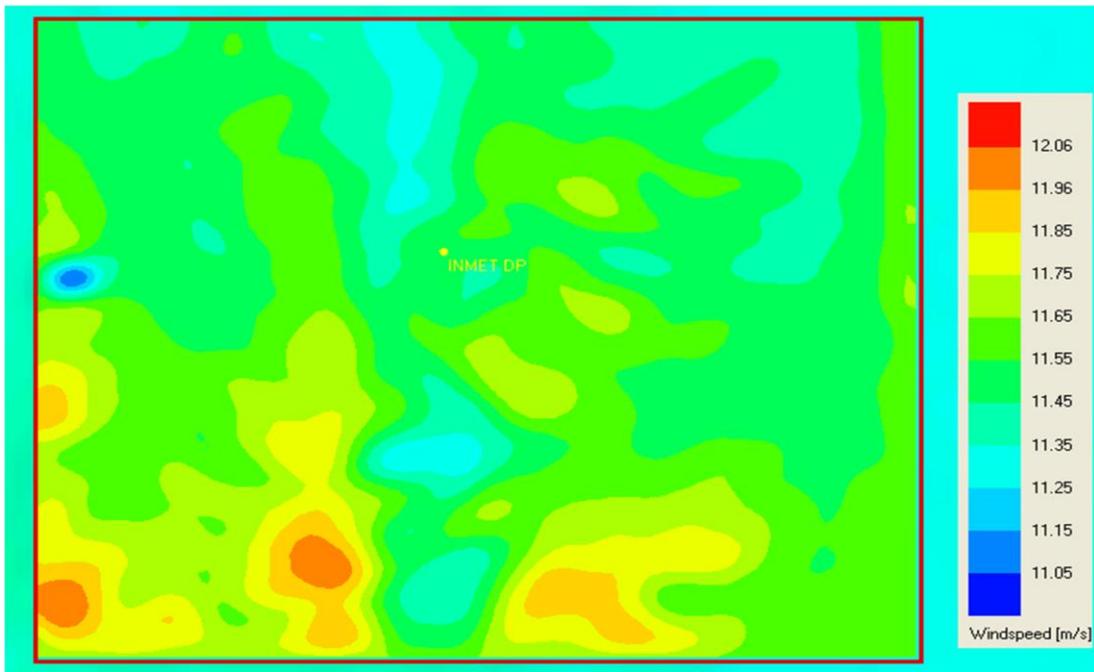
Figura 3.7: (a) Condições de contorno. (b) Parâmetros de convergência

Os parâmetros de convergência dizem respeito à precisão desejada para o cálculo, o número máximo de iterações, o parâmetro *Z adjustment* é utilizado para ajustar a elevação em cada ponto da grade.

As figuras a seguir mostram os resultados da simulação a 100m de altura as 9:00h, 12:00h e 15:00h, com uma resolução de grade de 150m ($dx= 150m$).



(a)

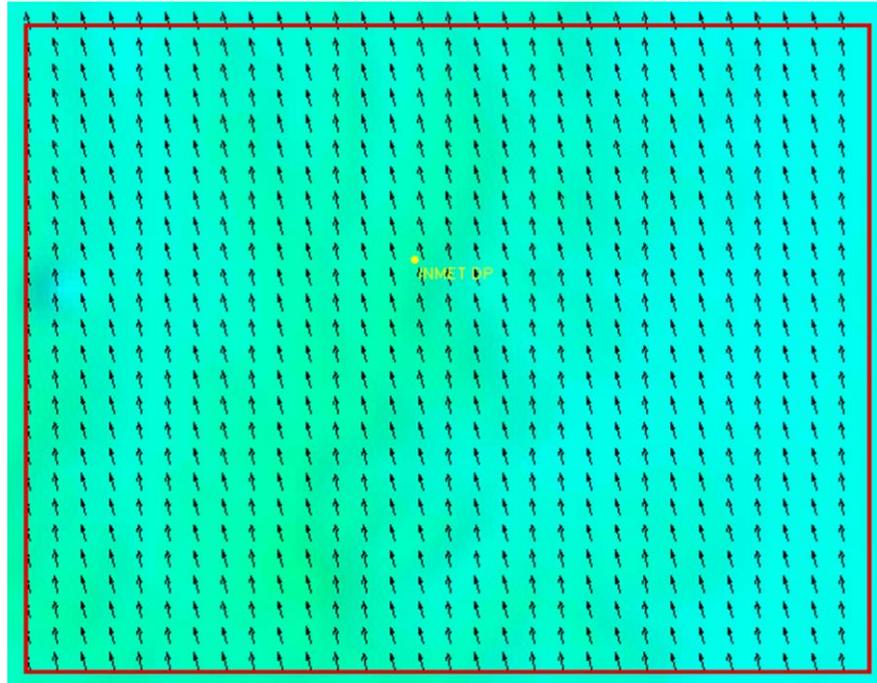


(b)

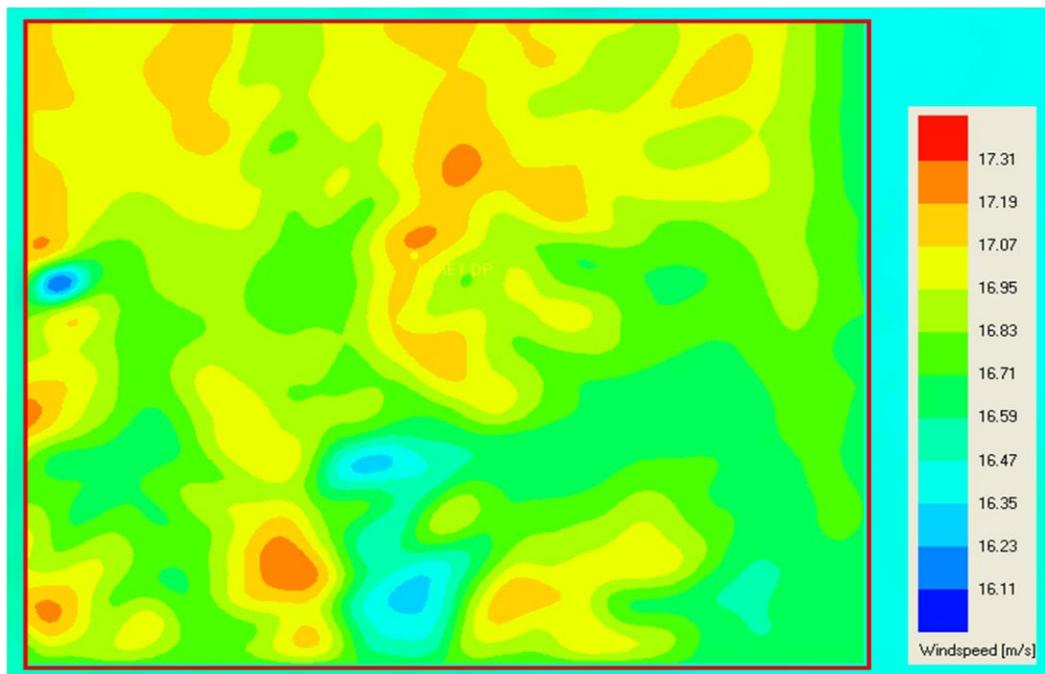
Figura 3.8: Campo de velocidades do vento a 100m de altura as 9:00h.(a)Direção;

(b)Magnitude

A figura 3.8 (a) mostra a direção do vento a 100m de altura, pode-se perceber a predominância da direção sul, com poucas variações. Já na figura 3.8(b), onde é mostrada a intensidade do vento, percebe-se que as áreas com maiores velocidades encontram-se nas regiões com alturas mais elevadas.



(a)

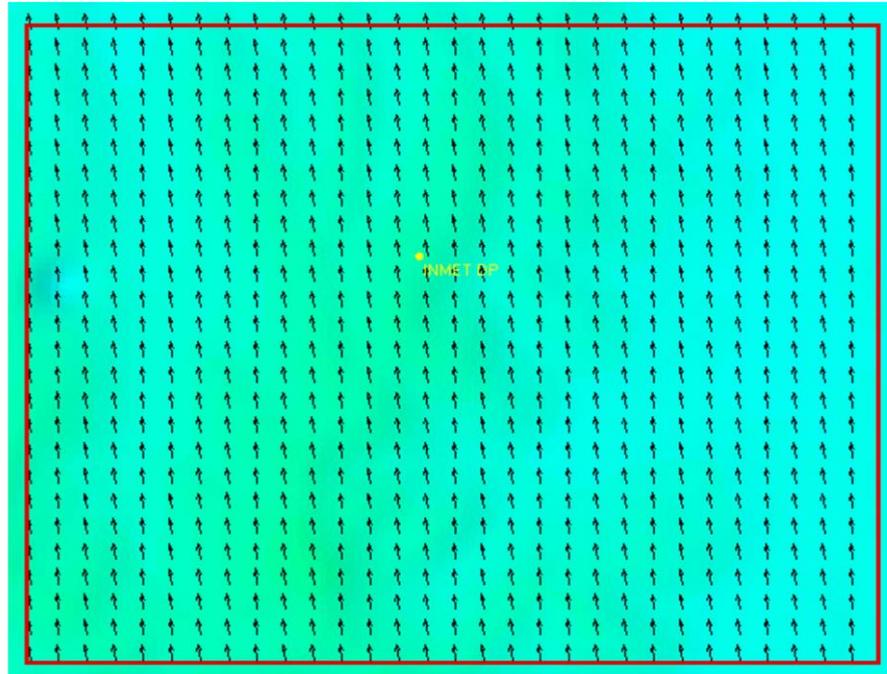


(b)

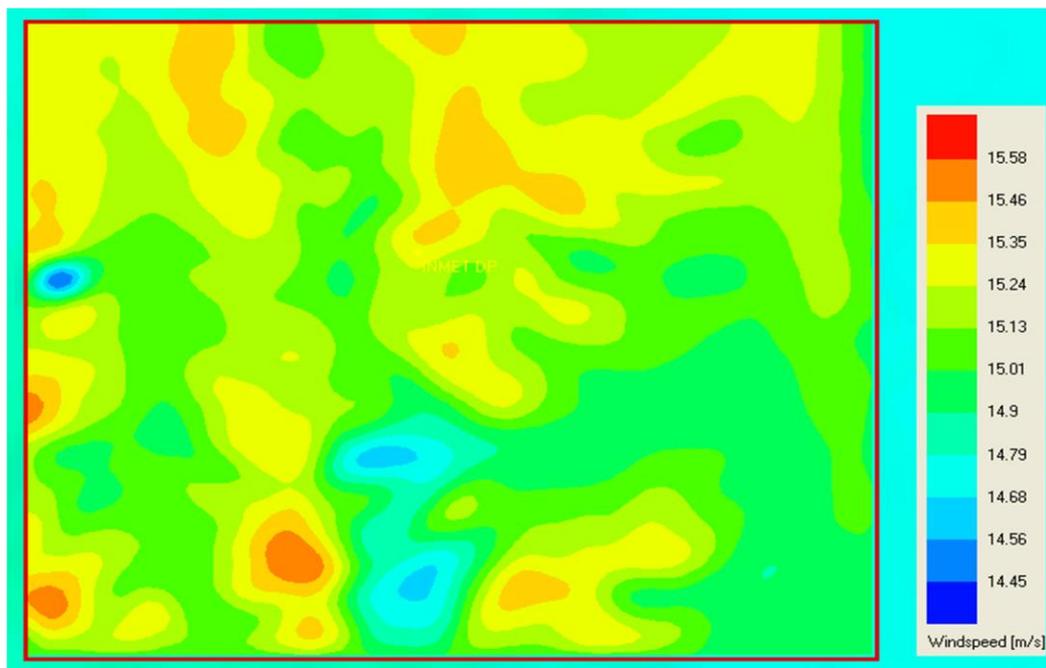
Figura 3.9: Campo de velocidades do vento a 100m de altura as 12:00h; (a)Direção;
(b) Magnitude

Na figura 3.9(a) nota-se uma pequena variação na direção em relação a figura 3.8(a), na direção sudeste. Na figura 3.9 (b) nota-se um aumento na velocidade dos ventos em praticamente todo domínio, com destaque novamente para as regiões mais elevadas.

Na figura 3.10(a) percebe-se novamente uma alteração na direção do vento, para sudeste. Na figura 3.10(b) ainda predominam velocidades de vento altas, porém menores em alguns pontos quando comparadas com a figura 3.8(b).



(a)



(b)

Figura 3.10: Campo de velocidades do vento a 100m de altura as 15:00h; (a) Direção;(b)Magnitude

A tabela a seguir mostra os dados de vento da torre anemométrica da Fazenda Guatambú, localizada também no município de Dom Pedrito e de coordenadas UTMx:711994.1412.e UTM y: 6576661.5663 Estes dados serão utilizados aqui para avaliar os resultados gerados pelo WindStation® utilizando os dados da estação meteorológica do INMET em Dom Pedrito.

Tabela 3.2: Referente aos dados de vento da torre da Fazenda Guatambú

Hora	Velocidade média (m/s)	Direção
09:00	8.732482	209.7610
12:00	9.675815	200.2007
15:00	8.186206	198.9730

A figura a seguir mostra o perfil vertical de velocidades para as proximidades da torre anemométrica da Fazenda Guatambú.

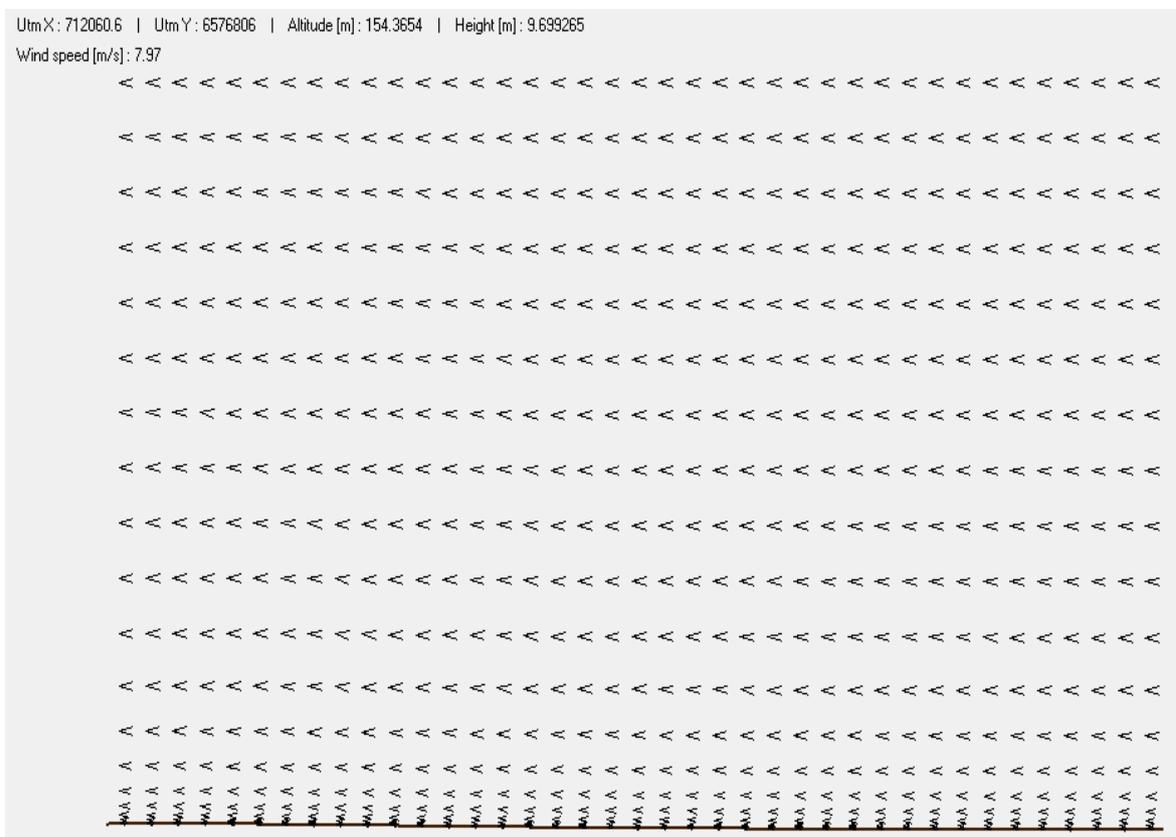


Figura 3.11: Perfil vertical de velocidades do WindStation as 9:00h

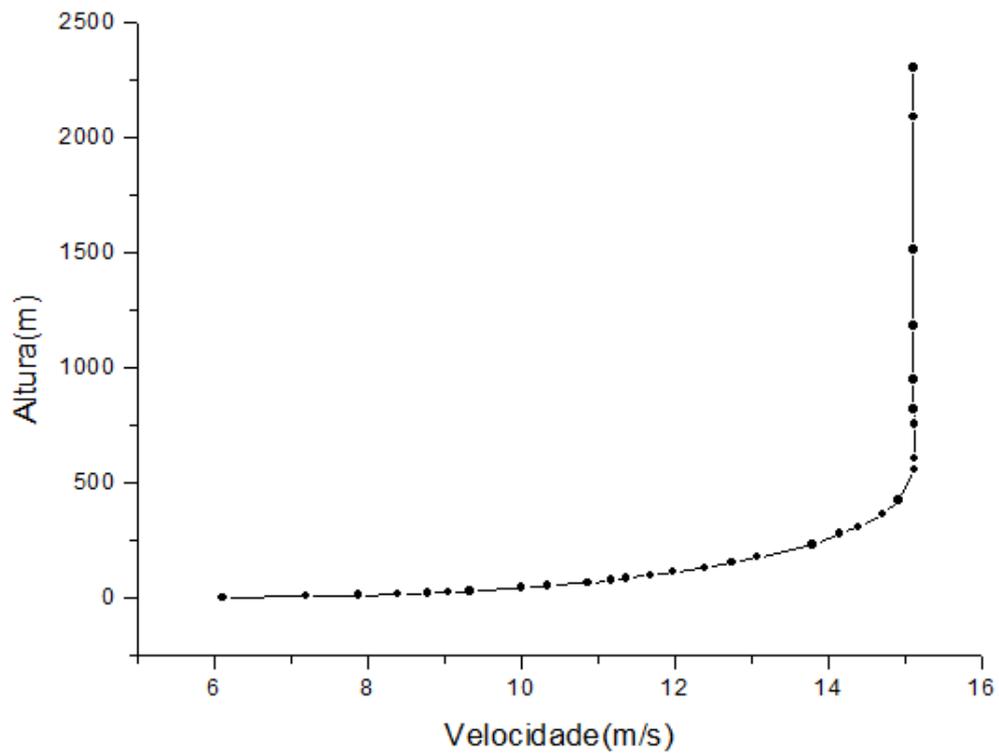


Figura3.12: Gráfico do perfil vertical de velocidades para as 9:00h.

Comparando-se a velocidade mostrada na figura, em uma altura de 9.699m, com a mostrada na tabela 3.2 (a 10m) percebe-se que a velocidade calculada pelo WindStation® para as coordenadas UTM da torre é 0.76m/s inferior a medida pela mesma, esse valor representa uma diferença de 8.731%.

A figura a seguir mostra o perfil de velocidades para as 12:00h.

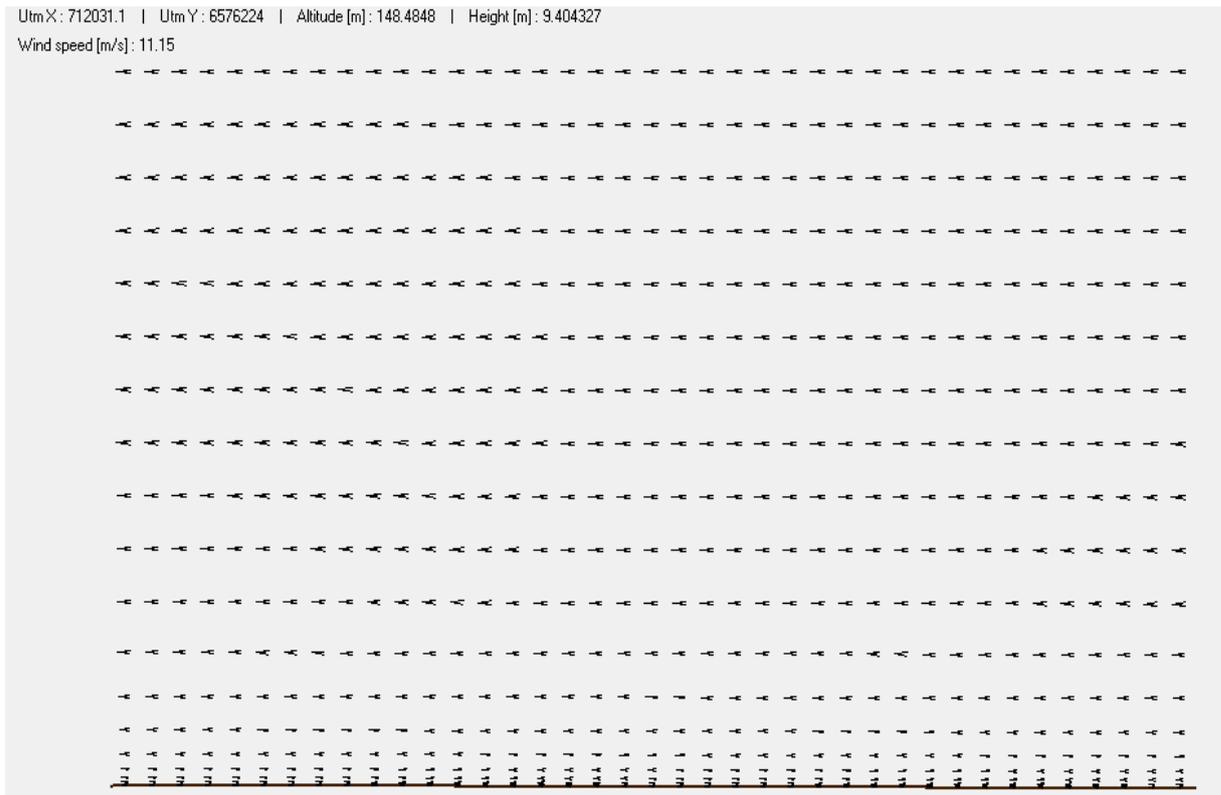


Figura 3.13: Perfil vertical de velocidades do WindStation as 12:00

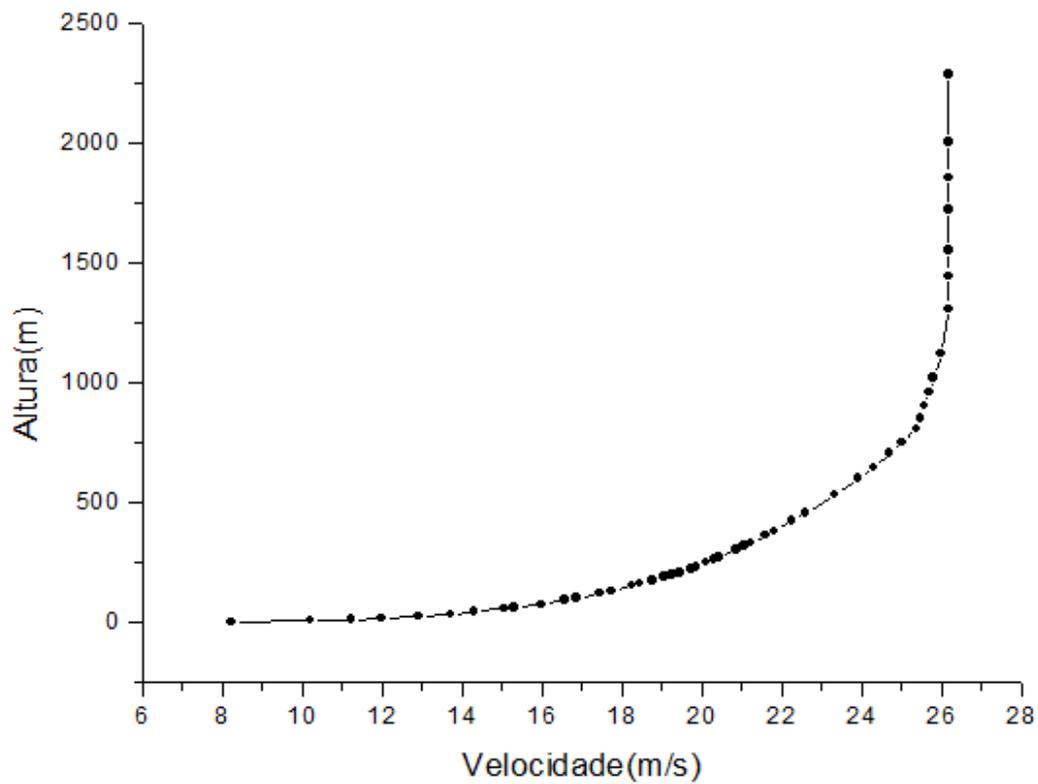


Figura 3.14: Gráfico do perfil de velocidades para as 12:00h.

Na figura 3.13 a 9.40m tem-se uma velocidade de 11.15, enquanto a torre registra uma velocidade de 9.6758m/s as 12:00. A diferença entre as medidas é de 1.474 m/s, esse valor representa 15.2% de diferença entre os valores.

A imagem a seguir mostra o perfil vertical de velocidades para as 15:00.

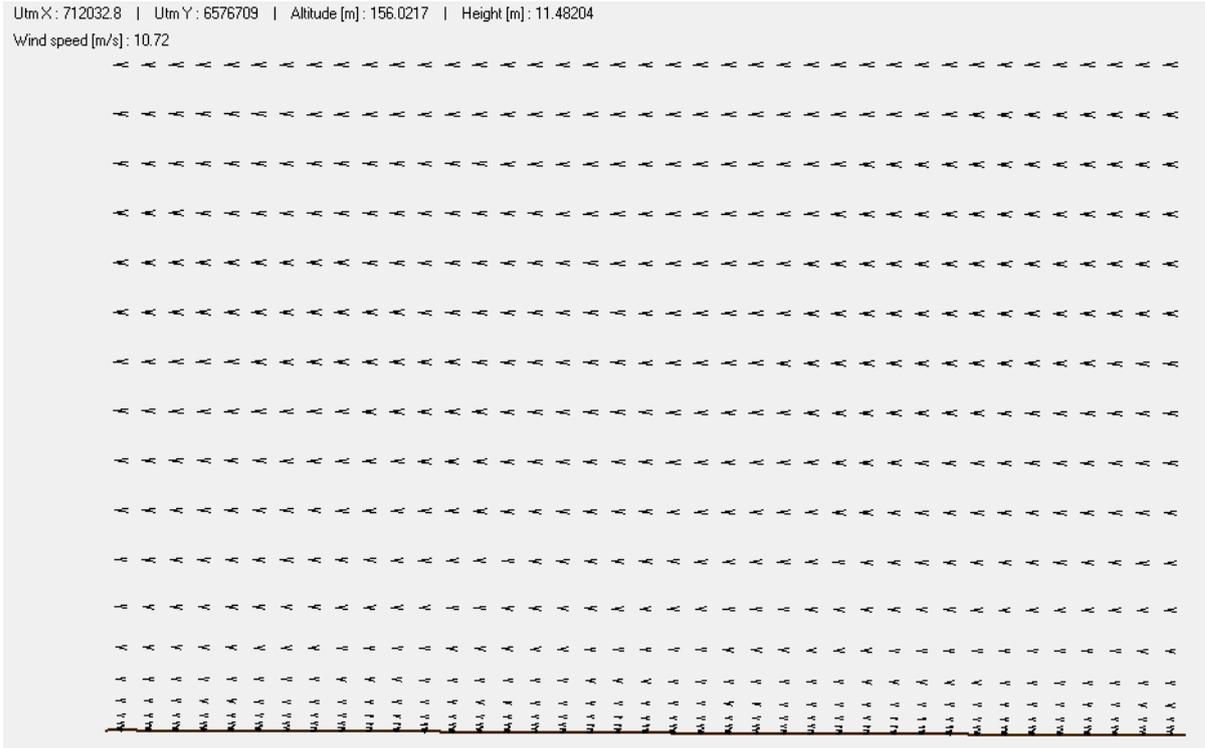


Figura 3.15: Perfil vertical de velocidades do WindStation as 15:00h

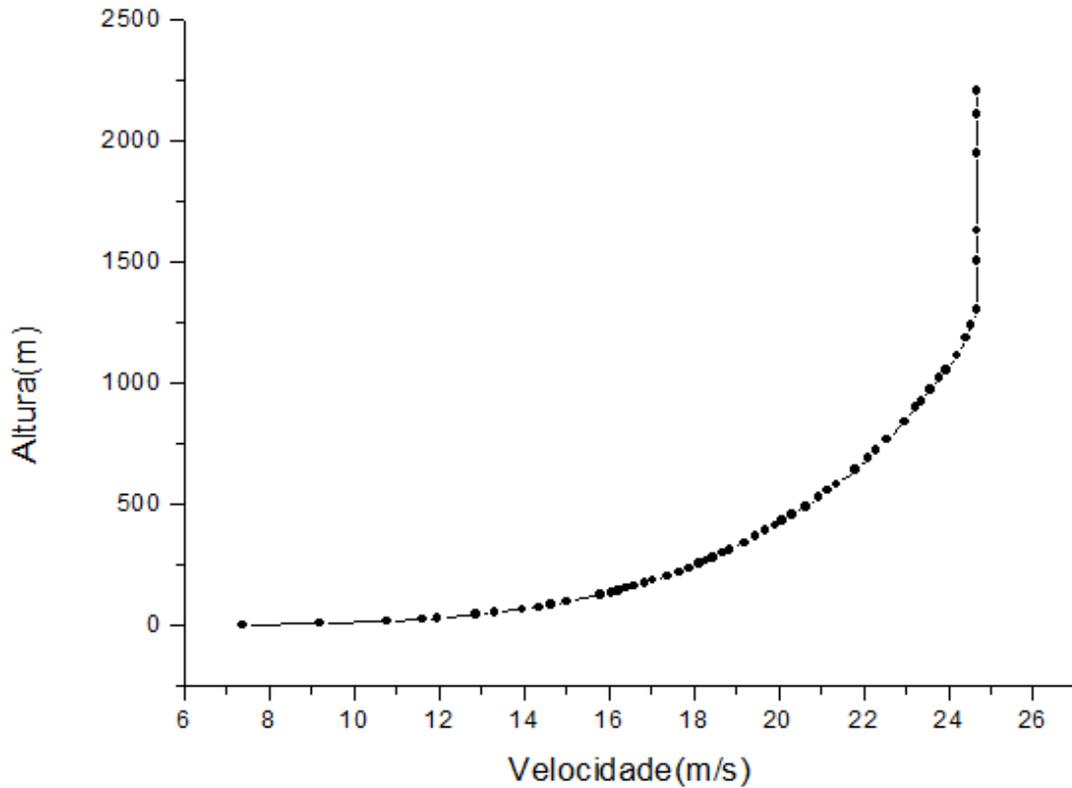


Figura 3.16: Gráfico do perfil de velocidades para as 15:00h.

Através da figura 3.15 verifica-se que a velocidade do vento a 11.48m de altura é 10.72m/s. comparando este valor com a medição da torre, a diferença encontrada é de 2.534m/s, esse valor representa uma diferença de 31%.

3.2 Resultados do WRF

Para as simulações com WRF utilizou-se um módulo de um cluster DELL, com processador dois processadores Intel Quad Core E5506 Xeon, 2.13GHz, 4MCache 4.86GT/s, com 16 GB de memória DDR3.

As figuras a seguir mostram os resultados obtidos a partir do WRF para os mesmos horários das figuras apresentadas anteriormente, porém abrangendo uma região um pouco maior do que a utilizada no WindStation. Lembrando que estas figuras anteriores são resultados das simulações do modelo WindStation somente com dados da estação do INMET de Dom Pedrito.

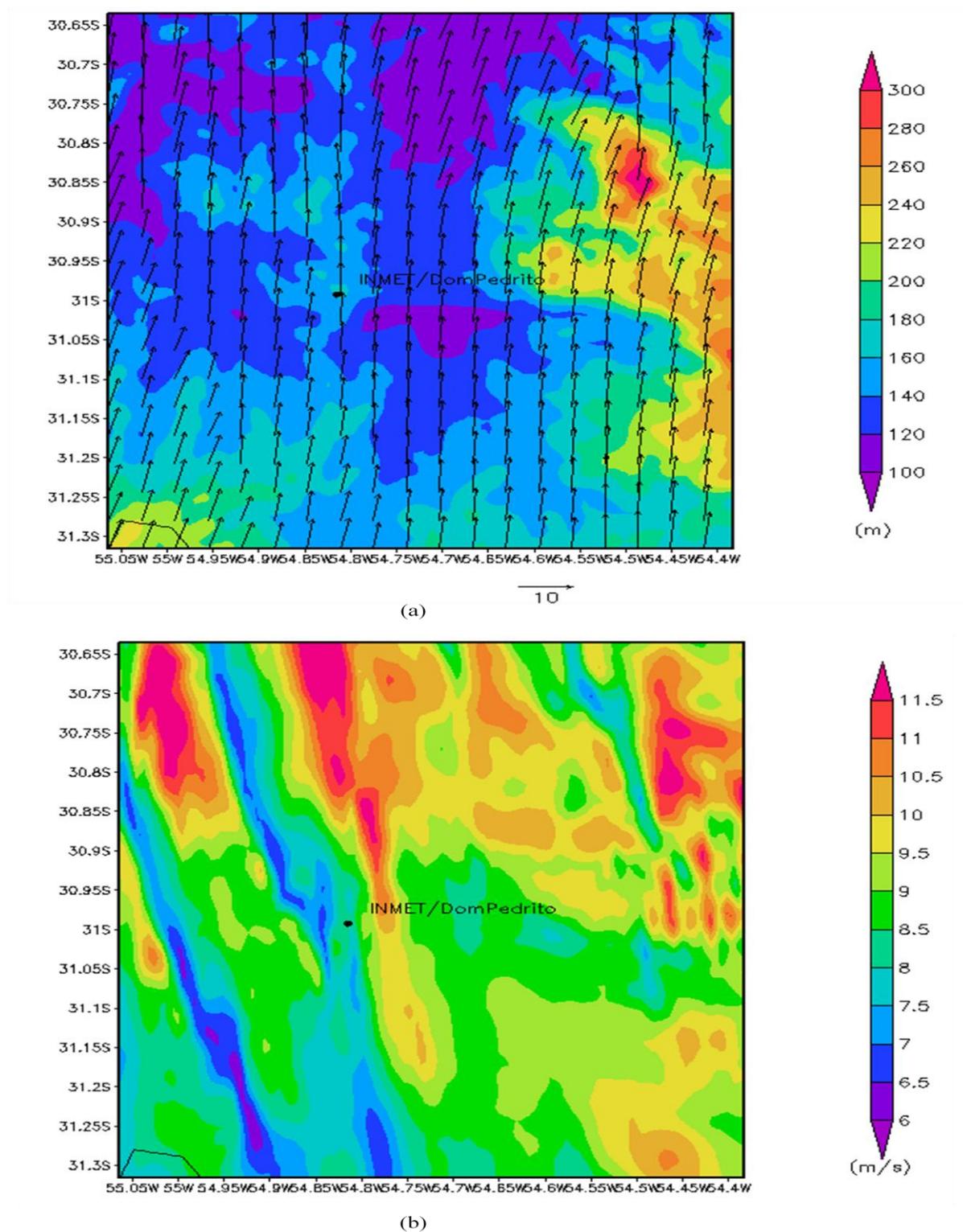


Figura 3.17:(a)direção do vento a 100m e topografia e (b) magnitude do vento as 9:00h

A figura 3.17 (a) mostra a direção do vento com predominância oeste, algumas alterações são percebidas, provavelmente decorrentes das características orográficas no

terreno. Na Figura 3.17(b) velocidades mais elevadas são percebidas não apenas nos pontos mais altos, mas também onde o terreno parece favorecer a circulação, formando “corredores” (efeito de canalização do vento).

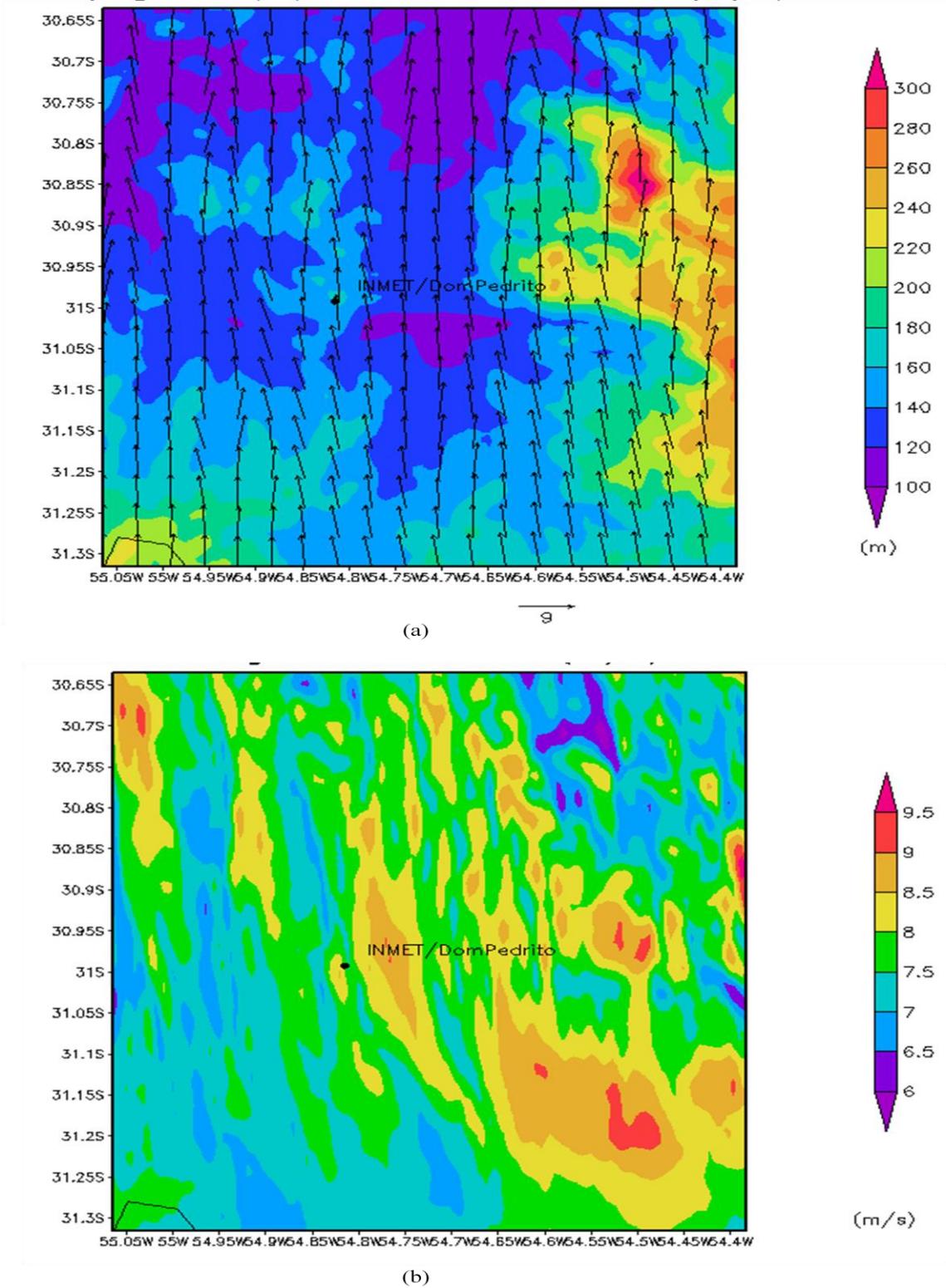


Figura 3.18:(a)direção do vento a 100m e topografia e (b) magnitude do vento as 12:00h.

Na figura 3.18 (a) ainda percebe-se a direção predominante como sul, porém há maiores variações nas direções dos vetores.

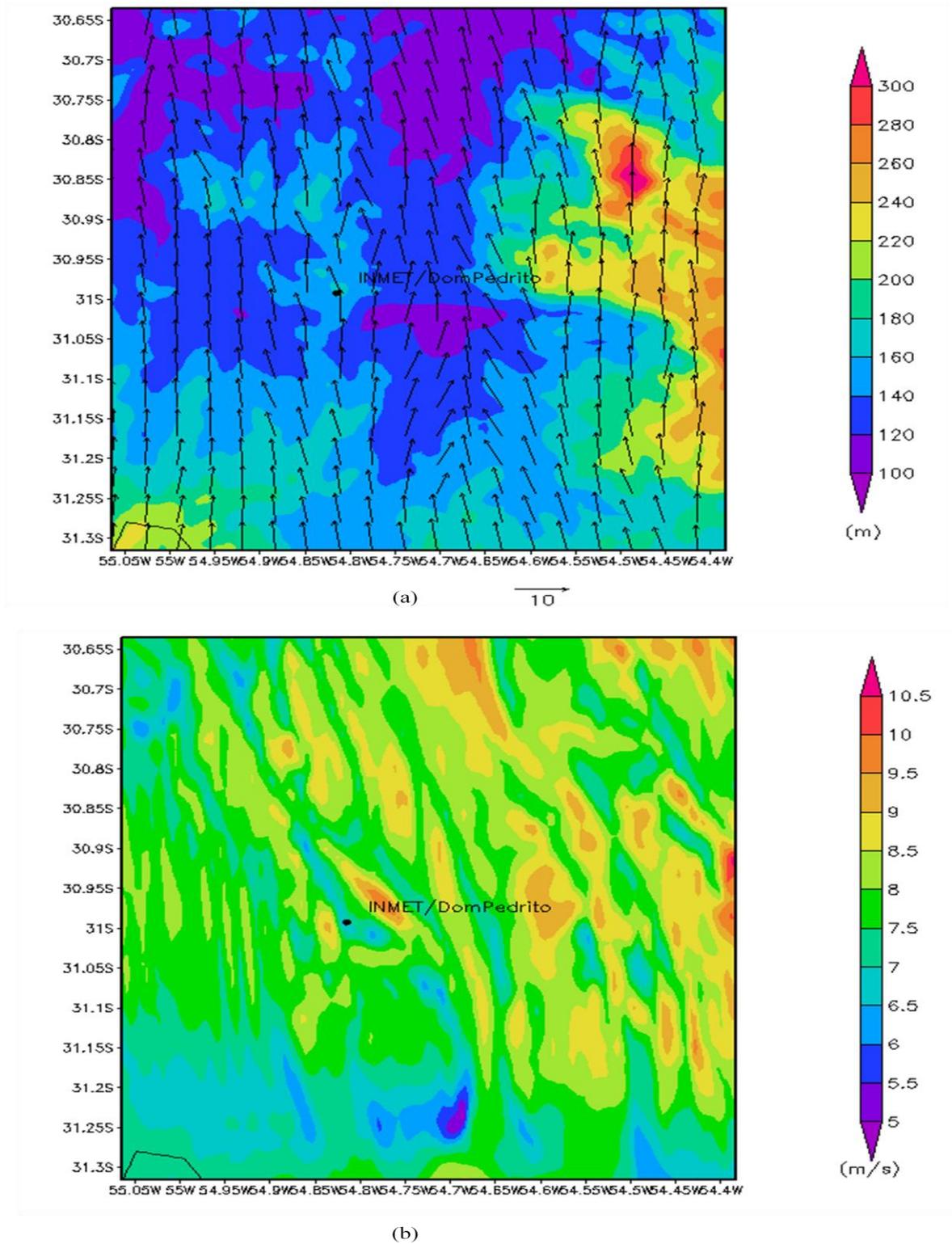


Figura 3.19: (a) direção de vento a 100m e topografia e (b) magnitude do vento as 15:00h.

Na figura 3.19 (a) ainda são perceptíveis grandes variações na direção do vento, embora a direção predominante continue sendo a direção sul. Na imagem 3.19(b) percebe-se uma variação dos locais de maior velocidade a ausência de locais com velocidades máximas.

3.3 A Interface WRF2WindStation®

A interface WRF2WindStation® é um software que permite que os resultados obtidos das simulações com o modelo de mesoescala WRF sejam utilizados no modelo de microescala WindStation® como condições iniciais e de contorno nas simulações deste último. Esta opção soma-se as outras opções de entrada que o mesmo já disponibiliza que são (como já comentadas anteriormente): dados de estações meteorológicas, dados de perfil do vento e dados de simulações anteriores, em resoluções menores, obtidas pelo próprio WindStation®.

A vantagem de se utilizar os resultados das simulações com o WRF é que as circulações (ventos) locais e efeitos topográficos, que nem sempre estão identificadas nos dados das estações meteorológicas e nas simulações do próprio WindStation®, podem ser capturadas pelo modelo WRF e assim serem inseridas nas simulações mais detalhadas (microescala) executadas no WindStation®. Desta forma os resultados das simulações com o WindStation® devem ser mais realistas, ou seja, capturando melhor as feições do vento em terrenos complexos. Outros modelos de microescala, WINDMAP e CALMET, se utilizam também desta característica. Eles também possuem interfaces que assimilam dados de modelos de mesoescala como o MM5, RAMS e ETA.

3.3.1 Estrutura geral da Interface.

A interface foi programada em linguagens Shell-Script, GrADS e FORTRAN e é compatível com os sistemas UNIX e WINDOWS. Neste último sistema é necessário ter instalado no sistema o programa Cygwin, uma vez que o conjunto de passos executados da rotina principal é programado em Shell-script.

O primeiro passo no processamento (ou transformação) dos dados das simulações do WRF no formato de entrada do WindStation® é a conversão das saídas do modelo WRF, que estão originalmente no formato NetCDF para o formato GrADS. Isto é feito através do pós-processador (WRF *Graphic Tools*) do modelo WRF chamado ARWPost. Este utilitário converte os arquivos, por exemplo, “wrfout_d01_2000-01-24_12:00:00”, em arquivos binários (*.dat) e descritores (*.ctl) do formato GrADS.

Após esta conversão, são executados GrADS scripts (*.gs) que extraem as informações das componentes u, v e w da velocidade do vento, t da temperatura do ar, h da altura do terreno e coordenadas do grid para arquivos textos (ascii files) que posteriormente são lidos e processados por rotinas implementadas em FORTRAN que irão finalmente gerar o arquivo de entrada (wrf.out) que será utilizado pelo WindStation®.

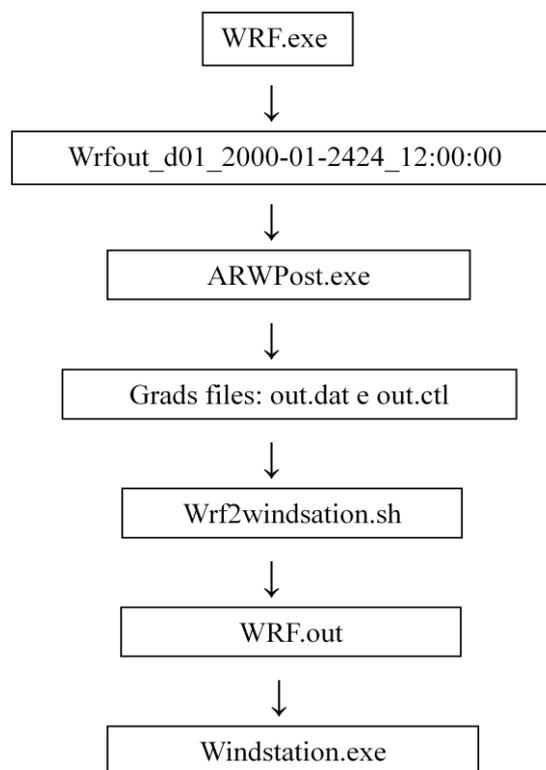


Figura 3.20. Fluxograma do funcionamento da interface WRF2WindStation®.

3.3.2 Resultados do WRF2WindStation®

A realização dos procedimentos realizados pela interface WRF2WINDSTATION, conforme anteriormente descritos no item 3.3 e 3.3.1, permite a utilização dos resultados do WRF no WindStation®.

Ao ser carregado um arquivo de saída do WRF para ser utilizado como condição de contorno no cálculo do campo de velocidades do vento do WindStation®, a seguinte mensagem é exibida.

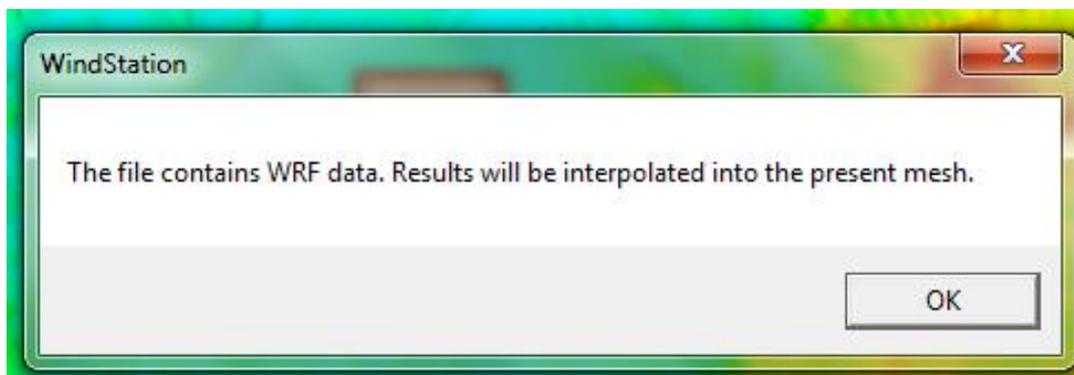


Figura 3.21: Interação WRF2WindStation

A figura 3.18. Caixa (box) onde é informado pelo WINDSTATION a origem dos dados a partir do modelo WRF.

Figura a seguir mostra a saída resultante do WRF e o domínio para o qual o WindStation® irá determinar o campo de velocidades do vento.

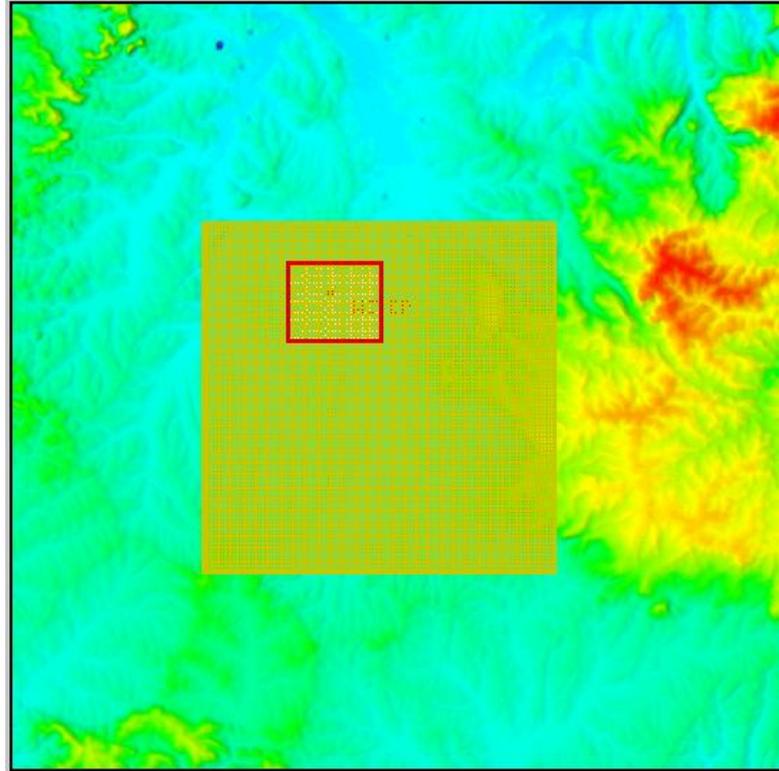
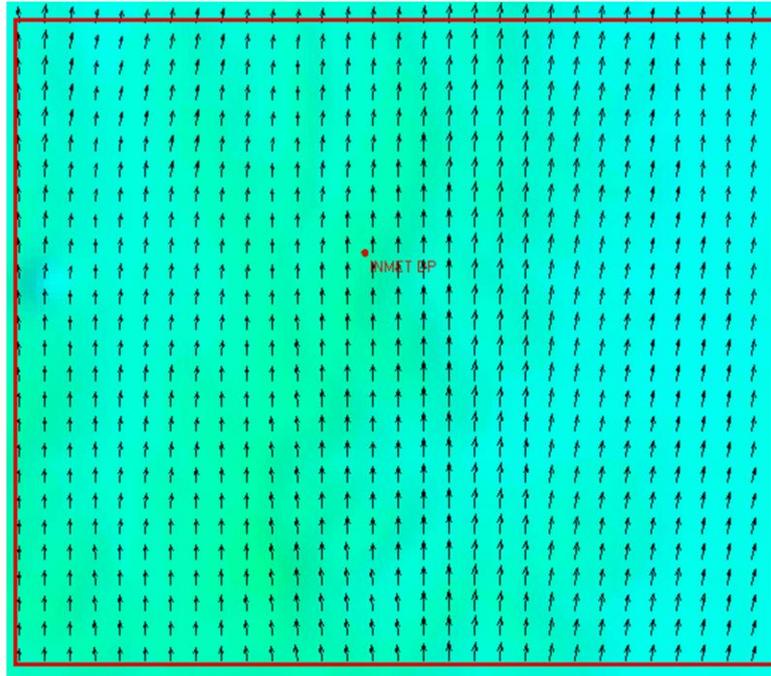


Figura 3.22: Dados oriundo do WRF (amarelo) e domínio de cálculo do WindStation (vermelho)

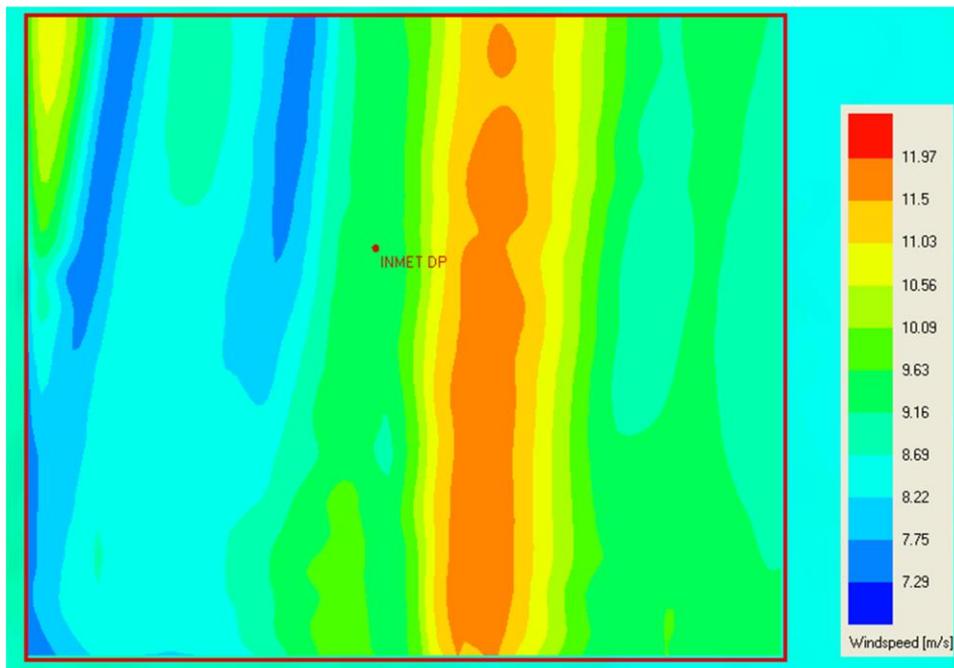
A área em amarelo mostra a região de simulação com o modelo WRF, enquanto a área marcada em vermelho mostra o domínio que o WindStation® utilizará para calcular o vento.

Assim como os resultados anteriormente mostrados, nesta seção também serão apresentados os resultados das simulações para as 9:00, 12:00 e 15:00h do dia 22 de novembro de 2011, calculados com uma resolução de 150m.

A figura a seguir mostra o campo de velocidades do vento resultante da interação dos modelos para as 9:00.



(a)

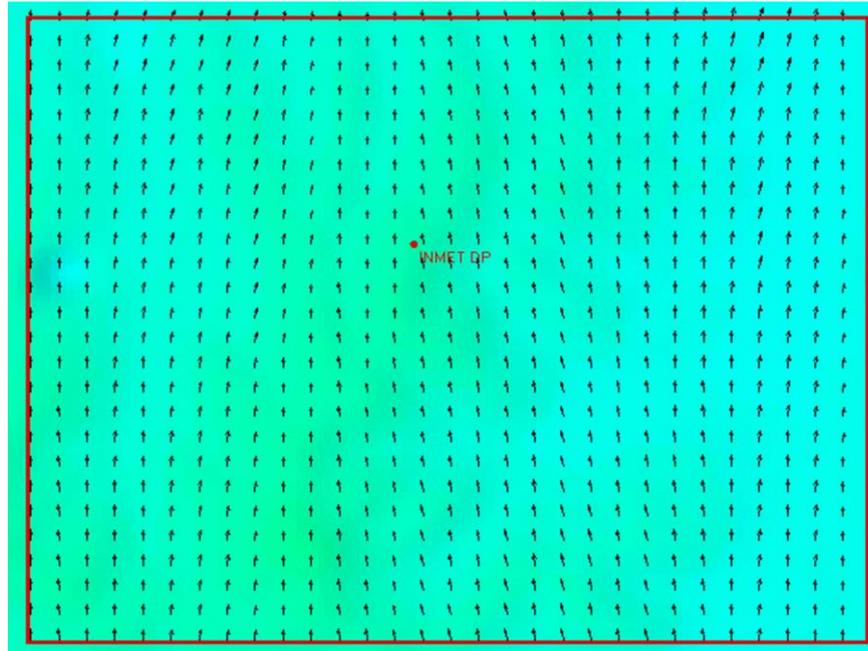


(b)

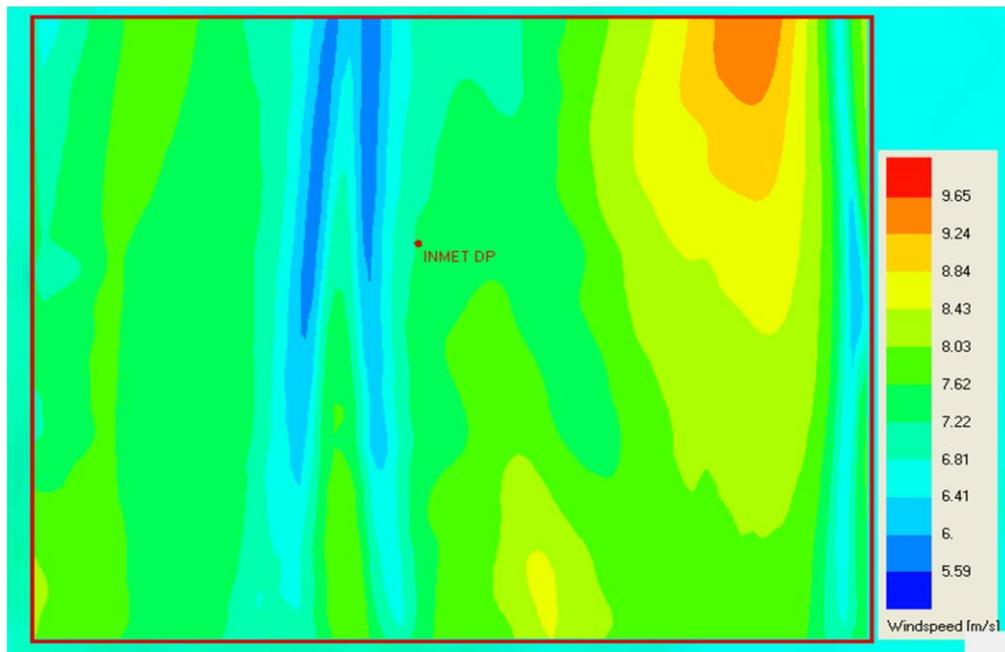
Figura3.23: Campo de velocidades do vento a 100m de altura as 9:00h. (a) Direção;

(b) Magnitude

Na figura 3.20(a) nota-se a predominância da direção sul. Enquanto na figura 3.2(b) percebe-se de maneira clara a canalização do vento, o que favorece as velocidades elevadas mostradas na região em vermelho.



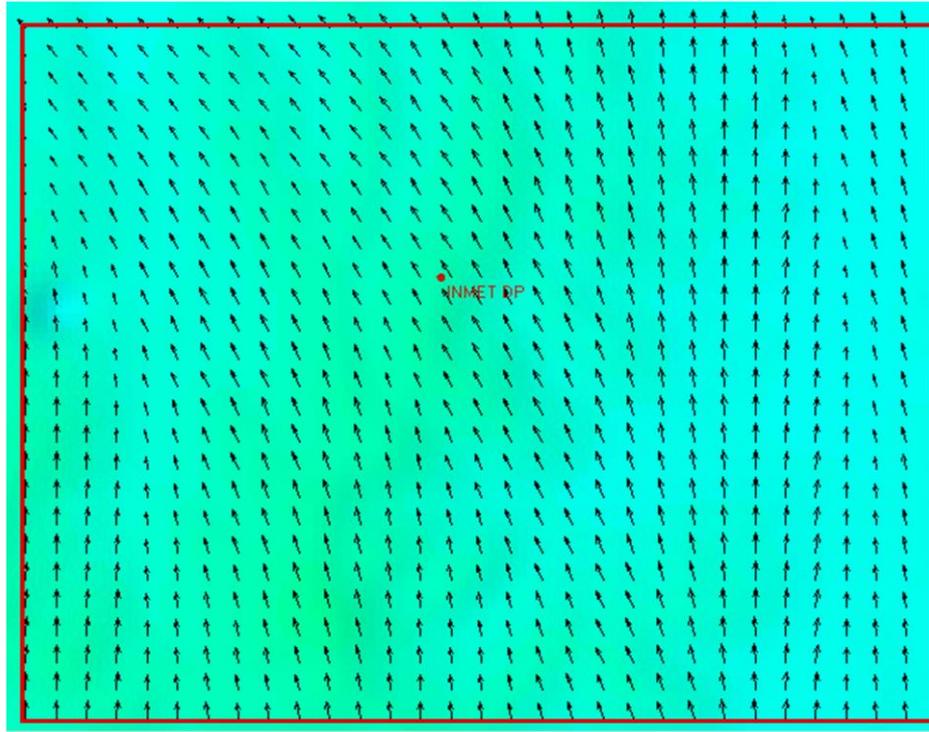
(a)



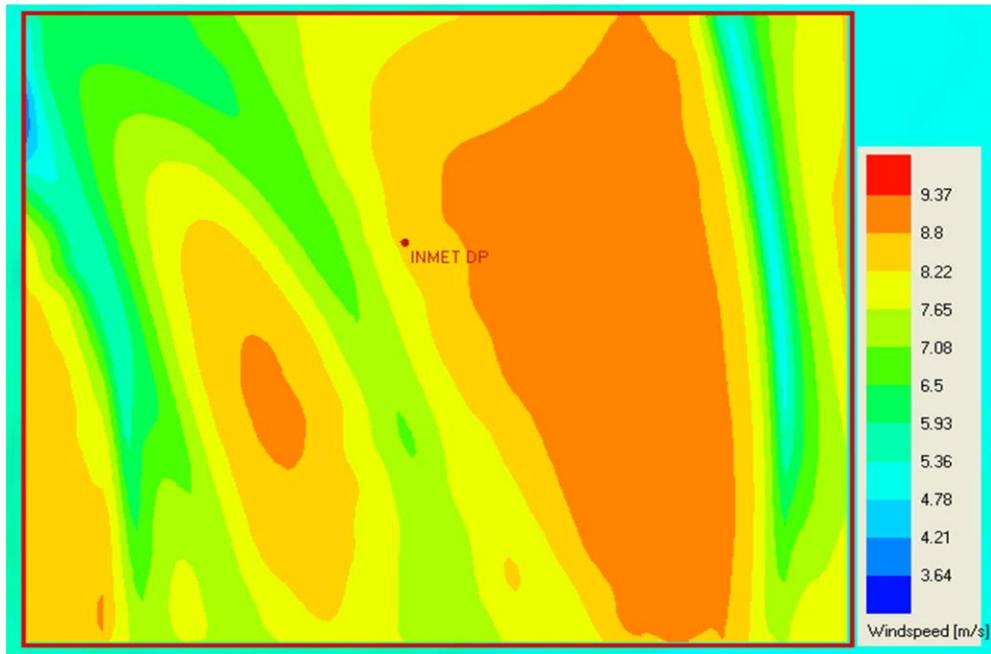
(b)

Figura3.24: Campo de velocidades do vento a 100m de altura as 12:00h. (a) Direção;
(b) Magnitude

Na figura 3.21 (a) percebe-se ainda a predominância da direção sul, com alguns pequenos desvios. Na figura 3.21(b) nota-se uma diminuição da velocidade em praticamente todo o domínio



(a)



(b)

Figura3.25: Campo de velocidades do vento a 100m de altura as 15:00h. (a) Direção;

(b)Magnitude

Na figura 3.22(a) não percebe-se uma predominância geral de direção, esta varia em diversos locais entre sul e sudeste. Na figura 3.22(b) percebe-se que embora não exista uma grande elevação nos valores de velocidade há um aumento da área com maiores velocidades.

As figuras a seguir mostram a comparação dos resultados do WRF2WindStation[®] com os dados de vento da Fazenda Guatambú.

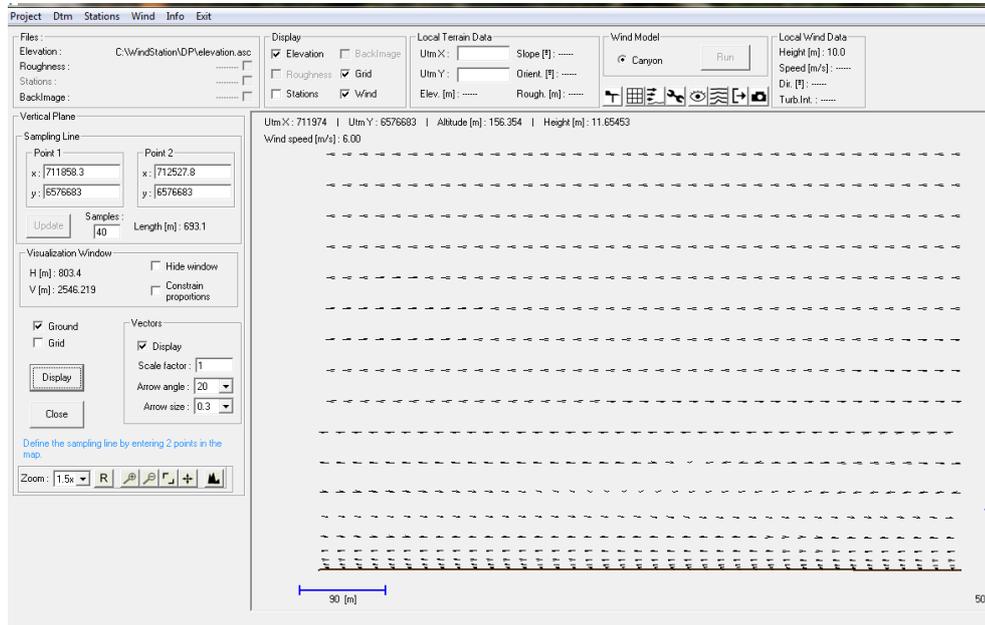


Figura 3.26: perfil vertical de velocidades resultante do WRF2WindStation as 9:00h.

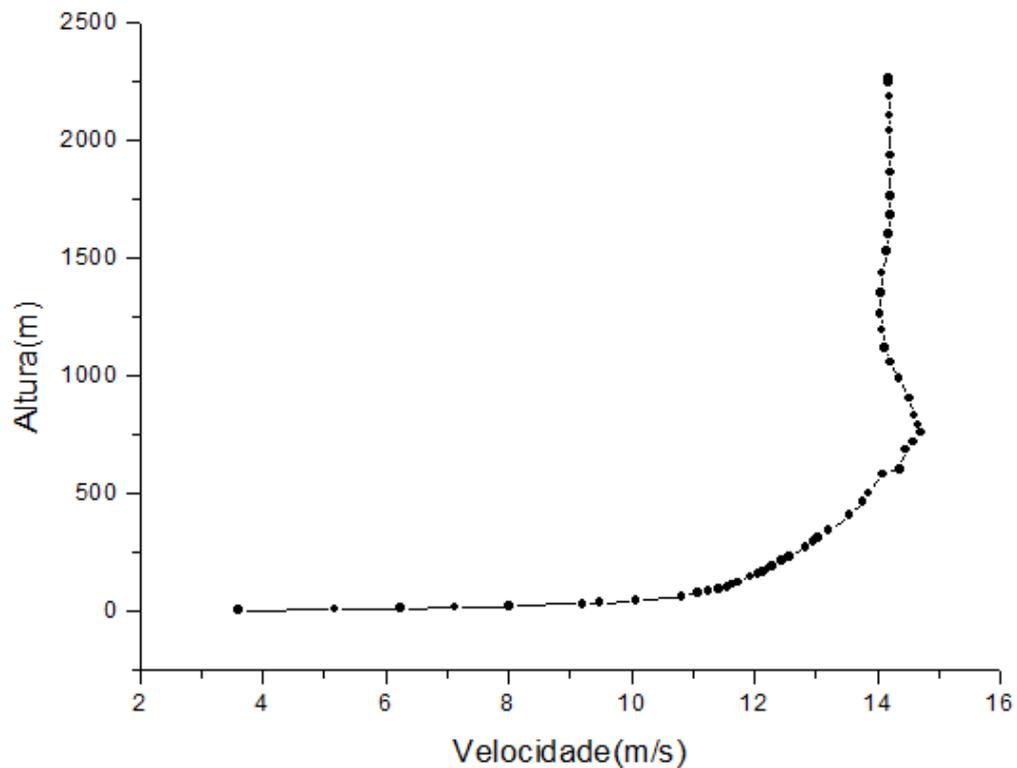


Figura 3.27: Gráfico do perfil de velocidades para as 9:00h.

Comparando-se a velocidade da figura 3.23, em uma altura de 11.65m com a velocidade a 10m mostrada na tabela 3.2, tem-se uma diferença de 2.73m/s, esse valor representa uma diferença porcentual de 31,3%.

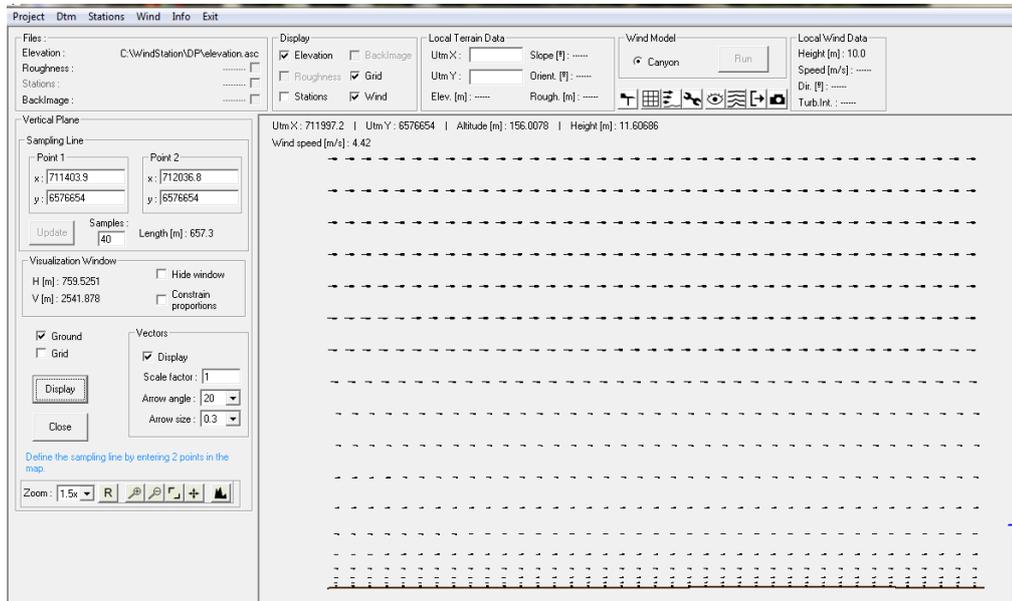


Figura 3.28: Perfil vertical de velocidades resultante do WRF2WindStation as 12:00h

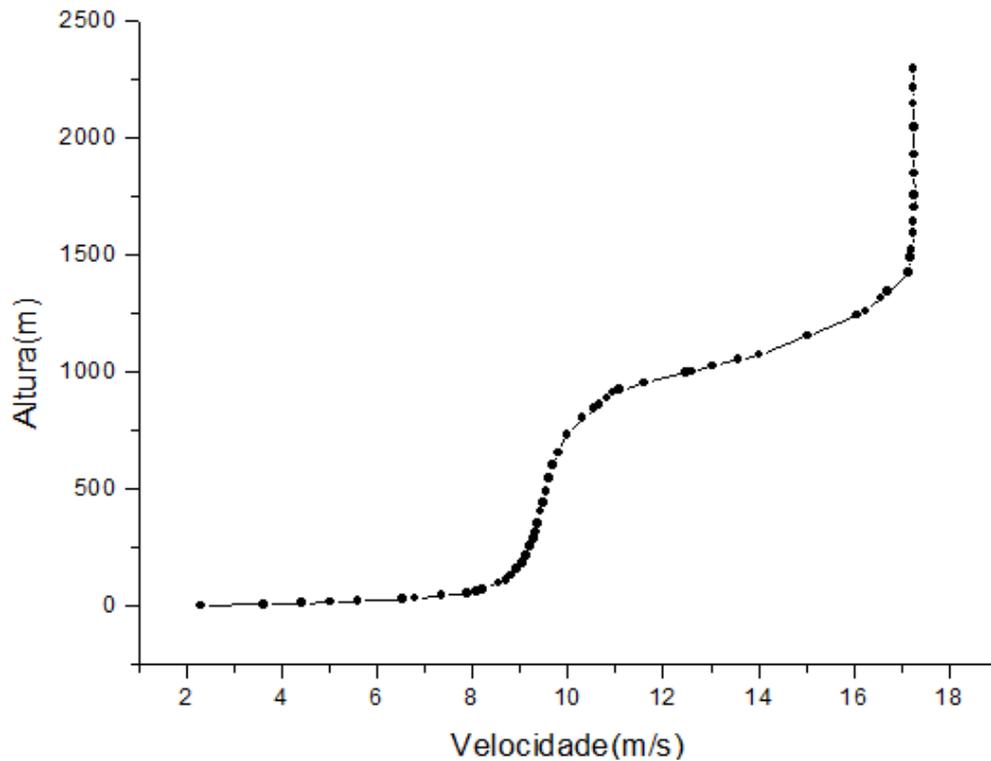


Figura 3.29: Gráfico do perfil de velocidades para as 12:00h.

Comparando-se a velocidade a 11,60m de altura com a velocidade mostrada na tabela 3.2 para as 12:00h, encontra-se uma diferença entre os dados de 5.25m/ este valor representa uma diferença de 54.3% entre os valores..

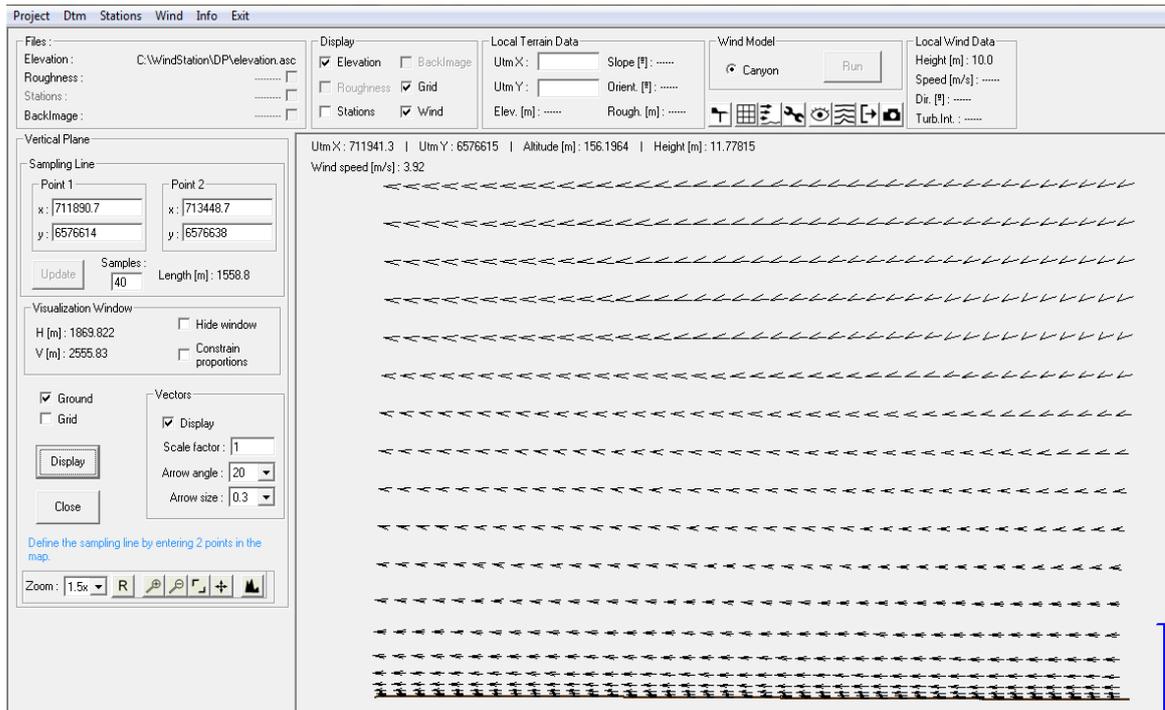


Figura 3.30: Perfil vertical de velocidades resultante do WRF2WindStation as 15:00h

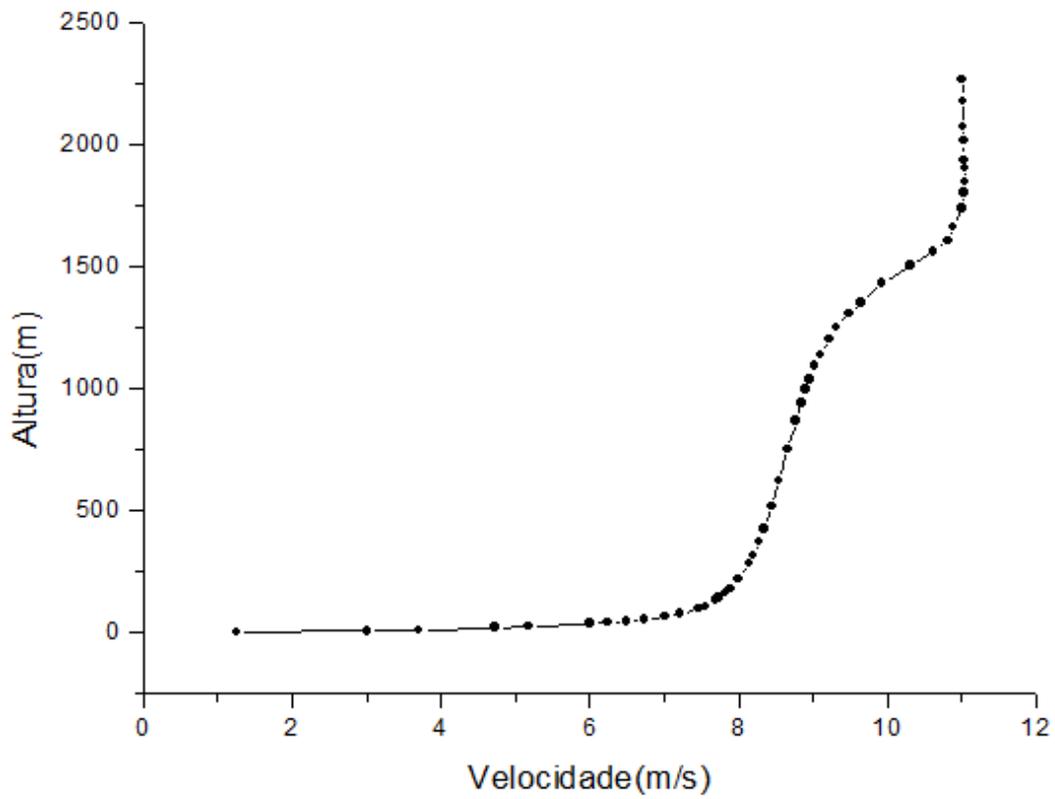


Figura 3.31: Gráfico do perfil de velocidades para as 15:00h.

Na figura 3.25 a 11.77m tem-se uma velocidade de 3.92m/s, enquanto a torre registra uma velocidade de 8.186m/s as 15:00. A diferença entre as medidas é de 4.26m/s representando uma diferença de 52,11% entre os valores.

4 CONCLUSÕES

Conforme comentado no decorrer deste trabalho o conhecimento das características do vento, e a forma como este atua na superfície são de fundamental importância para instalação de unidades geradoras de energia a partir do recurso eólico.

Com a utilização do software WindStation® é possível se ter uma boa representação da dinâmica do vento. De acordo com os resultados apresentados, e com base na comparação dos dados obtidos através do modelo e as medidas efetuadas pela torre, podemos perceber uma boa convergência dos resultados, embora para as 15:00h a diferença entre os valores tenha sido aproximadamente 2.5 m/s. Pode-se atribuir as diferenças entre os valores reais e calculados na simulação ao fato de que os valores da simulação são resultados para alturas aproximadas da altura de medição, e também aos erros propagados nos cálculos, já que para efetuar estes cálculos faz-se uso de condições de contorno.

Quanto ao WRF podemos concluir que sua utilização apresenta algumas vantagens, a principal delas é a utilização de muitos outros parâmetros meteorológicos (temperatura do solo, umidade, entre outros). Embora seja necessário considerar que em alguns casos as simulações de meso escala não representam a realidade com precisão.

Ao analisar os resultados do acoplamento dos modelos WRF e WindStation® é perceptível o afastamento entre os valores obtidos na simulação e os valores medidos. Há um significativo aumento no erro dos valores quando se combinam os modelos. Para explicar esse aumento no erro podemos propor algumas hipóteses, como por exemplo, a propagação de erros no processo de transformação dos arquivos de saída do WRF em arquivos de entrada do WindStation.

Outra possível explicação para a grande diferença entre os valores das velocidades é a proximidade do domínio de cálculo das bordas. Analisando-se a figura 3.19 podemos supor que se a região em vermelho fosse centralizada com a região em amarelo, os erros resultantes da influencia das condições de contorno nas bordas poderiam ser amortizados. Testes futuros, por exemplo, poderão revelar ou não a validade estas hipóteses.

Feita uma análise mais detalhada dos resultados obtidos com o WRF, percebe-se uma subestimação dos valores de velocidades, o que possivelmente causou a diferença entre os valores simulados e os valores reais.

Enquanto a velocidade apresentou um resultado preliminar um pouco diferente do esperado, o mesmo não pode se dizer da direção, já que esta apresentou resultados positivos no que diz respeito a influência que o terreno exerce no campo de velocidades do vento, e na maneira como os efeitos da superfície deixam de ser sentidos com o aumento da altura.

Considerando-se que o WRF utiliza dados de entrada da previsão global, e que estes dados não são para cada hora, e sim para cada três ou seis horas, os resultados apresentados pela interface são considerados favoráveis, tendo em vista a difícil previsibilidade do vento.

Os modelos foram rodados em duas máquinas, já citadas anteriormente. O tempo de simulação do WindStation® ficou em torno de 20 minutos para cada horário simulado. Já o tempo de simulação do WRF fechou em 6h 5min e 32s. Para a interface WRF2WindStation os tempos de simulação ficaram em torno de 45 minutos para cada horário simulado, considerando que estas foram rodadas no mesmo equipamento utilizado para as simulações feitas com o WindStation.

De maneira geral, pode-se dizer, que em se tratando de resultados preliminares do acoplamento dos softwares WRF e WINDSTATION, os resultados tem boa concordância no aspecto qualitativo. Como já comentado acima, devido à diferenças nos sistemas de projeção e resolução horizontal nas grades do modelo WRF (1km) e WindStation® os resultados ainda divergem um pouco no aspecto quantitativo, quando comparados com uma estação de prova, no caso a estação da Estância Guatambu, aspecto este que deverá ser resolvido com trabalhos futuros de refinamento da interface entre ambos os modelos.

REFERÊNCIAS

ALDABÓ, Ricardo. **Energia Eólica**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

BOÇON, Fernando Tadeu. **Modelagem Matemática do Ecoamento e Dispersão de Poluentes na Microescala Atmosférica**. Florianópolis, 1998.

BURTON, Tony; et al. **Handbook of Wind Energy**. Chichester: John & Sons, 2001.

CAMARGO, Arilde Sutil Gabriel de. **Análise da Operação das Usinas Eólicas de Camelinho e Palmas e Avaliação do Potencial Eólico de Localidades no Paraná**. Curitiba, 2005.

CRESESB. **Energia Eólica: Princípios e Tecnologias**. 2008. Organizado por: Ricardo Dutra

CUSTÓDIO, Ronaldo dos Santos. **Energia Eólica para Produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.

DALMAZ, Alessandro. **Estudo do Potencial Eólico e Previsão de Ventos para Geração de Eletricidade em Santa Catarina**. Florianópolis, 2007.

DORADO, Rodrigo Martins. **Modelagem da Dispersão de Contaminantes na Camada Limite Atmosférica**. Bagé, 2011.

FOX, R.W.; et al. **Introduction to Fluid Mechanics**. Sixth edition. John Wiley & Sons, Inc. 2004.

JOHNSON, Gary L. **Wind Energy Systems**. Electronic Edition. Manhattan, 2006.

LOPES, Antônio Manuel Gameiro. **WindStation® User's Manual Version 2.0.7**. 2011

MIGUEL, Adriana Rocha Ferreira. **Análise do Potencial Eólico para Geração de Energia Elétrica Usando Dados em Microescala de Estações Climatológicas de São Paulo**. Campinas, 2004.

MORAES, Marcelo Romero de. **Ferramenta Para Previsão de Vento e Dispersão de Poluentes na Microescala Atmosférica**. Florianópolis, 2004.

NCAR . MMM. **ARW Version 3 Modeling System User's Guide**. 2011

NELSON, Vaughn. **Wind Energy: Renewable Energy and the Environment**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2009.

PATEL, Mukund R. **Wind and Solar Power Systems**. New York: CRC Press,1999.

PESSANHA,J.F.M.;et al. Análise estatística de registros anemométricos e seleção de turbinas eólicas: um estudo de caso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 42., 2010, Bento Gonçalves. **Anais eletrônicos...**Disponível em: http://www.sobrapo.org.br/sbpo2010/xliisbpo_pdf/72579.pdf. Acesso em: 25 mai. 2011.

PINHEIRO, Larissa de Mendonça Gomes. **Estudo da Geração Eólico- Elétrica Levando em Consideração as Características dos Ventos, Seus Aspectos Probabilísticos e Influência do Terreno**. Fortaleza, 2009.

PROCLIRA Clima e Ambiente. **Circulação Geral da Atmosfera. Circulação Média à Superfície. Circulações Locais.** Módulo 6. 2007.

SILVA, Juliane Kayse Albuquerque da. **Caracterização do Vento e Estimativa do Potencial Eólico para a Região de Tabuleiros Costeiros (Pilar, Alagoas).** Maceió, 2007.

SKAMAROCK, William. C. **NCAR Technical Note: A Description of the Advanced Research WRF Version3.** Boulder, 2008

TERCIOTE, Ricardo. **Análise da Eficiência de um Sistema Eólico Isolado.** Campinas, 2002

TIBOLA, Gabriel. **Sistema Eólico de Pequeno Porte para Geração de Energia Elétrica com Rastreamento de Máxima Potência.** Florianópolis, 2009

http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/resultados_dou/RS2010.pdf

consultado em 28/11/2011 as 17:12

<http://www.estanciaguatambu.com.br/php/tempo.php> consultado em 10/12/2011 as 15:40