

Nº161

**AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS E MÉTODOS PARA
A ELABORAÇÃO DE MAPAS EÓLICOS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS E MÉTODOS PARA A ELABORAÇÃO DE
MAPAS EÓLICOS

BRENO DE ANDRADE LOUREIRO
RECIFE, FEVEREIRO DE 2011

MAPAS EÓLICOS
AValiação DE FERRAMENTAS E MÉTODOS PARA A ELABORAÇÃO DE

BRENO DE ANDRADE LOUREIRO

Dissertação para apresentação ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, orientada pelo Prof. Dr. Pedro André Carvalho Rosas.

Catologação na fonte

Bibliotecária Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

L892a Loureiro, Breno de Andrade.
Avaliação de ferramentas e métodos para elaboração de Mapas Eólicos. / Breno de Andrade Loureiro. - Recife: O Autor, 2011.
74f. il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Pedro André Carvalho Rosas.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2011.

Inclui Referências Bibliográficas e Apêndice.

1. Engenharia Mecânica. 2. Energia Eólica. 3. Atlas Eólico. 4. Ferramenta Computacional. 5. Extrapolação de Mediações. 6. CFD. I. Pedro André Carvalho Rosas (Orientador). II. Título.

621 CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-186/2011

“AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS E MÉTODOS PARA ELABORAÇÃO DE
MAPAS EÓLICOS.”

BRENO DE ANDRADE LOUREIRO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENERGIA EÓLICA
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. PEDRO ANDRÉ CARVALHO ROSAS
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO
CO-ORIENTADOR

Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. PEDRO ANDRÉ CARVALHO ROSAS (UFPE)

Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO (UFPE)

Prof.^a. Dr.^a. ANA ROSA MENDES PRIMO (UFPE)

Prof.^a. Dr.^a. ELIANE APARECIDA FARIA AMARAL FADIGAS (USP – PEA)

AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS E MÉTODOS PARA A ELABORAÇÃO DE MAPAS EÓLICOS

"AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS E MÉTODOS PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS EÓLICOS"

BRENO DE ANDRADE LOUREIRO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

BRENO DE ANDRADE LOUREIRO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENERGIA EÓLICA
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. PEDRO ANDRÉ CARVALHO ROSAS

Dissertação para apresentação ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, orientada pelo Prof. Dr. Pedro André Carvalho Rosas.

Prof. Dr. ALEXANDRE

CO-ORIENTADOR

Coordenador de Pós-Graduação

Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (CTG)

Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URBIO FILHO

Avaliação de ferramentas e métodos para elaboração de mapas
Bótons / Breno de Andrade Loureiro - Recife, O Autor, 2011.

141 il. figs. tabls. tabs.

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Prof. Dr. Pedro André Carvalho Rosas

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - UFPE

CTG - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFPE
Prof. Dr. PEDRO ANDRÉ CARVALHO ROSAS

Faculdade de Engenharia de Arquitetura e Urbanismo

I - Engenharia Mecânica - UFPE

4 - Ferramentas Computacionais para a Elaboração de Mapas Eólicos
CTG - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFPE
Prof. Dr. ANA ROSA MENDES (UFPE)

UFPE/RECIFE-PE
brenoloureiro@gmail.com
FEV/2011

Prof. Dr. ANA ROSA MENDES (UFPE)

Prof. Dr. ELIANE APARECIDA FARIAS AMARAL FADIGAS (USP - PE)

“There are two great unexplained mysteries in our understanding of the universe. One is the nature of a unified generalized theory to explain both gravity and electromagnetism. The other is an understanding of the nature of turbulence. After I die, I expect God to clarify the general field theory to me. I have no such hope for turbulence.”

- von Karman

AGRADECIMENTOS

Ao meu filho Ícaro e minha esposa Katarina, pelo total apoio, compreensão e ajuda nos momentos que precisei me dedicar a este trabalho. Aos meus pais, Márcia e Gilvan, que sempre me incentivaram e investiram nos meus estudos. À minha irmã Mirella e minha recém chegada sobrinha Julia, que com seu primo Ícaro trouxeram uma imensa felicidade para a família.

Ao meu orientador Prof. Dr. Pedro Rosas cujo apoio incondicional foi imprescindível tanto para meu crescimento acadêmico quanto profissional. Ao meu co-orientador Prof. Alex Araújo e a todos que pertence ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco. A minha amiga Caarem e a Aeroespacial por ter cedido os softwares e dados para utilização neste trabalho. Aos meus colegas de turma Daniel e Oyama, que sempre estavam dispostos a ajudar.

Por fim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para que eu pudesse realizar esta conquista.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação de ferramentas e métodos para elaboração de mapas eólicos aplicados a projetos de centrais eólicas. Os mapas eólicos têm como função a determinação do potencial eólico local e servem de base para a locação de turbinas eólicas. Os modelos estudados estão implementados em ferramentas amplamente utilizadas no meio eólico: WAsP e o WindSim. Essas ferramentas apresentam parâmetros de entrada padrão que quando não ajustados podem resultar em extrapolações errôneas, visto a não representação correta do ambiente estudado. Para o estudo foi utilizado um ano de dados de intensidade e direção do vento provenientes da campanha de medição de duas torres anemométricas, com medições em três níveis de altura (20, 50 e 78 metros), localizadas numa região de complexidade topográfica moderada no interior da Paraíba - Brasil.

Na primeira análise a comparação é realizada entre os valores calculados através de extrapolações das medições nas torres e os valores medidos nas torres, sem alterar os parâmetros padrão das ferramentas. Nesta análise, o modelo CFD do WindSim apresentou desvio médio quadrático de 2,18%, enquanto o modelo WAsP apresentou desvio médio quadrático de 10,21%, quando comparado com as medições nas torres.

Na segunda análise os parâmetros de entrada do WAsP foram corrigidos para que fossem mais representativos para a atmosfera local, com ênfase para o parâmetro que representa a estabilidade atmosférica. A estabilidade atmosférica foi modelada através do gradiente vertical de temperatura medido na região estudada, com medições de temperatura em dois níveis de altura. Com esse ajuste o desvio médio quadrático do WAsP para a segunda análise diminuiu para 6,80%.

Na terceira análise foram comparados todos os pontos dos mapas eólicos gerados pelo WAsP e pelo WindSim para área de interesse. Neste caso, verificou-se sobre estimativas na velocidade do vento de até 21% do mapa eólico WAsP em relação ao WindSim e sub estimativas de até 23%.

Palavras chave: Energia eólica, atlas eólicos, ferramenta computacional, extrapolação de medições, CFD.

ABSTRACT

This study evaluates the wind resource modeling capabilities of tools and models for elaboration of wind resource maps for wind energy applications, and it's a base for micro-siting purposes. The evaluation has been carried out with a WindSim (CFD) model and the conventional WAsP model, both well known tools used for wind energy calculations purposes. These models have standard input parameters that can output wrong results when not adjusted to represent correctly the local atmosphere conditions. One year of wind data was used to perform this study, this wind data was obtained from a wind measurement campaign made with two met towers, both with three measurement levels of wind speed and direction (20, 30 and 78 meters). The analysis was done in upstate of Paraíba - Brazil, in a region of moderate complex terrain. The first analysis presents a comparison between the models, without tuning the standard input parameters. In this analysis, the CFD model (WindSim) presented a root mean square deviation against the actual measurements of 2,18%, while the WAsP model presented a root mean square deviation of 10,21%.

In the second analysis, a tuning was performed in the WAsP model parameters, especially the surface heat flux parameter that was tuned with actual measurements of temperature in two different heights of a met tower. After this, the root mean square deviation becomes 6,80% for the WAsP model when compare against the actual measurements.

The third analysis was done by comparison of every point calculated in the whole wind resource maps generated by WindSim and WAsP. This was a purely comparative analysis of WAsP and WindSim wind resource maps, and it presented over estimations up to 21% of the WAsP resource map against WindSim for some areas, and some under estimation down to 23% for particular areas.

Keywords: Wind energy, wind atlas, computation tools, wind analysis, CFD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Atlas eólico do nordeste brasileiro.	14
Figura 2 - Concentração de empreendimentos eólicos no Rio Grande do Norte.	15
Figura 3 – Parâmetros dimensionais para definição de relevo simples, adaptado de (SILVA, 2006).	20
Figura 4 - Fluxo de vento em falésias adaptado de (SILVA, 2006).	22
Figura 5 - Fluxo de vento em chapadas adaptado de (SILVA, 2006).	22
Figura 6 - Fluxo de vento sobre uma colina adaptado de (SILVA, 2006).	23
Figura 7 – Definição de comprimento de rugosidade.	23
Figura 8 - Bolha de ar movendo-se verticalmente em uma atmosfera não saturada adaptado de (VALENÇA, 2010).	25
Figura 9 - Os estados da atmosfera: (a) neutra; (b) estável; e (c) instável, adaptado de (ROHATGI, 1994).	26
Figura 10 – Estrutura da camada limite atmosférica, adaptado de (ROEDEL, 2000).	27
Figura 11 – Cálculos dos campos eólicos do modelo WAsP.	31
Figura 12 – Modelo de extrapolação WAsP.	32
Figura 13 – Malha WindSim.	35
Figura 14 – Consideração do modelo WAsP de um fluido sobre uma colina (esquerda) e uma representação mais real de como é a característica de um fluido sobre uma colina.	35
Figura 15 – Localização relativa e distância entre as torres da região estudada.	38
Figura 16 – Mapa de inclinação da região estudada.	41
Figura 17 – Imagens para caracterização da rugosidade na região estudada.	42
Figura 18 - Perfis verticais da torre 1 calculados através do WAsP com parâmetros padrão e medida fixada em 50 m, eixo x [m/s] e eixo y [m].	45
Figura 19 - Perfil vertical calculado pelo WAsP com parâmetros padrão em relação às medições diurnas representadas pelo perfil logarítmico e lei da potência eixo x [m/s] e eixo y [m].	46
Figura 20 – Perfil vertical WAsP para atmosfera neutra em comparação com medições diurnas, eixo x [m/s] e eixo y [m].	47
Figura 21 – Perfis verticais calculados e medidos após ajustes dos padrões do modelo, eixo x [m/s] e eixo y [m].	48
Figura 22 – Ajuste dos parâmetros padrão de altura e rugosidade.	48
Figura 23 – Esquemático das medições a 50 metros da torre 1 sendo extrapoladas para os níveis de 20, 50 e 78 metros da torre 2.	51
Figura 24 – Desvios em relação à medição para transferência climatológica da torre 1 para torre 2.	52
Figura 25 – Desvios em relação à medição para transferência climatológica da torre 2 para torre 1.	53
Figura 26 - Perfil vertical das medições na torre 1, utilizando medições a 20 metros.	54
Figura 27 - Perfil vertical na torre 1, utilizando medições a 50 metros.	55
Figura 28 - Perfil vertical na torre 1, utilizando medições a 78 m.	56
Figura 29 – Desvios em relação à medição para transferência climatológica da torre 1 para torre 2.	58
Figura 30 – Desvios em relação à medição para transferência climatológica da torre 2 para torre 1.	59

Figura 31 – Mapa eólico WAsP.	61
Figura 32 – Mapa eólico WindSim.	62
Figura 33 – Comparação mapas eólicos WindSim x WAsP.	63
Figura 34 – Comparação mapas eólicos WindSim x WAsP (esquerda) e mapa de inclinações (direita) com áreas dos maiores desvios ressaltadas.	63
Figura 35– Dimensões típicas de uma torre anemométrica treliçada triangular.	70
Figura 36 – Disposição ideal de hastes em regiões com ventos fortemente unidirecionais com linhas de influência da torre.	71
Figura 37 – Sensor de Vento - Anemômetro NRG #40.	72
Figura 38 – Sensor de direção - Anemoscópio NRG #200P.	72
Figura 39 – Sensor de temperatura – Termômetro NRG #110S.	73
Figura 40 - Sensor de pressão – Barômetro NRG #BP20.	73
Figura 41 - Data logger SymphoniePLUS.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de empreendimentos eólicos, adaptado de (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2011)	13
Tabela 2 – Valores típicos dos comprimentos característico de rugosidade de superfícies, adaptado de (Rohatgi, 1994).	24
Tabela 3 – Valores típicos dos comprimentos característico de rugosidade de superfícies, adaptado de (ESDU, 1993).	24
Tabela 4 - Correlação entre a classificação da estabilidade atmosférica de Pasquill e o gradiente vertical de temperatura, adaptado de (MOREIRA, TIRABASSI e MARCELO, 2008).	26
Tabela 5 – Rugosidades da área estudada.	42
Tabela 6 – Estabilidade atmosférica da região considerando médias mensais.	44
Tabela 7 – Estabilidade atmosférica da região considerando médias horárias.	44
Tabela 8 – Desvios em relação à medição para transferência climatológica da torre 1 para torre 2.	52
Tabela 9 - Desvios em relação à medição para transferência climatológicas da torre 2 para torre 1.	53
Tabela 10 – Desvios em relação as medições.	54
Tabela 11 - Desvios em relação as medições	55
Tabela 12 - Desvios em relação as medições.	56
Tabela 13 – Desvios após ajustes parâmetros do modelo WAsP da torre 1 para torre 2.	57
Tabela 14 - Desvios após ajustes dos parâmetros do modelo WAsP da torre 2 para torre 1.	58
Tabela 15 – Nível das análises.	65

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	x
Sumário	xi
1 Introdução	13
1.1 Justificativa do trabalho	16
1.2 Objetivos do trabalho	18
1.3 Estrutura da dissertação	18
2 Revisão bibliográfica	20
2.1 Topografia	20
2.1.1 Relevo simples	20
2.1.2 Relevo complexo	21
2.1.2.1 Terrenos não planos	21
2.1.2.2 Terrenos planos com elevação íngremes	21
2.1.2.3 Colina	22
2.2 Rugosidade	23
2.3 Estabilidade atmosférica	25
2.4 O vento	26
2.4.1 Camada Limite Atmosférica (CLA)	26
2.4.2 Vento geostrófico	28
2.5 Campanha de medição	28
2.6 Extrapolação Vertical	29
2.6.1 Perfil exponencial	29
2.6.2 Perfil logarítmico	29
2.7 WAsP	30
2.8 WindSim	33
2.9 Comparações WAsP X WindSim	35
3 Metodologia	38
3.1 Dados de vento	38
3.1.1 Torre 1	39
3.1.2 Torre 2	39
3.1.3 Torre 3	40
3.1.4 Análise, seleção e tratamento dos dados de vento	40
3.2 Modelagem do terreno	40
3.2.1 Topografia	40
3.2.2 Rugosidade	42
3.3 WAsP	43
3.3.1 Ferramenta <i>cross predict</i>	43
3.3.2 Ajuste dos parâmetros WAsP	43
3.3.2.1 Estabilidade atmosférica	45
3.3.2.2 Parâmetros de altura e rugosidade	48
3.3.3 Mapa eólico WAsP	49
3.4 WindSim	49

3.4.1	Ferramenta <i>transfer climatology</i>	49
3.4.2	Mapa eólico WindSim	49
4	Resultados e análises	51
4.1	Estimativas cruzadas entre as torres	51
4.1.1	Estudo com parâmetros padrão	51
4.1.2	WAsP	53
4.1.3	Estudo com ajuste de parâmetros	57
4.1.4	Resultados WindSim	59
4.2	Mapas Eólicos	61
4.2.1	WAsP	61
4.2.2	WindSim	62
4.2.3	Comparação WAsP x WindSim	62
5	Conclusões e recomendações	65
	Referências bibliográficas	67
	APÊNDICE A– Instrumentos da campanha de medição	70
a	Torre	70
b	Hastes	70
c	Sensores	71
	i Anemômetro	71
	ii Anemoscópio	72
	iii Sensor de Temperatura	73
	iv Sensor de Pressão	73
d	Dados	73
e	Núcleo de armazenamento e processamento	74

1 INTRODUÇÃO

Juntamente com os aproximados 1.400 MW contratados pelo PROINFA foram contratados mais aproximados 1.800 MW no leilão de 2009 e mais 2.000 MW no leilão realizado em 2010. No início de 2011 já existe o edital de um novo leilão para este ano.

Observa-se na Tabela 1 a quantidade de empreendimentos eólicos existentes no Brasil em suas diferentes etapas, em Fevereiro de 2011.

Tabela 1 - Dados de empreendimentos eólicos, adaptado de (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2011)

Situação do empreendimento	Em operação	Em construção	Construção não iniciada
Quantidade	51	18	87
Potência [MW]	937	501	3.005
Porcentagem em relação a todas outras fontes geradoras [%]	0,82	3,35	9,37

Estima-se que o Brasil encerre o ano de 2011 com aproximados 1.400 MW de centrais em operação, chegando em 3.200 MW no final de 2012 e 5.250 MW no final de 2013, o que seria equivalente a cinco vezes a capacidade instalada atual.

O projeto de uma central eólica é realizado em diversas etapas. Inicialmente deve-se escolher o lugar da provável implantação da central. Uma forma prática de escolher uma região com provável bom potencial eólico é através dos atlas eólicos, como o apresentado pela Figura 1. Já existem atlas eólicos a nível nacional e estadual. Porém alguns estados brasileiros ainda carecem deste tipo de estudo.

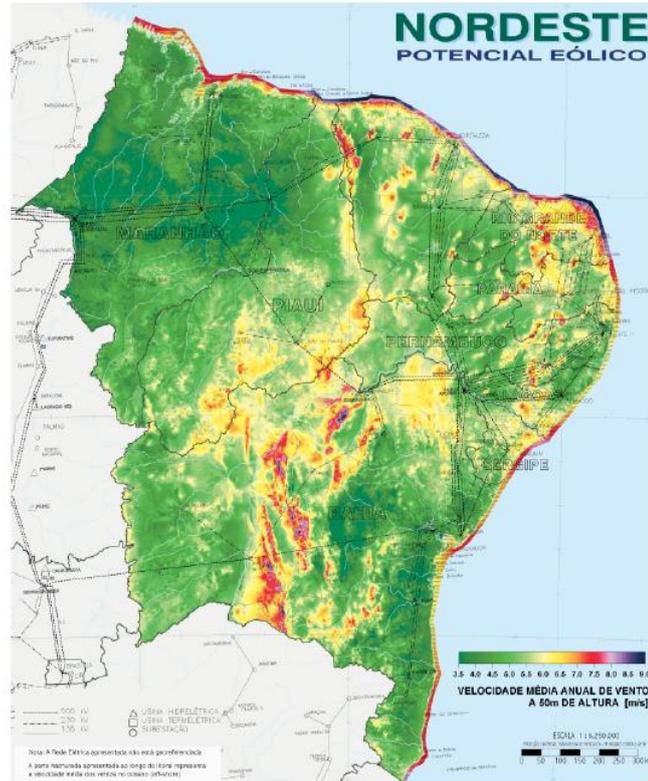


Figura 1 - Atlas eólico do nordeste brasileiro.

Logo, grande parte dos primeiros empreendimentos eólicos aprovados nos leilões de 2009 e 2010 foram alocados na região onde os primeiros atlas indicavam grande potencial eólico. Isso criou um acúmulo de projetos em algumas regiões, como em João Câmara no Rio Grande do Norte, cuja quantidade de projetos aprovados nos últimos leilões podem ser verificada na parte inferior da Figura 2.

Essa concentração deve-se à tendência dos primeiros empreendimentos em ocuparem regiões com grandes e conhecidos potenciais eólicos indicados nos atlas eólicos. Porém, com o aumento dos empreendimentos nessas regiões, vários fatores começam a dificultar a instalação de novos projetos, como o preço das terras, que subiu exponencialmente, a dificuldade de despachar a energia gerada, perdas aerodinâmicas devido a projetos já existentes e as restrições da Agência Nacional de Energia Elétrica em relação a distâncias mínimas entre Usinas Eólio-Elétricas.



Figura 2 - Concentração de empreendimentos eólicos no Rio Grande do Norte.

Portanto, verifica-se a necessidade de mapas eólicos mais precisos, que indiquem outras regiões com provável forte potencial de vento e que devido a resoluções espaciais e falta de medições não podem ser identificados através de mapas eólicos de grandes escalas.

Outra vantagem da descentralização de centrais eólicas é a diminuição na variabilidade do recurso, visto que períodos de calmaria em alguma região específica seriam contra-balanceados com bons ventos em outras regiões.

Visando a adequação tecnológica e regulação do mercado são criadas normas e resoluções que devem ser seguidas para cadastramento de projetos eólicos, entre elas pode-se citar a Resolução Normativa N°391, de 15 de dezembro de 2009 criada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2009). Um importante ato dessa resolução é o estabelecimento de um período mínimo de medição de vento de três anos, para projetos eólicos iniciados a partir de 2011.

Essas medidas visam diminuir incertezas nos cálculos dos recursos eólicos e energéticos para uma determinada área de interesse. Devido a grande variabilidade temporal e espacial do recurso eólico e sua difícil estimativa. Outra fonte de grandes incertezas são os cálculos de mapas eólicos locais através de modelos, que podem ser realizados por de diferentes ferramentas.

Os atlas eólicos nacionais e estaduais são considerados de larga-escala, porém existem também os mapas eólicos de micro-escala, ou locais, com escala espacial entre 1 metro até 2 quilômetros, que são de extrema importância para um projeto eólico, eles servem tanto para avaliar preliminarmente o potencial de uma área como também auxiliam na escolha do local

de instalação dos aerogeradores, ajudando a escolher pontos onde o equilíbrio entre maior geração de energia e esforços mecânicos nas máquinas sejam ótimos.

Logo, verifica-se a necessidade de gerar mapas eólicos de micro-escala confiáveis, para uma boa otimização de layout (disposição dos aerogeradores no terreno) e diminuição de esforços mecânicos nos aerogeradores a serem instalados.

Os resultados do mal posicionamento de uma turbina eólica podem ser comprometedores. A alocação em um lugar singular do terreno cuja forma induza a uma pequena intensidade de vento neste ponto, fará com que a máquina produza menos energia em relação às máquinas de todo parque. Somando-se as perdas típicas existentes, como perdas aerodinâmicas internas e externas, perdas elétricas, perdas por indisponibilidade da rede e degradação das pás, a geração de energia líquida real deste aerogerador será muito menor que a geração estimada.

Nem todos os modelos existentes são capazes de gerar campos eólicos com precisão para todo tipo de terreno. Como exemplo pode ser citado o modelo utilizado pelo WAsP, que não deve ser utilizado em terrenos com grandes inclinações, onde podem haver descolamento do fluido, devido a incapacidade desse modelo de representar tal situação.

Para o caso de terrenos complexos (com grandes inclinações) o método mais preciso é através de estudos de fluido-dinâmica computacional (CFD) que conseguem modelar com maior fidelidade esse tipo de situação.

O presente estudo foi realizado numa região do interior da Paraíba com topografia moderadamente complexa e rugosidade simples. Por motivos comerciais não serão expostos dados que possam ferir o acordo de confidencialidade firmado com o empreendimento eólico analisado.

1.1 Justificativa do trabalho

O projeto de um parque eólico é composto de uma série de fases, entre elas:

- Prospecção de terrenos e arrendamento de terras;
- Aquisição das licenças ambientais;
- Campanha de medição com torres anemométricas;
- Escolha dos melhores pontos para instalação dos aerogeradores na área disponível para desenvolvimento do projeto;

- Estimativa da produção anual de energia (PAE);
- Estudo de viabilidade técnico-econômica;
- Execução do projeto;
- Operação e manutenção da usina eólica.

Após a campanha de medição já é possível, através dos dados tratados e validados de vento provenientes das torres anemométricas, gerar mapas locais do potencial eólico para a área a ser avaliada.

Os mapas eólicos de pequena escala têm como função a determinação dos potenciais eólicos locais, e servem de base para a estimativa da produção anual de energia assim como para auxílio no micrositing (alocação dos aerogeradores na área disponível para desenvolvimento do projeto) dos aerogeradores.

Os modelos utilizados, como por exemplo pelo software WAsP, apresentam diversas limitações e variáveis das quais, quando mal interpretadas, podem fornecer resultados não representativos para a área em estudo.

Podem haver sérios erros nas estimativas dos campos eólicos, erros esses que podem provocar grandes perdas em um projeto. Por exemplo, se a máquina for alocada em um ponto que seria esperado grande potencial eólico, mas por efeitos locais que não foram simulados corretamente pelo modelo esse ponto apresenta fraca intensidade de vento. Logo, o aerogerador alocado nesse ponto apresentará baixo desempenho.

Outra falha grave é alocar aerogeradores em pontos cujas características não obedecem os limites mecânicos da máquina, conseqüentemente diminuindo sua vida útil.

Atualmente existem diversas ferramentas para modelagem eólica, como WAsP, WindPRO, WindFarmer, WindSIM, MeteoDyn e WAsP Engineering. Todos têm suas limitações e vantagens. Estudos comparativos dos métodos empregados por essas ferramentas podem ser encontrados em (PEREIRA, GUEDES e SANTOS, 2010), (WALLBANK, 2008), (ALBRECHT e KLESITZ, 2006), (BERGE e GRAVDHAL, 2006), (EMD, 2007) e (THEODOROPOULOS e DELIGIORGIS, 2010).

A maioria dos estudos para validação desses métodos utiliza dados de empreendimentos eólicos existentes, logo, não há necessariamente torres de medição em todos os lugares ideais para validação dos campos eólicos.

Vários estudos já apresentaram as tendências e os desvios dos campos eólicos gerados provenientes desses métodos através da comparação com medições em campo. Porém várias regiões do mundo ainda sofrem com a falta de conhecimento do comportamento desses

modelos para condições locais. Por isso é importante haver mais estudo em regiões diferentes das que foram consideradas para aplicação desses métodos.

1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é verificar o desempenho dos métodos utilizados para geração de mapas eólicos de ferramentas amplamente utilizadas na área eólica, neste caso o WASP e o WindSim. Mostrando o desempenho de cada um deles nas estimativas verticais em relação à medições realizadas na área estudada e estimativa horizontais através da comparação entre os softwares e entre estudos realizados nesse contexto.

Também cabe a esse estudo demonstrar o comportamento do WASP e do WindSim nas condições climáticas da atmosfera de um ponto específico do nordeste brasileiro através da utilização de dados de campo confiáveis.

Serão analisados os erros provenientes dos métodos empregados e da utilização dos softwares com seus envelopes padrão, sem ajustes para caracterizar a atmosfera estudada. Assim como serão mostrados os ajustes necessários nos parâmetros padrões do WASP para melhorar o desempenho do modelo, ajustando no modelo as características atmosféricas da área em questão. Nesse contexto será exibido o estudo da estabilidade atmosférica no local através de medições direta em diferentes níveis de altura de uma torre anemométrica.

Como objetivos específicos podemos citar:

- Verificar os desvios na estimativa vertical;
- Verificar os desvios na estimativa horizontal;
- Verificar os desvios na estimativa horizontal em áreas onde há descolamento de fluidos (terrenos complexos);
- Validação da metodologia empregada pelos softwares em estudo.

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho está dividido em 5 capítulos.

O capítulo 1 apresenta uma breve introdução da situação atual dos empreendimentos eólicos no país, discorre sobre novas resoluções e a importância da geração de mapas eólicos precisos. Descreve também justificativas e objetivos do trabalho.

O capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica, onde são apresentados os conceitos deste trabalho através da referência a outras fontes bibliográficas.

O capítulo 3 apresenta a metodologia empregada para o estudo comparativo dos modelos, além disso, descreve quais as considerações tomadas para os casos estudados e especifica como foram obtidos os dados locais.

O capítulo 4 apresenta os resultados e mostra a análise realizada para verificação e validação dos resultados através da comparação com medições realizadas em campo.

O capítulo 5 apresenta as conclusões principais do estudo e recomenda futuros estudos baseado nas necessidades verificadas no decorrer do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Topografia

O correto levantamento da topografia garante um estudo dos recursos eólicos com maior precisão. Uma das maiores fontes de erro na estimativa de recursos eólicos é a modelagem da topografia.

Elementos topográficos como morros, dunas, colinas e penhascos afetam o gradiente vertical do vento. A definição dos limites e resolução do mapa topográfico a ser utilizado na análise é muito subjetiva e depende fundamentalmente da complexidade da região de interesse (SILVA, 2006).

De acordo com o texto de melhores práticas do WAsP (RISO, 2010) para modelagem de recursos eólicos é exigido pelo menos 10 km de informações topográficas a partir de qualquer ponto no terreno onde se deseja estimar os recursos.

2.1.1 Relevo simples

Um relevo pode ser considerado simples quando não há alterações abruptas de altitude e apresenta baixas e suaves inclinações. Os cálculos de um mapa eólico para relevo simples são menos exigentes que os cálculos para relevo complexo. Segundo (FROST, 1979), uma área é classificada como relevo simples quando:

$$\frac{h}{L} \leq 0,02 \quad (1)$$

onde,

h é a altura do relevo com maior elevação do terreno.

L é a largura do relevo com maior elevação do terreno.

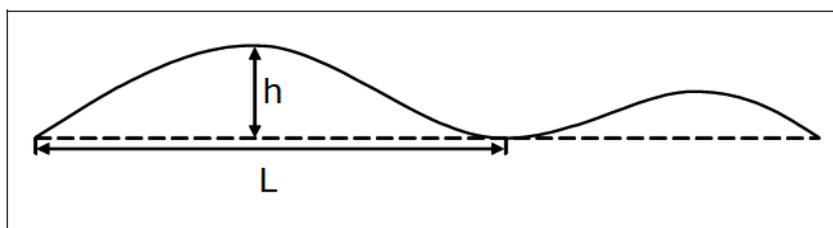


Figura 3 – Parâmetros dimensionais para definição de relevo simples, adaptado de (SILVA, 2006).

Outra forma de verificar a classificação do relevo visando a escolha do melhor método a se utilizar para cálculos dos recursos eólicos é através do cálculo das inclinações presentes no terreno.

As inclinações do terreno derivam diretamente da topografia definida para área. Pontos com inclinações maiores que $5,4^\circ$ são inadequados para alocação da maioria dos aerogeradores comercializados atualmente e regiões com inclinações maiores de 17° devem ter seus recursos eólicos calculados com cautela, preferivelmente através de modelos CFD, devido ao descolamento do fluido induzido por tais inclinações e a capacidade desse modelo de representar tal situação.

2.1.2 Relevo complexo

Terrenos complexos devem ser tratados com maior cautela principalmente na alocação de turbinas eólicas. A topografia está diretamente ligada com aceleração ou desaceleração do vento. Uma dificuldade encontrada para realizar a alocação de aerogeradores em um terreno complexo é conseguir equilibrar a escolha de áreas com bom potencial eólico e minimizar esforços nas turbinas porque nessas áreas a intensidade de turbulência tende a ser maior, causando esforços extras nas turbinas.

2.1.2.1 Terrenos não planos

Terrenos não planos podem ser classificados em isolados ou montanhosos. O primeiro se refere a elevações ou depressões isoladas em um terreno predominantemente plano. E o segundo trata-se de várias elevações e depressões, no qual o fluxo de vento vai depender não só de uma característica do terreno, mas de todo o conjunto, somando-se todos os efeitos topográficos (SILVA, 2006).

2.1.2.2 Terrenos planos com elevação íngremes

Existem dois tipos de elevações íngremes: (i) Elevação íngreme e plana na superfície superior, chamada de falésia e (ii) Elevação íngreme, plana na superfície superior e um

declive também íngreme logo após, que pode ser chamado de chapada. A falésia pode ser aproximada, para efeito de cálculos e simulações, a um degrau de escada, possuindo uma certa inclinação. O padrão geral do fluxo do vento na superfície de falésias pode ser visto na Figura 4, (SILVA, 2006).

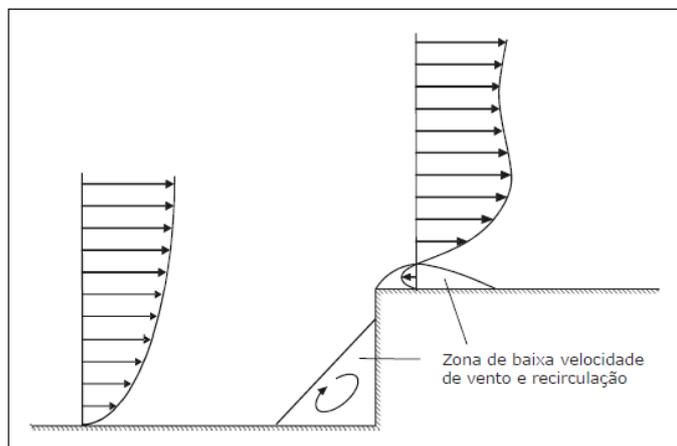


Figura 4 - Fluxo de vento em falésias adaptado de (SILVA, 2006).

A chapada pode ser representada como um grande bloco de pequena largura. O fluxo do vento neste tipo de superfície é semelhante ao fluxo do vento em falésias, acrescentando mais uma zona de recirculação e baixa velocidade de vento a jusante da elevação, apresentado na Figura 5.

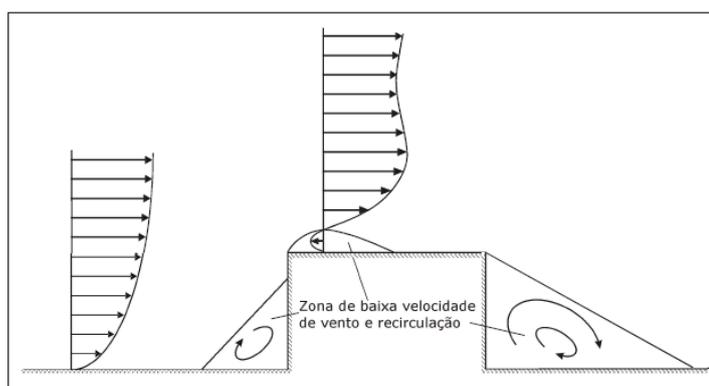


Figura 5 - Fluxo de vento em chapadas adaptado de (SILVA, 2006).

2.1.2.3 Colina

A Figura 6 apresenta o fluxo do vento passando por uma colina. Pode-se perceber que logo acima da colina as linhas de fluxo estão mais próximas, caracterizando um aumento na velocidade do vento naquele ponto. A montante e a jusante da colina formam-se vórtices que

caracterizam a turbulência do vento e a diminuição da velocidade naqueles pontos (SILVA, 2006).

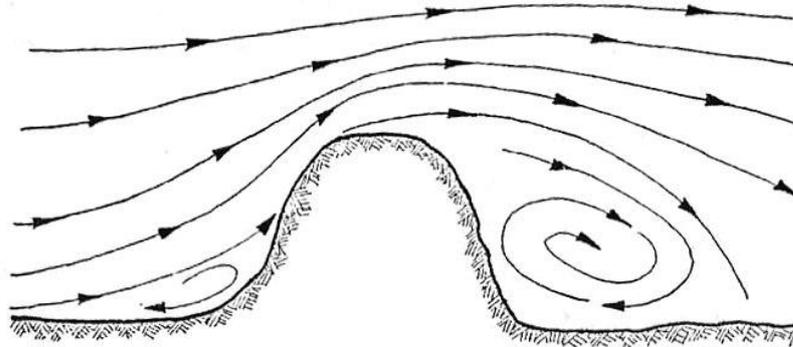


Figura 6 - Fluxo de vento sobre uma colina adaptado de (SILVA, 2006).

2.2 Rugosidade

As características da superfície podem ser definidas a partir do comprimento de rugosidade, Z_0 . Por definição, Z_0 é a altura da região adjacente ao solo onde a velocidade do vento é nula.

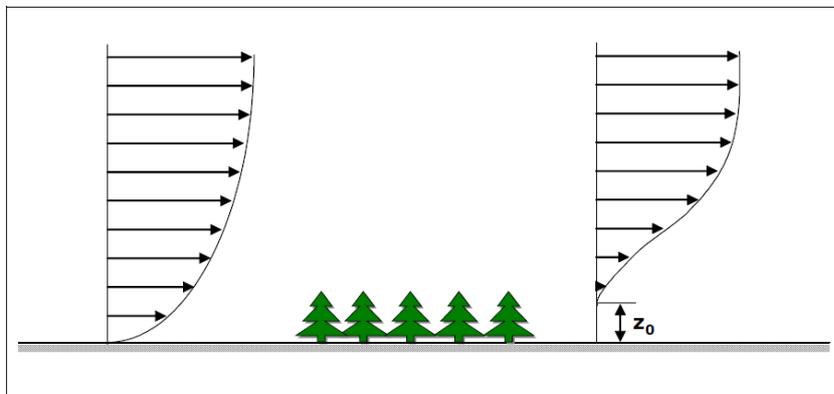


Figura 7 – Definição de comprimento de rugosidade.

A modelagem da rugosidade deve ser efetuada manualmente através de imagens atuais de satélites e levantamento local. Devem-se criar contornos nas áreas com a mesma rugosidade e atribuir uma classificação de rugosidade padrão, como a presente na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores típicos dos comprimentos característico de rugosidade de superfícies, adaptado de (Rohatgi, 1994).

Descrição do Terreno	z_0 (m)
Muito liso: gelo ou lama	1×10^{-6}
Mar aberto e calmo	2×10^{-5}
Mar agitado	5×10^{-5}
Superfície de neve	0,003
Gramado	0,008
Pastagem áspera	0,01
Descampado	0,03
Plantação	0,05
Poucas árvores	0,1
Várias árvores, cercas e poucos prédios	0,25
Floresta e mata	0,5
Subúrbios	1,5
Centros de cidades com prédios altos	3

Existem outros tipos de classificação de rugosidade como mostrado abaixo na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores típicos dos comprimentos característico de rugosidade de superfícies, adaptado de (ESDU, 1993).

Tipo de Cobertura do Solo	z_0 (m)
Áreas cobertas de neve, Deserto ou áreas áridas	0,001
Áreas abertas com grama baixa sem obstáculos	0,003
Área de arbustos e árvores isoladas, Mar muito violento	0,01
Zona Rural com poucas árvores e casas isoladas	0,03
Vilas, Zona Rural com muitas árvores e casas	0,1
Pequenas Cidades, Subúrbios ou Área arborizada	0,3
Centro de Cidades, Florestas	0,7

A rugosidade pode ser classificada através de sua classe (alfa) ou Z_0 . Z_0 é dado em metros e pode ser considerado como a altura a partir da qual a velocidade do vento é maior que zero. A rugosidade tem grande influência no perfil vertical do vento.

Em relação ao comprimento de rugosidade, (STULL, 1988) afirma que para uma superfície particular este não muda com variações na velocidade, estabilidade ou cisalhamento, mudando sim com a estrutura física da vegetação, como altura e forma das plantas, tamanho e arranjo das folhas, e por sua distribuição espacial pela área. De forma que os valores encontrados a partir do perfil vertical do vento em uma torre anemométrica podem resultar em erros na estimativa do comprimento de rugosidade da vegetação.

2.3 Estabilidade atmosférica

Quando uma bolha de ar é carregada verticalmente para cima na atmosfera atravessa um gradiente de pressão decrescente, expandindo-se. Essa expansão demanda trabalho, o que resulta em uma diminuição da temperatura dessa massa. Como este processo ocorre de forma rápida, é razoável considerar que é um processo adiabático (CHEREMISINOFF, 2002). De forma análoga, esta bolha pode ser empurrada para baixo e comprimir-se, resultando em um aumento da temperatura, Figura 8. Em uma atmosfera não saturada (umidade relativa menor que 100%), a taxa adiabática é constante e aproximadamente igual a $0,01^{\circ}\text{C}/\text{m}$ (AHRENS, 2008).

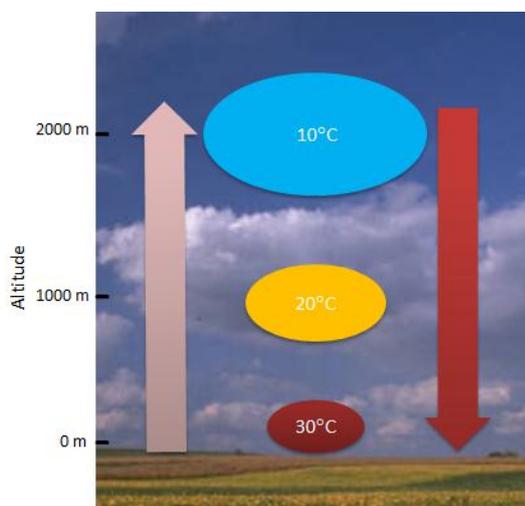


Figura 8 - Bolha de ar movendo-se verticalmente em uma atmosfera não saturada adaptado de (VALENÇA, 2010).

Na atmosfera neutra a bolha de ar atinge novas altitudes e permanece nesta situação. Na atmosfera estável a bolha de ar após atingir novas altitudes volta para sua posição original. Na atmosfera instável a bolha de ar continua a subir. (Figura 9).

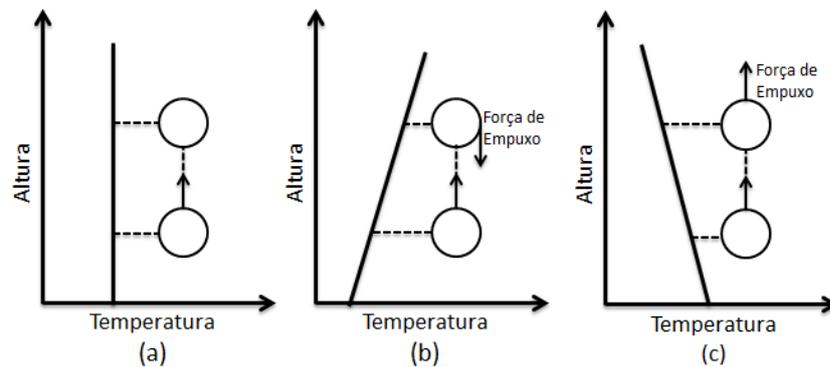


Figura 9 - Os estados da atmosfera: (a) neutra; (b) estável; e (c) instável, adaptado de (ROHATGI, 1994).

Existem basicamente seis condições de estabilidade atmosférica, as quais foram designadas por Pasquill como: A (extremamente instável), B (moderadamente instável), C (pouco instável), D (neutra), E (moderadamente estável), e F (extremamente estável). Depois, foi adicionada a condição G (estabilidade noturna) para representar condições de baixa velocidade de vento durante a noite (MOHAN e SIDDIQUI, 1998). A correlação entre a classificação da estabilidade atmosférica de Pasquill e os valores para gradiente vertical de temperatura do processo podem ser vistos na Tabela 4, (VALENÇA, 2010).

Tabela 4 - Correlação entre a classificação da estabilidade atmosférica de Pasquill e o gradiente vertical de temperatura, adaptado de (MOREIRA, TIRABASSI e MARCELO, 2008).

Condição de Estabilidade Atmosférica	Classificação de Pasquill	Gradiente de Temperatura (°C/m)
Extremamente instável	A	$dT/dZ < -0,19$
Moderadamente instável	B	$-0,019 \leq dT/dZ < -0,017$
Pouco instável	C	$-0,017 \leq dT/dZ < -0,015$
Neutra	D	$-0,015 \leq dT/dZ < -0,005$
Pouco estável	E	$-0,005 \leq dT/dZ < 0,015$
Extremamente estável	F	$0,015 \leq dT/dZ < 0,04$
Estabilidade Noturna	G	$0,04 \leq dT/dZ$

2.4 O vento

2.4.1 Camada Limite Atmosférica (CLA)

Pode-se definir a CLA como sendo a camada do ar acima de uma superfície terrestre, que sofre influências da mesma. Todos os processos dentro desta camada estão sendo influenciados pelas características da superfície do solo. A sua espessura varia de

aproximadamente 50 m, em condições estáveis que se pode encontrar no inverno durante a noite, até aproximadamente 2.000 m, durante um dia no verão com muito sol. Acima da CLA, existe uma atmosfera que não sofre mais as influências do solo e onde se encontra o vento geostrófico. Pode-se considerar que o vento geostrófico é o motor para o escoamento dentro da CLA, funcionando como força cisalhante.

Pelas suas características, pode-se dividir a CLA abaixo da atmosfera livre em três camadas (ROEDEL, 2000):

1. A camada laminar ou subcamada viscosa é a primeira diretamente acima do solo. A sua espessura é de alguns milímetros e os processos dentro dela são principalmente dominados pelas forças moleculares, causados pela viscosidade.

2. A camada de Prandtl tem uma espessura entre 50 - 100 metros, ou equivalente a aproximadamente 10 % da CLA. A dinâmica desta camada é principalmente dominada pelas forças de atrito causadas pela proximidade com o solo. A quantidade de movimento e o calor são transportados na forma turbulenta. A velocidade do vento aumenta significativamente com a altura.

3. A Camada de Ekman é dominada pela força de Coriolis, pela força do gradiente de pressão e pela força de atrito. Com a altura, as forças de atrito diminuem e deixam de ter influência a uma altura de aproximadamente 1.000 metros deixam de ter influência.

A Figura 10 mostra esquematicamente a estrutura da CLA:

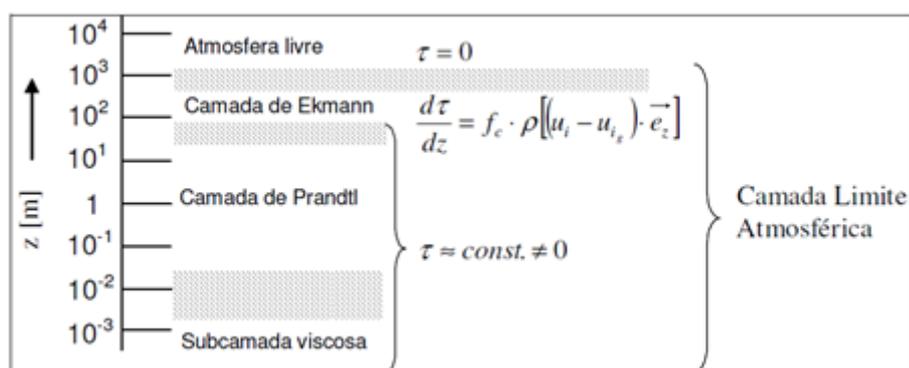


Figura 10 – Estrutura da camada limite atmosférica, adaptado de (ROEDEL, 2000).

Considerando somente a influência do atrito, pode-se partir da seguinte idealização (ROEDEL, 2000):

1. Na atmosfera livre, ou seja, numa altura que não sofre influência do solo, existe um vento geostrófico com uma tensão de atrito igual a zero.

2. Em consequência, surge acima do solo uma camada influenciada pelo atrito, na qual a velocidade de vento cresce, começando de zero na superfície até a velocidade do vento geostrófico.

2.4.2 Vento geostrófico

Segundo glossário do CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – “O vento geostrófico é definido como vento uniforme e estacionário tangencial às isóbaras retas e paralelas em uma atmosfera sem atrito. Ele é proporcional ao gradiente de pressão. No hemisfério sul, a força de Coriolis atua para a esquerda do vento geostrófico e a força do gradiente de pressão atua para a direita. As duas forças estando em perfeito balanço e as parcelas do ar não sofrem aceleração”.

Em consequência disso, é revelada uma camada limite acima da superfície, ou seja, uma camada dominada pelo atrito, na qual a velocidade de vento aumenta a partir de zero na superfície até a velocidade do vento geostrófico. Porém, a rotação da terra tem consequências na direção de velocidade do vento e este varia então com a latitude e a altura (DORWEILER, 2007).

2.5 Campanha de medição

A campanha de medição deve seguir as melhores práticas existentes para obtenção de dados precisos e confiáveis. Algumas normas internacionais, como a IEC61400-12 descrevem as melhores técnicas para realizar medições de vento, entre elas como se deve realizar a montagem dos sensores na torre de modo que a torre influencie ao mínimo nas medidas registradas, quais tipos de sensores necessários e seus requisitos técnicos mínimos.

No apêndice A encontram-se informações a respeito de torres, sensores, datalogger e hastes, equipamentos tipicamente utilizados numa campanha de medição.

2.6 Extrapolação Vertical

2.6.1 Perfil exponencial

A hipótese do perfil exponencial é a mais simples. Esta hipótese é geralmente válida para altitudes até 150 metros e sobre condições atmosféricas neutras. A equação para o gradiente de velocidade de vento exponencial é:

$$\frac{U(Z_1)}{U(Z_2)} = \frac{Z_1^\alpha}{Z_2^\alpha} \quad (2)$$

Onde,

$U(Z_1)$ é a velocidade do vento na altura Z_1 ;

$U(Z_2)$ é a velocidade do vento na altura Z_2 ;

α é o expoente do gradiente de velocidade.

2.6.2 Perfil logarítmico

Uma expressão mais abrangente para a variação da velocidade de vento com a altura é o perfil logarítmico, que considera a estabilidade atmosférica do local de interesse.

$$U(Z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) - \Psi \right] \quad (3)$$

Onde,

Z é altura onde deseja-se estimar a velocidade;

$U(z)$ é a velocidade na altura calculada;

u_* é a velocidade de fricção, relacionado ao cisalhamento da superfície;

k é a constante de Von Kármán [-];

Z_0 é o comprimento de rugosidade;

Ψ é a função de estabilidade atmosférica, positiva para condições instáveis, negativa para estáveis e nula para neutras.

2.7 WAsP

O primeiro software que ficou mais conhecido para cálculos de mapas eólicos foi o WAsP. Atualmente ele continua sendo o mais utilizado, sendo um software de referência nos dias atuais.

O WAsP é um modelo computacional que extrapola verticalmente e horizontalmente os dados de vento medidos em uma torre anemométrica, sobre diferentes tipos de topografia, visando a obtenção de uma grade de dados que descreva a climatologia dos vento sobre a superfície da área a ser analisada e a uma determinada elevação, por meio de modelos que resolvem o fluxo eólico sobre diferentes tipos de topografia, e corrigindo os efeitos causados pela presença de obstáculos (MORTENSEN, HEATHFIELD, *et al.*, 2005).

Segundo (BOWEN e MORTENSEN, 2004) o modelo está baseado em condições atmosféricas padrões voltadas para as características da atmosfera européia. Correções para uma atmosfera diferente desses padrões podem ser aplicadas manipulando os parâmetros do fluxo de calor superficial do modelo. O envelope padrão do modelo WAsP recomenda que ele seja utilizado, preferencialmente, em terrenos com topografia de declives baixos ou suavizado.

Dois parâmetros são utilizados para caracterizar a estabilidade atmosférica do modelo WAsP, H_{off} e H_{rms} , que representam o fluxo de calor superficial médio e sua variabilidade, podendo ser ajustados para diferentes situações de regimes eólicos. Estes parâmetros influenciam no transporte vertical do *momentum*, que é refletido no perfil vertical da velocidade do vento, afetando os resultados do WAsP.

Em continente o valor padrão do WAsP para H_{off} é -40 W/m^2 , e para H_{rms} é 100 W/m^2 . Fixando todos os parâmetros do fluxo de calor superficial igual a zero no WAsP, obtém-se o perfil logarítmico neutro para a velocidade do vento, enquanto que fixando valores diferente de zero, o perfil logarítmico é modificado.

O modelo de estabilidade é, juntamente com a descrição da topografia do terreno, a principal causa de erros nos resultados do WAsP para uma determinada região (VIEIRA, 2008).

Estimativas precisas são obtidas pelo WAsP quando (BOWEN e MORTENSEN, 1996):

- O local de medição e os locais de estimativas estão sujeitos ao mesmo regime climatológico;

- As condições climáticas estão próximas da estabilidade neutra;
- Não existem inclinações abruptas na área que possam provocar descolamento do fluido;
- Os dados medidos são confiáveis.

Para seguir as melhores práticas recomendadas pela equipe desenvolvedora do WAsP, os usuários devem ajustar alguns parâmetros. Esses parâmetros têm relação com as estruturas dos mapas eólicos gerados (alturas padrões e rugosidades padrões) e com o fluxo de calor (estabilidade atmosférica). Outros parâmetros não devem ser alterados a não ser por uma recomendação explícita através de contato com a equipe desenvolvedora do WAsP (SVENNINGSEN, 2010).

Através de dados provenientes de uma campanha de medição de um ponto na área estudada o modelo WAsP retira todas as influências da região (topografia, rugosidade e obstáculos) criando uma climatologia geral para aquele ponto, Figura 11.

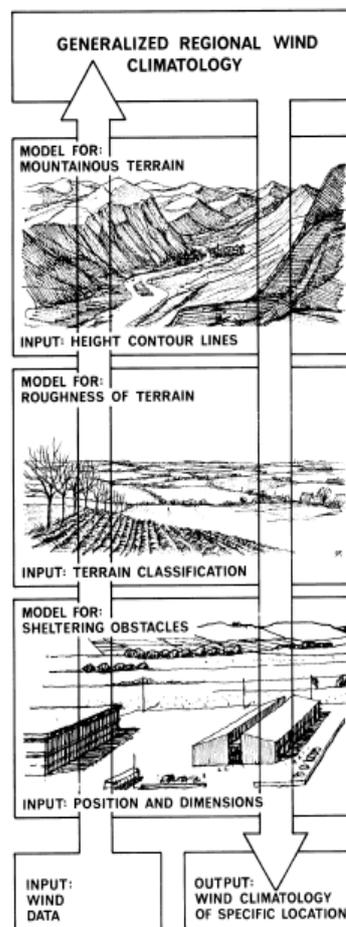


Figura 11 – Cálculos dos campos eólicos do modelo WAsP.

Posteriormente a partir daquele ponto onde foi calculado o atlas geral, sem influências, as medições são extrapoladas para outros pontos do terreno, conforme indica a Figura 12, que representa como é calculada a malha WAsP. De acordo com as novas características do ponto de estimativa, o modelo considera uma aceleração ou desaceleração do vento, aplicando as novas influências no ponto estimado, as incertezas nas estimativas aumentam com a distância entre o ponto estimado e o ponto de medição.

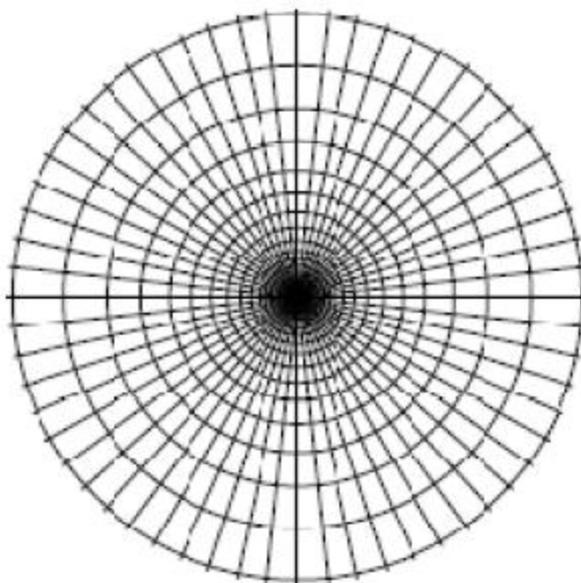


Figura 12 – Modelo de extrapolação WAsP.

O WAsP utiliza um modelo do tipo diagnóstico. Os modelos diagnósticos consistem, fundamentalmente, em algoritmos para interpolar as medidas efetuadas no domínio de cálculo. Alguns modelos contêm algoritmos que permitem corrigir, subsequentemente, a estrutura do campo de vento, sobretudo na proximidade do solo, dando conta de alguns fenômenos locais (barreiras, vales, lagos).

Os modelos diagnósticos requerem, como entrada, informações relativas à orografia e aos principais parâmetros geofísicos, como também medidas de vento no solo e ao longo de um ou mais perfis verticais para a frequência temporal requerida. Em alguns casos, as medidas podem ser integradas através dos valores calculados pelos modelos que operam em uma escala maior. São modelos bastante simples, que não necessitam excessivos recursos de cálculo e sem limitações teóricas particulares, cujas performances são, porém, fortemente condicionadas pela representatividade da medida utilizada. É, também, oportuno dizer que não devem ser utilizados em condições de terreno significativamente complexo (MOREIRA, TIRABASSI e MORAES, 2008).

2.8 WindSim

O modelo implementado no WindSim é baseado na equação de Navier-Stokes para um fluido incompressível. É um modelo CFD (dinâmica dos fluidos computacional) para simulação numérica de escoamentos turbulentos, podendo ser utilizado tanto em terrenos com relevos simples como em terrenos com relevos complexos.

As equações de Navier-Stokes, nomeadas a Claude-Louis Navier e George Gabriel Stokes, são aplicações da segunda lei de Newton e descrevem o escoamento de um fluido como líquido ou gás. Essas equações apresentam um leque de aplicações muito grande, modelam desde correntes oceânicas e climáticas como o escoamento do fluido ao redor de um aerofólio.

Pesquisas foram realizadas para encontrar soluções mais completas para a equação de Navier-Stokes. Um dos primeiros programas comerciais a utilizar tais soluções é o modelo implementado no WindSim desenvolvido pela Vector AS. O WindSim utiliza soluções para o modelo CFD conhecida como PHOENICS como o principal solucionador das equações. Potencialmente, esse modelo tem maior capacidade de fornecer resultados precisos que o modelo utilizado pelo WAsP (WALLBANK, 2008).

Existem muitos estudos descrevendo a aplicabilidade do WAsP em tipos variados de terrenos. No entanto, há um crescente interesse na aplicabilidade das equações de Navier-Stokes para cálculos em terrenos complexos, pois os requisitos computacionais atuais são mais acessíveis e podem produzir resultados num espaço de tempo razoável com uma resolução aceitável (LLOMBART, TALAYERO, *et al.*, 2007).

O WindSim pode ser considerado como um modelo prognóstico, os modelos prognósticos permitem descrever a evolução do fenômeno atmosférico, sobre todo o domínio tri-dimensional considerado, através da integração do sistema de equações diferenciais constituído da equação de conservação da massa, da quantidade de movimento, da energia cinética turbulenta, da umidade e do calor.

Estes modelos, que podem ser utilizados também na fase de previsões, são mais sofisticados do que os diagnósticos. Para serem aplicados corretamente necessitam maiores recursos de cálculo, diversos tipos de dados de entrada e um bom conhecimento dos fenômenos meteorológicos. Tais modelos se diferenciam pelo grau de aproximação e pelo esquema numérico adotado para resolver as equações diferenciais. Entre as aproximações e simplificações utilizadas, pode-se citar: aproximações na implementação das equações,

parametrizações dos fenômenos não descritos pelas equações, sistema de coordenadas e condições de contorno e iniciais.

Para poder integrar o sistema de equações de movimento, é necessário introduzir algumas hipóteses simplificadoras: a aproximação hidrostática e a de Boussinesq. A primeira hipótese é a incompressibilidade do ar, e a segunda supõe que a temperatura, pressão e densidade podem ser consideradas em equilíbrio, exceto para uma pequena variação devida ao movimento, que pode conduzir a consideradas variações de densidade somente ao longo da vertical. É possível introduzir outras simplificações nas equações também nas escalas de aplicações do modelo em função das quais alguns fenômenos podem ser considerados desprezíveis.

Os principais processos não descritos explicitamente referem-se ao sistema de nuvens, às precipitações e aos fluxos superficiais. Alguns modelos possuem algoritmos implementados que tratam estes processos e que se diferenciam em função da quantidade e do tipo de informações utilizadas.

Os modelos prognósticos, baseando-se na integração de equações diferenciais, necessitam da definição de condições iniciais e de contorno. Estas informações dificilmente podem ser deduzidas com o detalhamento necessário para um modelo, baseadas somente em valores medidos. As condições iniciais, constituídas do campo 3D das variáveis meteorológicas, podem, por exemplo, ser obtidas integrando-se com modelos diagnósticos as medidas e saídas de modelos de escala maior. As condições de contorno também podem ser encontradas através da simulação com modelos que operam em uma escala maior ou obtidas diretamente através de simulações acopladas (*nesting*) efetuadas no mesmo modelo. As medidas e as saídas de outros modelos podem ser utilizadas também para “forçar” o modelo prognóstico a assumir valores fixos em porções específicas do domínio, em instante temporal escolhido (MOREIRA, TIRABASSI e MORAES, 2008).

Uma malha do WindSim é apresentada na Figura 13. Ela é uma discretização de um espaço com dimensões definidas onde as variáveis do modelo serão calculadas. A soma de todas as malhas representa o domínio do problema cercado pelos limites do volume de controle (DORWEILER, 2007).

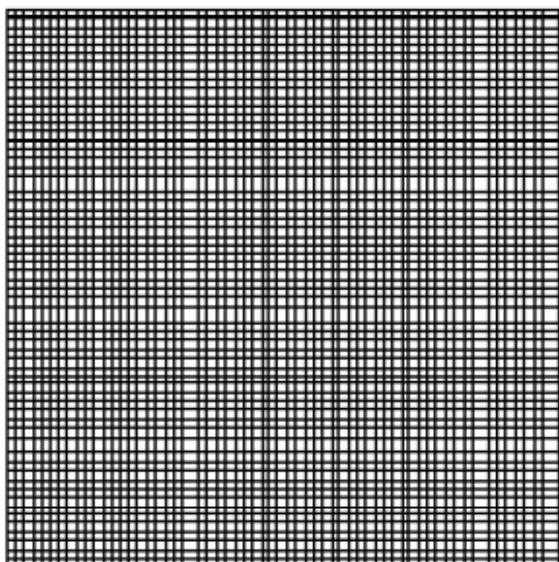


Figura 13 – Malha WindSim.

2.9 Comparações WAsP X WindSim

Uma das maiores vantagens de modelos CFD, como o utilizado pelo WindSim, é a capacidade de modelar descolamento dos fluidos em regiões com grandes inclinações. O modelo utilizado pelo WAsP não considera tal efeito, ver Figura 14.

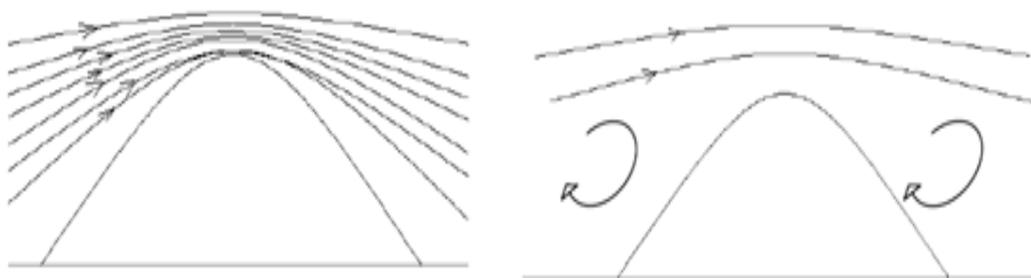


Figura 14 – Consideração do modelo WAsP de um fluido sobre uma colina (esquerda) e uma representação mais real de como é a característica de um fluido sobre uma colina.

Existem estudos na literatura que comparam resultados provenientes dos métodos utilizados pelos modelos CFD e WAsP, validando as estimativas através de medições em diferentes pontos do terreno. Abaixo, alguns desses estudos tem os seus principais resultados resumidos.

O estudo apresentado em (THEODOROPOULOS e DELIGIORGIS, 2010) localiza-se numa região costeira e montanhosa, considerada de topografia e rugosidade complexas, tendo

ao todo 7 torres anemométricas de 20 metros espalhadas numa área de 17 x 20 km Foram utilizadas séries temporais de velocidade e direção do vento, provenientes da campanha de medição, com período menor que 1 ano. O estudo mostra um desvio médio para o WindSim de 1,4% e de 2,3% para o WAsP. Porém, essa melhor performance do WindSim foi contrabalanceada pela melhor performance do WAsP considerando o desvio quadrático médio que foi de 8% enquanto que para o WindSim foi de 11%.

Em (WALLBANK, 2008) é apresentado um estudo em duas regiões, uma com 5 torres anemométricas espalhadas na área de interesse e outra com 6 torres anemométricas, todas variando entre 40 e 80 metros de altura, ambas regiões consideradas de grande complexidade topográfica. Foram utilizadas séries temporais de velocidade e direção do vento, provenientes da campanha de medição, com período menor que 1 ano. Para as duas regiões, em média, o WindSim apresentou menores desvios nas extrapolações das velocidade médias em relação as medições que o WAsP.

Em (EMD, 2007) é apresentado estudo em uma região com topografia de pouca complexidade, onde não ocorrem muitos descolamentos do fluxo do vento, porém rugosidade complexa, realizado numa região da Dinamarca, para onde primeiramente o modelo WAsP foi implementado. Neste caso é concluído que o modelo CFD utilizado pelo WindSim apresenta dificuldade para regiões com rugosidade de alta complexidade, e enfatiza que o mesmo foi implementado primeiramente para lugares de alta complexidade topográfica, mas não alta complexidade de rugosidade do terreno.

Para o estudo realizado por (BERGE e GRAVDHAL, 2006), em uma região na Noruega considerada de alta complexidade topográfica, foram utilizadas três ferramentas: WindSim e 3DWind, ambas com o modelo CFD implementado, e o WAsP. Os dados de intensidade e direção do vento foram provenientes de uma campanha de medição realizada na área de interesse com três torres anemométrica, uma de 10 metros e duas de 50 metros, as séries temporais apresentavam mais de 1 ano de medição. Conclui-se que para a região estudada o WAsP apresenta melhor performance, seguido pelo WindSim e por último o 3DWind.

Em (ALBRECHT e KLESITZ, 2006) o estudo foi realizado numa região considerada de complexidade topográfica alta e rugosidade relativamente simples, com a comparação entre as ferramentas WindSim e WAsP. Foram utilizadas séries temporais provenientes de sete torres espalhadas na área de interesse. Nesse estudo o WindSim apresenta melhores resultados que o WAsP na estimativa da velocidade média.

O estudo apresentado por (PEREIRA, GUEDES e SANTOS, 2010) foi realizado em sete lugares diferentes, todos em regiões montanhosas, com topografia variando entre moderada e complexa. Foram comparadas as ferramentas MeteodynWT (modelo CFD) e o WAsP. Para todos os resultados o MeteodynMT obteve melhor performance, apresentando em média para todos os sete casos estudados desvios pelo menos 50% menores que na estimativa da velocidade do vento realizada pelo WAsP.

3 METODOLOGIA

3.1 Dados de vento

Foram obtidos dados de vento através de uma campanha de medição realizada com três torres anemométricas instaladas na região de interesse no interior da Paraíba. As torres utilizadas com propósitos de modelagem eólica devem fornecer os dados provenientes dos seus sensores da forma mais precisa possível. Para isso faz-se necessário o uso de anemômetros calibrados e que tenham a precisão necessária para diminuir ao máximo os erros intrínsecos a uma medição.

A estrutura e a montagem da torre e seus equipamentos devem seguir normas internacionais. Essas normas descrevem qual o melhor método de montar uma torre de modo que ela interfira o mínimo possível no fluxo do vento a ser medido, a melhor distribuição dos sensores e a posição mais adequada do terreno para instalá-la.

As três torres, chamadas de torre 1, 2 e 3, seguiram as melhores técnicas indicadas para uma campanha de medição. As mesmas estão dispostas na região em estudo de acordo com imagem abaixo:

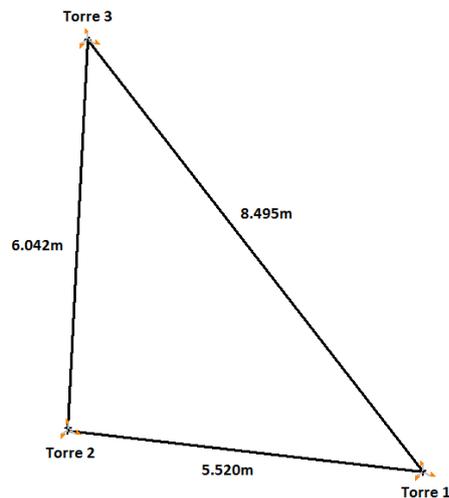


Figura 15 – Localização relativa e distância entre as torres da região estudada.

3.1.1 Torre 1

A torre 1 é uma torre metálica, treliçada e estaiada, com 84 metros de altura. Os sensores de direção e intensidade do vento foram montados em hastes de 2,5 metros de comprimento, de modo que os mesmos percebam ventos com o mínimo de influência da torre de medição.

Foram montados nessa torre três anemômetros, individualmente calibrados, nas alturas de 20, 50 e 78 metros. Dois sensores de direção foram montados nas alturas de 50 e 78 metros.

Para armazenamento e pré-processamento dos dados provenientes dos sensores, foi utilizado o Datalogger NRG Symphonie Plus Logger com taxa de amostragem de 0,5 Hz e intervalo de integração de 10 minutos, armazenando valores das médias, desvios padrões, valores máximos, mínimos e a hora em que foram medidos.

3.1.2 Torre 2

A torre 2 é uma torre metálica, treliçada e estaiada, com 84 m de altura. Os sensores de direção e intensidade do vento foram montados em hastes de 2,5 metros de comprimento, de modo que os mesmos percebam ventos com o mínimo de influência da torre de medição.

Foram montados nessa torre três anemômetros, individualmente calibrados, nas alturas de 20, 50 e 78 metros. Dois sensores de direção foram montados nas alturas de 50 e 78 metros.

Para armazenamento e pré-processamento dos dados provenientes dos sensores, foi utilizado o Datalogger NRG Symphonie Plus Logger com taxa de amostragem de 0,5 Hz e intervalo de integração de 10 minutos, armazenando valores das médias, desvios padrões, valores máximos, mínimos e a hora em que foram medidos.

3.1.3 Torre 3

A torre 3 é uma torre metálica, treliçada e estaiada, com 105 m de altura. Os sensores de direção e intensidade do vento foram montados em hastes de 2,5 metros de comprimento, de modo que os mesmos percebam ventos com o mínimo de influência da torre de medição.

Foram montados nessa torre quatro anemômetros, individualmente calibrados, nas alturas de 20, 50, 78 e 100 metros. Três sensores de direção foram montados nas alturas de 50 e 78 e 100 metros. Dois sensores de temperatura foram montados nas alturas de 20 e 100 metros.

Para armazenamento e pré-processamento dos dados provenientes dos sensores, foi utilizado o Datalogger NRG Symphonie Plus Logger com taxa de amostragem de 0,5 Hz e intervalo de integração de 10 minutos, armazenando valores das médias, desvios padrões, valores máximos, mínimos e a hora em que foram medidos.

3.1.4 Análise, seleção e tratamento dos dados de vento

Foram analisados criteriosamente os dados provenientes das torres para identificação de possíveis erros de medição decorrentes de falhas nos sensores ou no Datalogger. Com exceção de um período de 4 horas sem dados, consequência de uma manutenção realizada nas torres, não foram encontrados erros ou falhas que comprometessem a campanha de medição.

Devem ser utilizados períodos com anos fechados para evitar influências sazonais na variação do recurso eólico. Para as torre 1 e 2 tem-se o ano de 2010 completo de medições.

3.2 Modelagem do terreno

3.2.1 Topografia

Devido ao grande impacto da topografia na extrapolação dos dados de vento, o levantamento topográfico deve preferivelmente ser executado localmente, com a melhor resolução possível.

Normalmente o levantamento topográfico local é feito apenas dentro da área onde será construído o parque eólico. Mas para uma correta modelagem do recurso eólico na área de interesse é requerido informações topográficas em um raio de 10 km de cada aerogerador a ser instalado no projeto.

Como não foram disponibilizados levantamentos topográficos realizados *in-loco*, foram utilizados dados da missão SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) para a área de interesse. A extensão total do mapa foi de 40 x 40 km. A missão SRTM foi realizada pela NASA e consistiu no levantamento topográfico de todo globo terrestre.

Os dados de elevação banda C, oriundos da missão SRTM, têm resolução espacial de 90 metros, com acurácia vertical e horizontal absoluta de 16 e 20 metros respectivamente, com 90% de confiança (CHIEN, 2000). Segundo estudo realizado por (Medeiros, 2008), o MDE (modelo digital de elevação) SRTM pode ser classificado como padrão classe A.

Com o mapa topográfico pode-se obter o mapa das inclinações existentes. A Figura 16 apresenta esse mapa com inclinações divididas em intervalos. Áreas com grandes inclinações são as mais exigentes nos cálculos dos mapas eólicos.

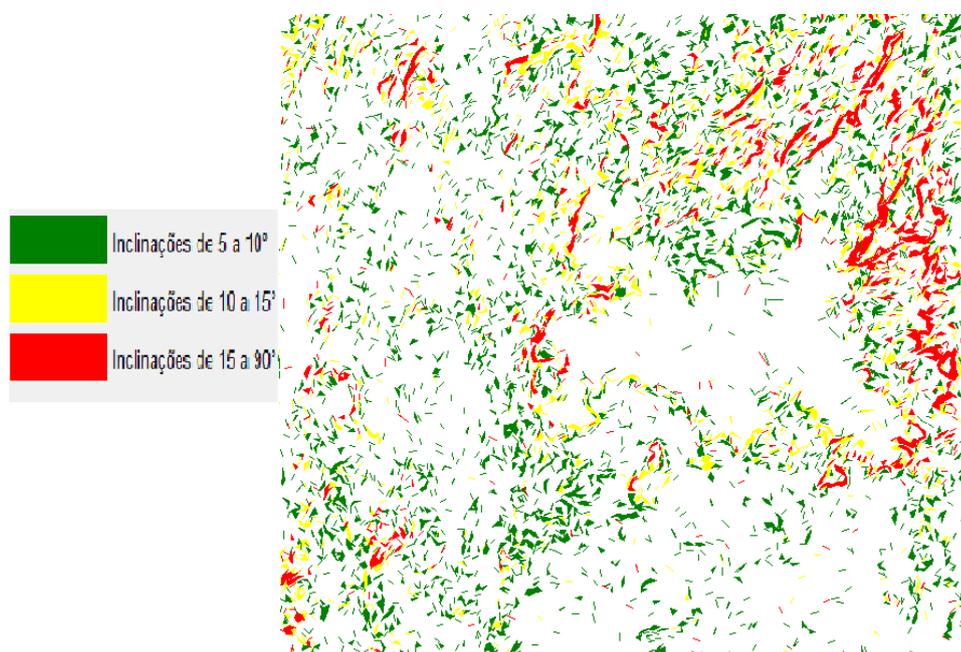


Figura 16 – Mapa de inclinação da região estudada.

A quantidade de torres a serem utilizadas em um projeto eólico depende diretamente da complexidade topográfica. Quanto mais complexo o terreno maior a quantidade de torres para uma modelagem mais precisa do recurso eólico.

3.2.2 Rugosidade

Na Figura 17, imagens das vegetações típicas encontradas na área em estudo.



Figura 17 – Imagens para caracterização da rugosidade na região estudada.

De acordo com observações de imagens de satélite e observações locais, definiu-se que deveriam ser consideradas basicamente 4 tipos de rugosidades distintas para o local, apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Rugosidades da área estudada.

Descrição	Z_0 [m]
Vegetação natural, plantações, solo exposto	0,05
Vegetação navia esparsa	0,1
Vegetação nativa densa	0,2
Povoado	0,3

Esses comprimentos de rugosidades foram especificados com as duas classificações padrões de rugosidade apresentadas, de acordo com as descrições que mais se aproximavam da região de interesse. Ressalta-se que, para vegetações típicas do interior nordestino, não existe um padrão específico de rugosidade que represente fielmente o local, logo deve-se utilizar as descrições padrão que mais se aproximam da vegetação a ser caracterizada.

Deve-se verificar que a especificação 100% correta da rugosidade se torna impossível, por causa das dimensões da área estudada e as classificações padrões que não englobam todos os tipos de vegetações existentes.

Uma maneira de calibrar a rugosidade é fazer as comparações cruzadas entre as torres variando o comprimento de rugosidade predominante da área. Porém essa técnica pode resultar em contrabalanceamento de erros, ocultando possíveis erros de topografia e estabilidade atmosférica. Logo o ideal é especificar a rugosidade conforme melhores padrões e introduzi-las igualmente nas ferramentas utilizadas para se ter uma única base de comparação.

3.3 WAsP

3.3.1 Ferramenta *cross predict*

Utilizou-se a ferramenta *cross predict* existente no WAsP para estabelecer as estimativas cruzadas entre as torres. Como o próprio nome diz, essa ferramenta fornece uma maneira rápida de realizar estimativas cruzadas entre torres de medição existentes no projeto, com isso os valores medidos em uma torre são extrapolados para o ponto onde está a segunda torre. Essa é a melhor maneira de saber o quão fiel sua modelagem está em relação as medições.

Foram realizadas todas as estimativas cruzadas possíveis entre as duas torres. Como foram medidas variáveis do vento em três altura de cada torre, foram realizadas ao todo 9 estimativas cruzadas por torre.

3.3.2 Ajuste dos parâmetros WAsP

O modelo WAsP tem como envelope padrão uma série de características definidas para uma atmosfera típica européia. Estimativas precisas são obtidas pelo WAsP quando o local de medição e os locais de estimativas estão:

- Sujeitos ao mesmo regime climatológico;
- As condições climáticas estão próximas da estabilidade neutra;
- Não existem inclinações abruptas na área que possam provocar um descolamento do fluido (inclinações maiores que 17°);
- Os dados medidos são confiáveis.

Para ajustar os parâmetros da estabilidade atmosféricas, deve-se conhecer o gradiente vertical de temperatura para área. Isto pode ser feito através de medições de temperatura em níveis diferentes. Na torre 3 presente na região estudada há medições de temperatura a 100 e a 20 metros.

Com a análise dos dados de temperatura verificou-se que para o período medido na torre 3, 9 meses, a estratificação atmosférica é predominantemente pouco estável, de acordo com a classificação dada em (MOREIRA, TIRABASSI e MARCELO, 2008). Para todas as médias mensais a atmosfera da região é considerada pouco estável, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Estabilidade atmosférica da região considerando médias mensais.

Mês	Estabilidade média mensal
Março	Pouco Estável
Abril	Pouco Estável
Maio	Pouco Estável
Junho	Pouco Estável
Julho	Pouco Estável
Agosto	Pouco Estável
Setembro	Pouco Estável
Outubro	Pouco Estável
Novembro	Pouco Estável
Dezembro	Pouco Estável

Para análise com média horária verifica-se que no período diurno a atmosfera é predominantemente neutra, já no período noturno é pouco estável, conforme Tabela 7 de um dia típico.

Tabela 7 – Estabilidade atmosférica da região considerando médias horárias.

Hora	Estabilidade	Hora	Estabilidade
00:00	Pouco Estável	12:00	Neutra
01:00	Pouco Estável	13:00	Neutra
02:00	Pouco Estável	14:00	Neutra
03:00	Pouco Estável	15:00	Neutra
04:00	Pouco Estável	16:00	Pouco Estável
05:00	Pouco Estável	17:00	Pouco Estável
06:00	Pouco Estável	18:00	Pouco Estável
07:00	Neutra	19:00	Pouco Estável
08:00	Neutra	20:00	Pouco Estável
09:00	Neutra	21:00	Pouco Estável
10:00	Neutra	22:00	Pouco Estável
11:00	Neutra	23:00	Pouco Estável

Com o conhecimento dessas características deve-se ajustar os parâmetros WASP que definem a estratificação atmosférica para modelar a atmosfera típica da região estudada.

Normalmente, utilizando um modelo de atmosfera mais estável do que o real, ocorre uma sobre estimativa na extrapolação vertical. Utilizando um modelo de atmosfera menos estável do que o real ocorre uma sub estimativa na extrapolação vertical, conforme pode-se verificar em (VIEIRA, 2008).

3.3.2.1 Estabilidade atmosférica

Grandes desvios encontrados entre os valores calculados pelo WASP com seu envelope padrão e medidos em campo são provenientes da extrapolação vertical do vento. A Figura 18 mostra gráfico dos perfis verticais da torre 1 calculados através do WASP com parâmetros padrão e medida fixada em 50 metros, perfil logarítmico e perfil exponencial, com os dados do ano medido. Também são mostrados os valores medidos em cada altura.

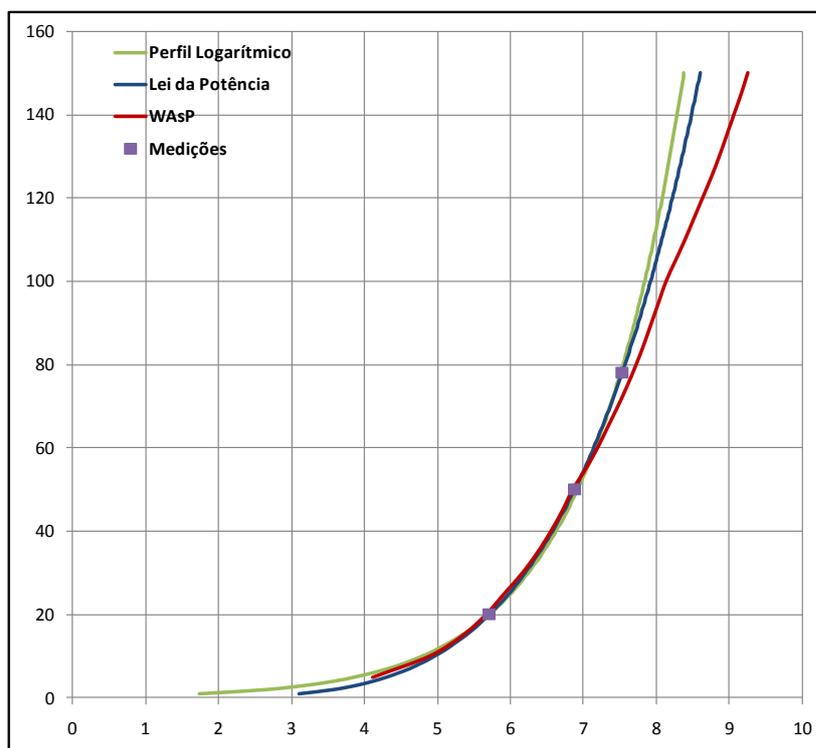


Figura 18 - Perfis verticais da torre 1 calculados através do WASP com parâmetros padrão e medida fixada em 50 m, eixo x [m/s] e eixo y [m].

Observa-se que há uma sobre estimativa do perfil WASP com ponto fixado em 50 metros em relação as medições a 78 metros. Isto acontece porque o WASP utiliza como valor padrão uma atmosfera com a estratificação mais estável do que a observada localmente.

Na Figura 19, comparação do perfil vertical calculado pelo WASP com parâmetros padrão, em relação às medições diurnas representadas pelo perfil logarítmico e perfil exponencial.

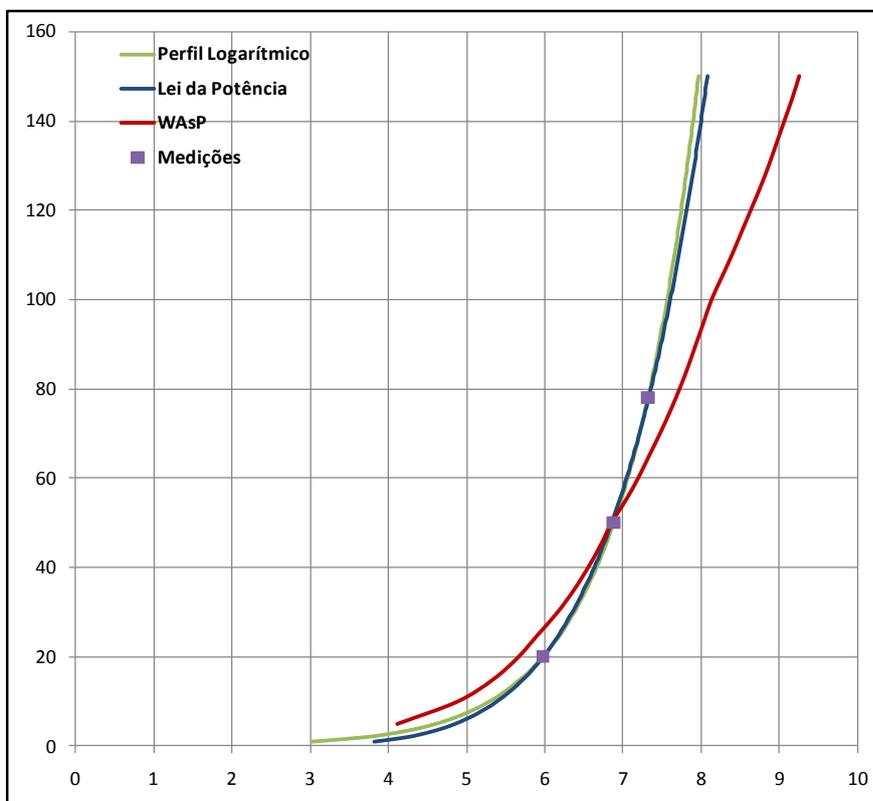


Figura 19 - Perfil vertical calculado pelo WASP com parâmetros padrão em relação às medições diurnas representadas pelo perfil logarítmico e lei da potência eixo x [m/s] e eixo y [m].

Verifica-se que há uma grande sobre estimativa dos dados quando o perfil vertical é feito considerando somente as medições diurnas. Como mostrado a estratificação atmosférica medida durante o dia para a região em questão é em geral neutra para o período diurno. Como o envelope padrão WASP considera uma atmosfera estável durante todo o período há uma grande sobre estimativa durante o período diurno.

Ajustando os valores dos parâmetros WASP para estratificação neutra da atmosfera ($\text{Heat Flux} = 0$) e comparando com o perfil vertical logarítmico e lei da potência considerando somente medições diurnas, tem-se o gráfico apresentado na Figura 20.

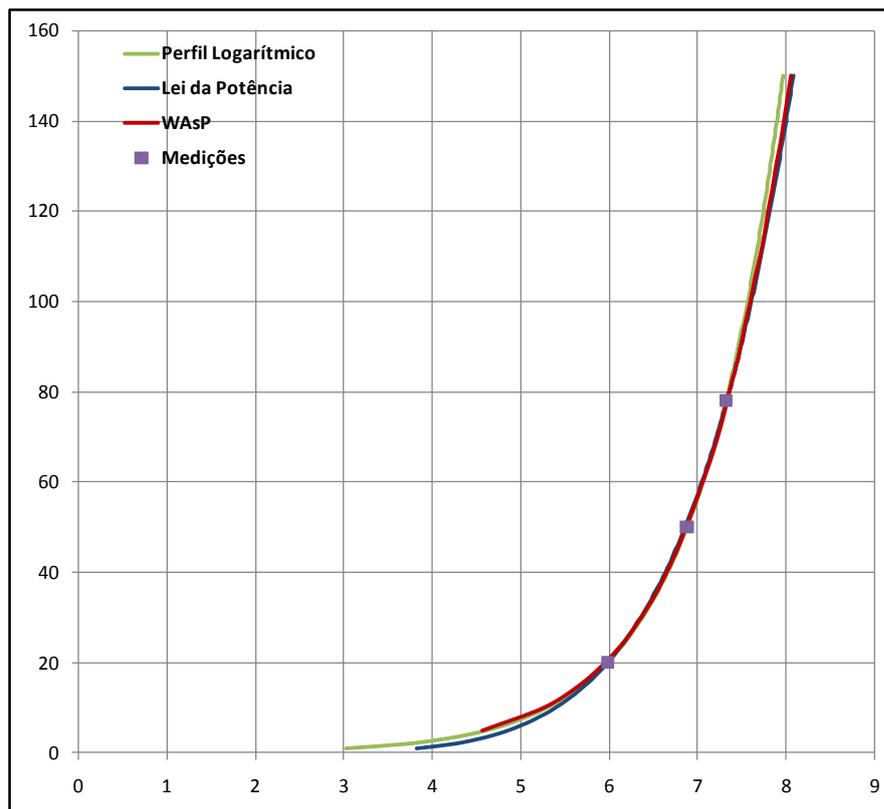


Figura 20 – Perfil vertical WASP para atmosfera neutra em comparação com medições diurnas, eixo x [m/s] e eixo y [m].

Observa-se que, ajustando os parâmetros que definem a estabilidade atmosférica para o gradiente de temperatura medido na área, o perfil vertical do WASP durante o dia coincide fortemente com a medição, em relação à extrapolação realizada de 50 para 78 metros.

Com a comparação dos perfis verticais calculados pelo WASP em relação aos extrapolados através da lei logarítmica durante o dia e a noite, verifica-se que o maior erro do WASP é na extrapolação vertical do período diurno. Conclui-se que o envelope padrão WASP considera a estratificação atmosférica mais estável na média do que a da região estudada, logo, para melhorar o perfil vertical calculado pelo WASP, deve-se ajustar as entradas da estratificação atmosférica para uma atmosfera um pouco menos estável.

O ajuste do *heat flux offset* que mais se aproximou do perfil vertical da região estudada foi com o valor de -19 W/m^2 . Observa-se na Figura 21 que os perfis verticais calculados e medidos ficam muito mais próximos para a média de todo ano de medição após os devidos ajuste de parâmetros.

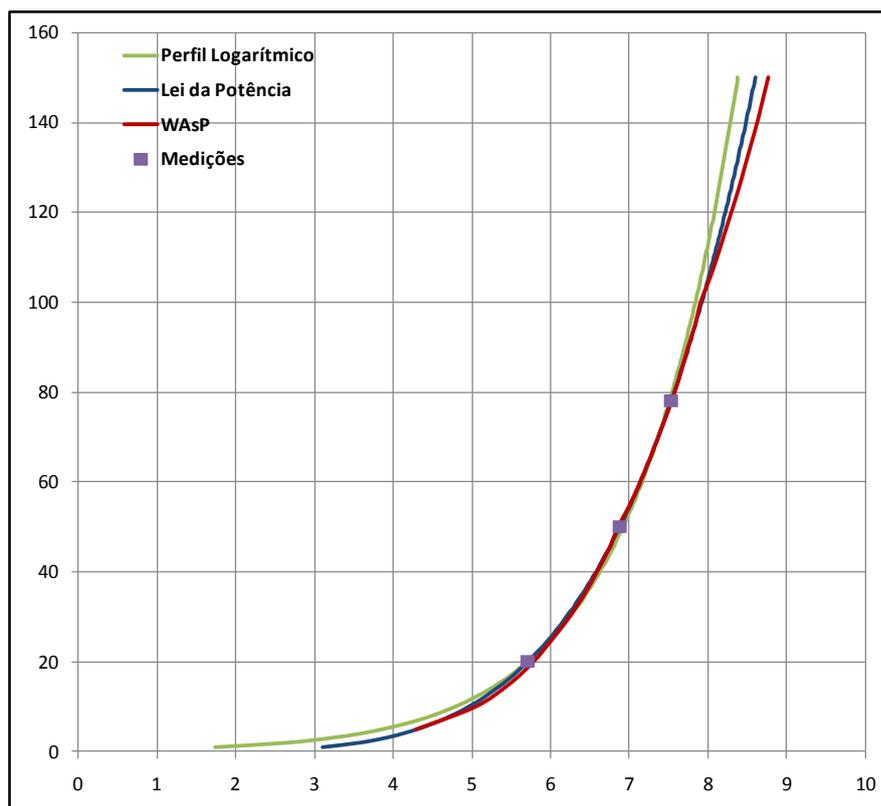


Figura 21 – Perfis verticais calculados e medidos após ajustes dos padrões do modelo, eixo x [m/s] e eixo y [m].

3.3.2.2 Parâmetros de altura e rugosidade

Os parâmetros padrão de altura e rugosidade do modelo WAsP devem ser ajustados de modo que sejam representativos para área de interesse, conforme apresentado na Figura 22.

Realizou-se a alteração dos valores padrão de alturas para coincidir com as alturas das medições realizadas nas torres anemométricas. Os valores padrões de rugosidade foram alterados para incluir os valores presentes na área em questão.

Parameter	Minimum	Maximum	Default	Value
No. of standard heights for atlas file	2	5	5	5
Std. height #1	5	200	10	10
Std. height #2	5	200	25	20
Std. height #3	5	200	50	50
Std. height #4	5	200	100	78
Std. height #5	5	200	200	100
No. of standard roughnesses for atlas file	2	5	4	4
Std. roughness #1	0	2	0	0
Std. roughness #2	0	2	0,03	0,05
Std. roughness #3	0	2	0,1	0,1
Std. roughness #4	0	2	0,4	0,2
Std. roughness #5	0	2	1	0,3

Figura 22 – Ajuste dos parâmetros padrão de altura e rugosidade.

3.3.3 Mapa eólico WAsP

Para calcular os mapas eólicos são inseridos os dados provenientes da modelagem da topografia e da rugosidade no software WAsP, assim como os dados de vento tratados das duas torres anemométricas. Com esses dados de entrada e o valor estipulado para altura do mapa eólico em 78 metros é gerado o mapa eólico do WAsP.

O mapa eólico gerado é um mapa de duas dimensões simétrico com valores da velocidade média do vento extrapolados horizontalmente a cada 100 metros, neste caso com altura de 78 metros.

3.4 WindSim

3.4.1 Ferramenta *transfer climatology*

O mapa eólico gerado pelo WindSim é simétrico em relação a área que está sendo modelada. Para poder fazer uma estimativa cruzada de um ponto específico para outro, o WindSim disponibiliza uma ferramenta chamada *transfer climatology*, que foi utilizada para estabelecer as estimativas cruzadas entre a torre 1 e torre 2.

Transferir climatologias é muito útil para realizar estimativas cruzadas. Essa ferramenta transfere uma climatologia existente na área para outro ponto específico, considerando as influências topográficas e de rugosidade entre esses dois pontos.

Foram realizadas todas as estimativas cruzadas possíveis entre as duas torres. Como foram medidas variáveis do vento em três níveis de cada torre, foram realizadas ao todo 9 análises para cada torre.

3.4.2 Mapa eólico WindSim

Para calcular os mapas eólicos, são inseridos os dados provenientes da modelagem da topografia e da rugosidade no software WindSim, assim como os dados de vento tratados das duas torres anemométricas. Com esses dados de entrada e o valor estipulado para altura do mapa eólico em 78 metros é gerado o mapa eólico do WindSim.

O mapa eólico gerado é um mapa de duas dimensões simétrico com valores da velocidade média do vento extrapolados horizontalmente a cada 130 metros, neste caso com altura de 78 metros.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Estimativas cruzadas entre as torres

Nesta etapa serão analisados os desvios entre os valores estimados da velocidade média do vento através dos modelos WAsP e WindSim e os valores efetivamente medidos em campo na região de interesse. Essa comparação é realizada utilizando as ferramentas de estimativas cruzadas presentes nos softwares. Serão comparadas estimativas entre diferentes alturas para todos os níveis de medição. A Figura 23 demonstra um exemplo das medições a 50 metros na torre 1 sendo extrapolada para os níveis de 20, 50 e 78 metros na torre 2.

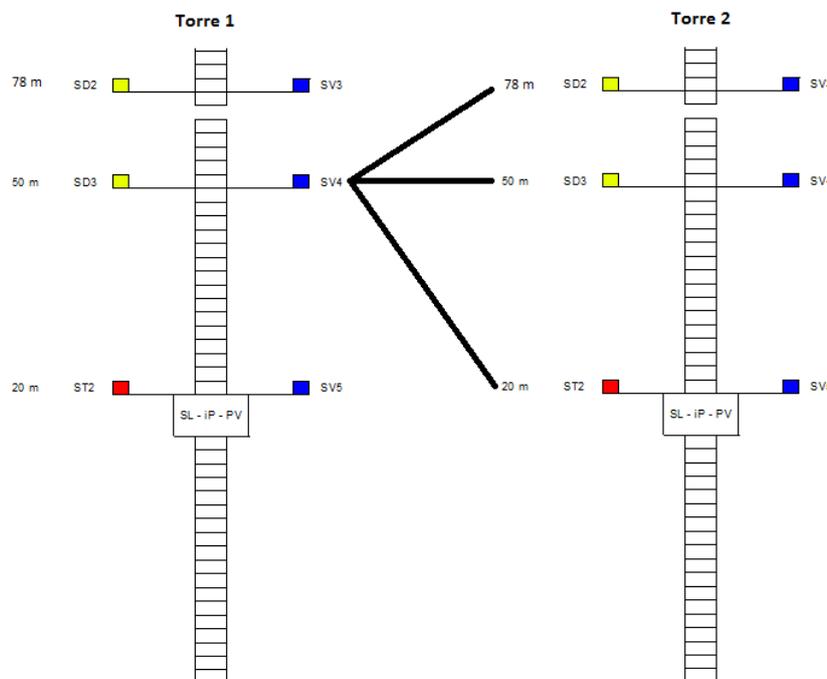


Figura 23 – Esquemático das medições a 50 metros da torre 1 sendo extrapoladas para os níveis de 20, 50 e 78 metros da torre 2.

4.1.1 Estudo com parâmetros padrão

Para a primeira estimativa cruzada entre as torres foram utilizados todos os valores padrões de entrada dos modelos utilizados pelo WindSim e WAsP. A Tabela 8 e a Figura 24 apresentam o resumo dos resultados obtidos das transferências da torre 1 para a torre 2.

Tabela 8 – Desvios em relação à medição para transferência climatológica da torre 1 para torre 2.

Transferência Torre 1 para Torre 2	Desvios em relação à medição [%]	
	WindSim	WAsP
78-78	0,65	2,70
50-50	-0,33	1,40
20-20	-0,10	3,40
78-50	0,48	-0,40
78-20	-0,14	-0,70
50-20	-0,95	1,10
50-78	-0,14	4,50
20-78	1,35	6,90
20-50	1,11	3,70
Média Aritmética	0,21	2,51
Média Quadrática	2,18	10,21

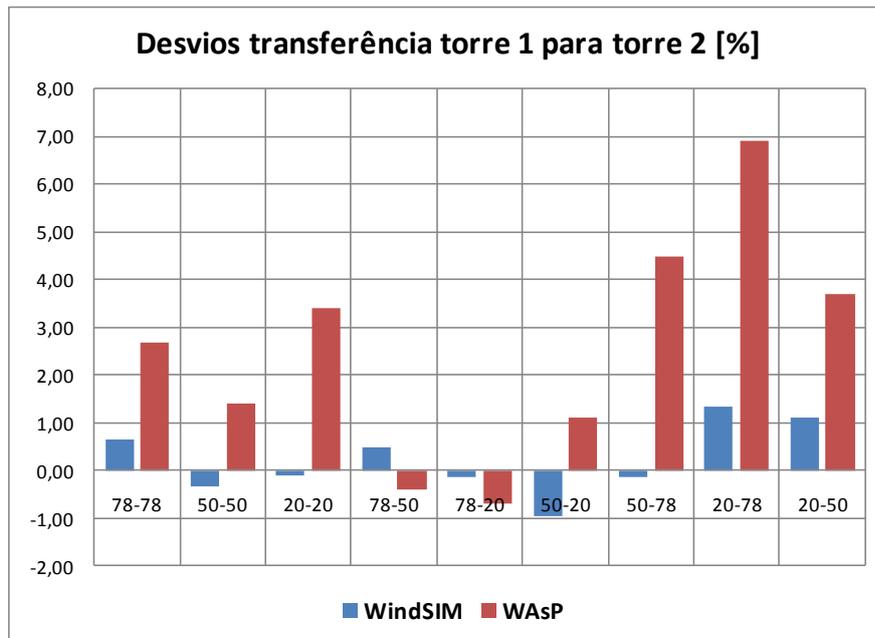


Figura 24 – Desvios em relação à medição para transferência climatológica da torre 1 para torre 2.

A Tabela 9 e a Figura 25 apresentam o resumo dos resultados obtidos da transferência da torre 2 para a torre 1.

Tabela 9 - Desvios em relação à medição para transferência climatológicas da torre 2 para torre 1.

Transferência Torre 2 para Torre 1	Desvios em relação à medição [%]	
	WindSim	WAsP
78-78	-0,37	-1,70
50-50	0,59	-1,40
20-20	0,35	-2,80
78-50	0,43	-4,00
78-20	-1,03	-5,80
50-20	-0,86	-3,40
50-78	-0,21	0,90
20-78	0,38	1,40
20-50	1,22	-0,90
Média Aritmética	0,06	-1,97
Média Quadrática	2,07	8,80

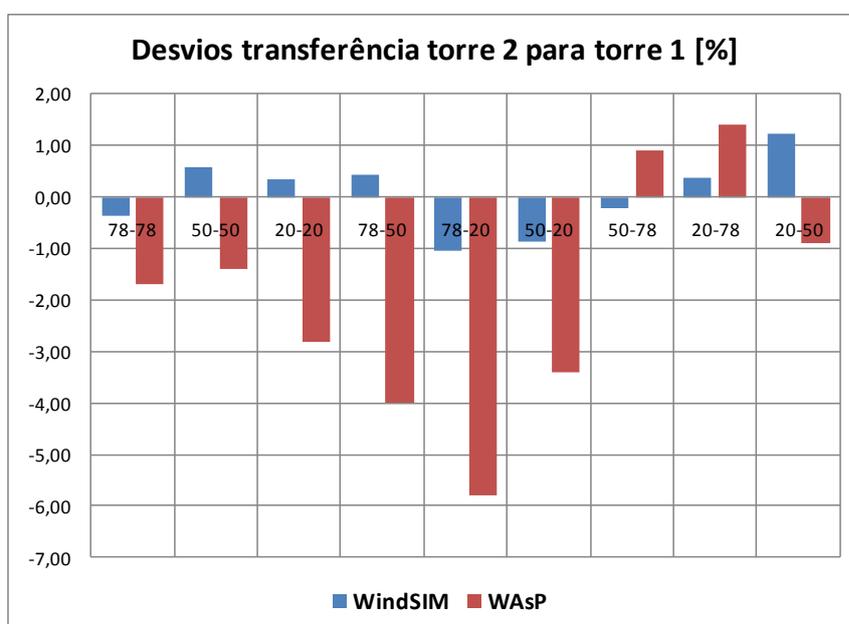


Figura 25 – Desvios em relação à medição para transferência climatológica da torre 2 para torre 1.

4.1.2 WAsP

Para avaliação dos resultados considera-se que as extrapolações calculadas pelo modelo podem ser divididas em duas etapas: extrapolação vertical e extrapolação horizontal.

O primeiro passo para investigar os desvios em relação as medições da velocidade do vento é verificar a extrapolação vertical pura. Considerando somente as medições em diferentes níveis da torre 1, pode ser visto na Figura 26 o perfil vertical do ponto da torre 1. Neste primeiro caso a extrapolação vertical WAsP é realizada utilizando medições a 20 metros.

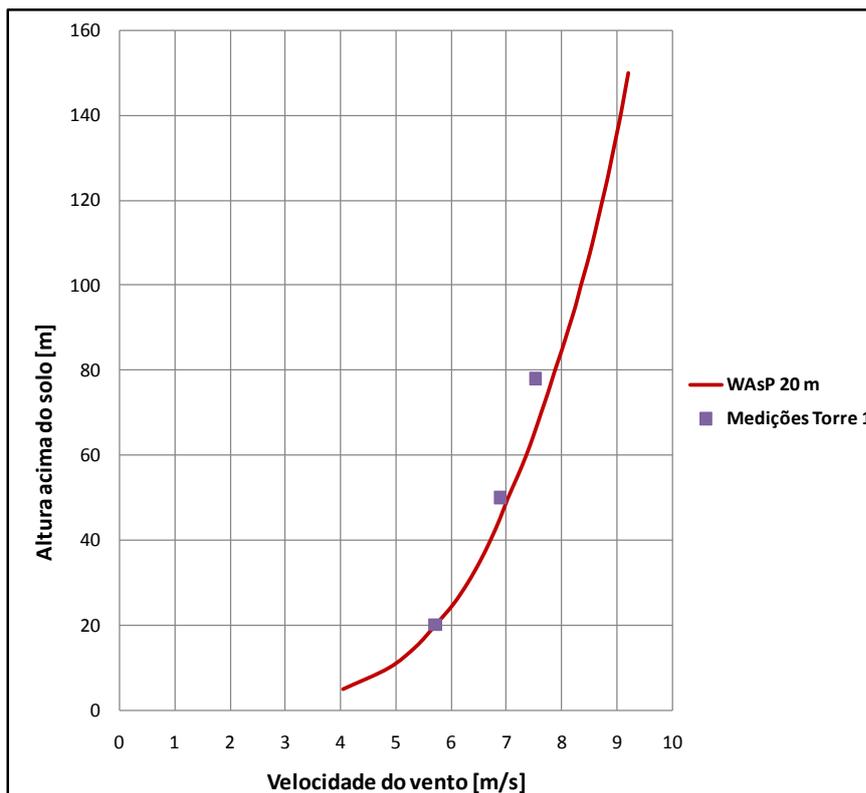


Figura 26 - Perfil vertical das medições na torre 1, utilizando medições a 20 metros.

De acordo com a Figura 26 verifica-se uma tendência em sobre estimar os valores quando extrapolados verticalmente de um nível menor para um nível maior. Sendo os desvios em relação à medição mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Desvios em relação as medições.

	Desvios em relação medições Torre 1-1 [%]
de 20 m para 78 m	3,98
de 20 m para 50 m	2,18

Verifica-se acima a contribuição do desvio resultante da extrapolação vertical de um nível mais baixo para um mais alto da torre 1, onde observa-se uma sobre estimativas em relação às medições neste caso.

Observando os desvios encontrados na transferência climatológica da torre 1 para torre 2 verifica-se que além da contribuição da sobre estimativa vertical ainda há uma sobre estimativa na extrapolação horizontal. Como visto, isso provavelmente deve-se ao fato do modelo utilizado pelo WASP tender a sobre estimar quando a extrapolação horizontal é realizada com as medições em um nível mais alto para um nível mais baixo.

Abaixo, a Figura 27 apresenta a extrapolação vertical WASP utilizando medições a 50 metros.

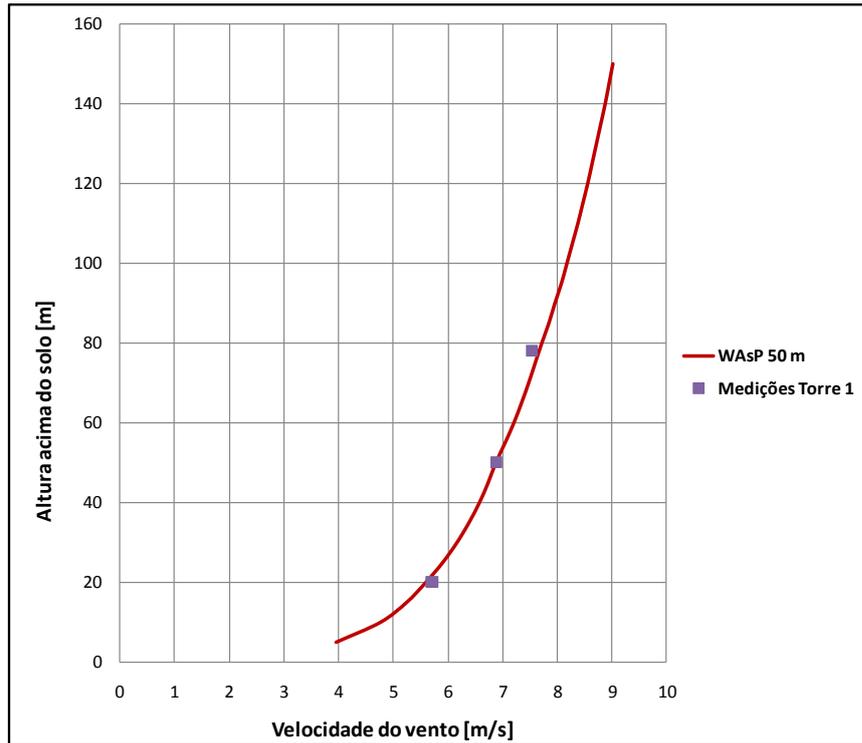


Figura 27 - Perfil vertical na torre 1, utilizando medições a 50 metros.

Os desvios em relação à medição são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Desvios em relação as medições

	Desvios em relação medições Torre 1 [%]
de 50 m para 78 m	1,73
de 50 m para 20 m	-2,10

Verifica-se acima a contribuição do desvio resultante da extrapolação vertical de um nível mais baixo para um mais alto da torre 1, onde observa-se uma sobre estimativas em relação às medições neste caso.

Verifica-se também a contribuição do desvio resultante da extrapolação vertical de um nível mais alto para um nível mais baixo da torre 1, onde observa-se neste caso uma sub estimativas em relação às medições.

Observando os desvios encontrados na transferência climatológica da torre 1 a 50 m para torre 2 a 78 metros verifica-se que além da contribuição da sobre estimativa vertical ainda há uma sobre estimativa na extrapolação horizontal. Como visto, isso provavelmente deve-se ao fato do modelo utilizado pelo WAsP tender a sobre estimar quando a extrapolação horizontal é realizada com as medições em um nível mais alto para um nível mais baixo.

Também observa-se que o baixo valor encontrado na transferência climatológica da torre 1 a 50 metros para torre 2 a 20 metros deve-se ao contrabalanceamento da tendência neste caso de sub estimar na extrapolação vertical e sobre estimar na extrapolação horizontal.

Abaixo, a Figura 28 apresenta a extrapolação vertical WAsP utilizando medições a 78 metros.

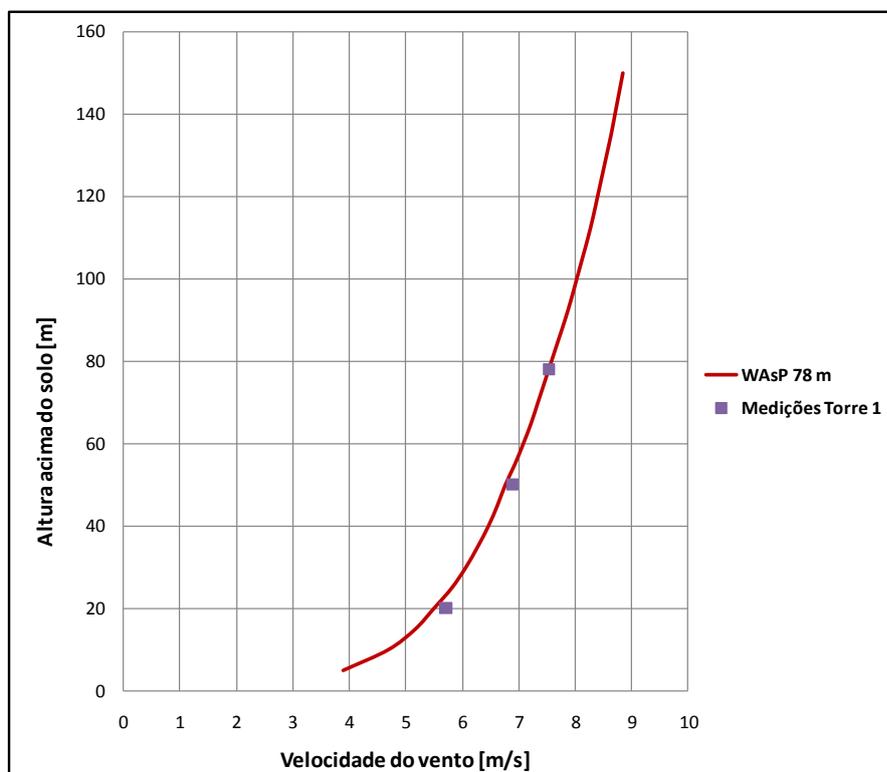


Figura 28 - Perfil vertical na torre 1, utilizando medições a 78 m.

Os desvios em relação à medição são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Desvios em relação as medições.

	Desvios em relação medições Torre 1 [%]
de 78 m para 50 m	-1,74
de 78 m para 20 m	-3,85

Verifica-se acima a contribuição do desvio resultante da extrapolação vertical de um nível mais alto para um nível mais baixo da torre 1, onde observa-se neste caso uma sub estimativas em relação às medições.

Observa-se que o baixo valor encontrado na transferência climatológica da torre 1 a 78 metros para torre 2 a 50 e a 20 metros deve-se ao contrabalanceamento da tendência neste caso de sub estimar na extrapolação vertical e sobre estimar na extrapolação horizontal.

Em relação aos desvios da transferência climatológica da torre 2 para torre 1 verifica-se que na extrapolação vertical ocorreu a mesma tendência. Já na extrapolação horizontal ocorreu o contrário, com valores sendo sub estimados devido a medição ser em um nível mais baixo e a extrapolação para um nível mais alto. Por isso o contrabalanceamento dos erros ocorreu justamente para as extrapolações entre um nível baixo para um nível mais alto.

Sabe-se que a região estudada não está totalmente em acordo com o envelope padrão WAsP. Conforme apresentado a estratificação atmosférica da região é menos estável que a modelada pelo WAsP, isto acarreta em erros nas extrapolações verticais, neste caso um sobre estimativa quando a extrapolação é feita de um nível menor para um nível maior e uma sub estimativa para o contrário.

Com esses estudos verifica-se o erro na extrapolação vertical quando são utilizados o dados de entrada do envelope padrão WAsP. Para diminuir os erros na extrapolação vertical deve-se ajustar os parâmetros da estabilidade atmosférica de acordo com o apresentado na Seção 3.3.2.

4.1.3 Estudo com ajuste de parâmetros

Utilizando os ajustes dos parâmetros padrão do modelo WAsP são realizadas novamente comparações cruzadas entre as torres, abaixo a Tabela 13 e Figura 29 apresentam os desvios na velocidade média do vento resultantes das transferências climatológicas da torre 1 para torre 2.

Tabela 13 – Desvios após ajustes parâmetros do modelo WAsP da torre 1 para torre 2.

Transferência	Desvios em relação à medição [%]	
	WindSim	WAsP
78-78	0,65	2,1
50-50	-0,33	1,4
20-20	-0,1	3,1
78-50	0,48	1,2
78-20	-0,14	2,4
50-20	-0,95	2,7
50-78	-0,14	2,3
20-78	1,35	2,7
20-50	1,11	1,8
Média Aritmética	0,21	2,19
Média Quadrática	2,18	6,80

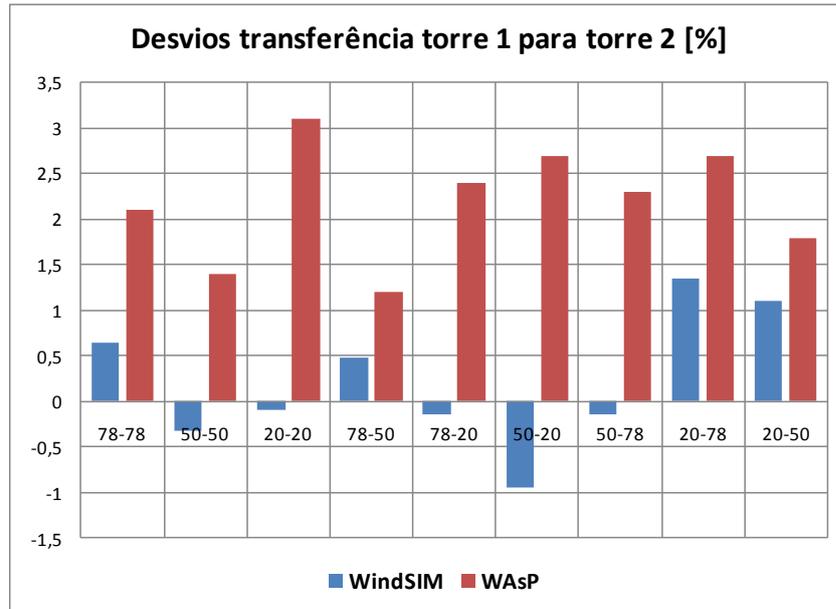


Figura 29 – Desvios em relação à medição para transferência climatológica da torre 1 para torre 2.

A Tabela 14 e Figura 30 apresentam os desvios na velocidade média do vento resultantes das transferências climatológicas da torre 2 para torre 1.

Tabela 14 - Desvios após ajustes dos parâmetros do modelo WAsP da torre 2 para torre 1.

Transferência Torre 2 para Torre 1	Desvios em relação à medição [%]	
	WindSim	WAsP
78-78	-0,37	-2,3
50-50	0,59	-1,4
20-20	0,35	-2,7
78-50	0,43	-2,5
78-20	-1,03	-2,9
50-20	-0,86	-1,8
50-78	-0,21	-1,2
20-78	0,38	-2,5
20-50	1,22	-2,7
Média Aritmética	0,06	-2,22
Média Quadrática	2,07	6,89

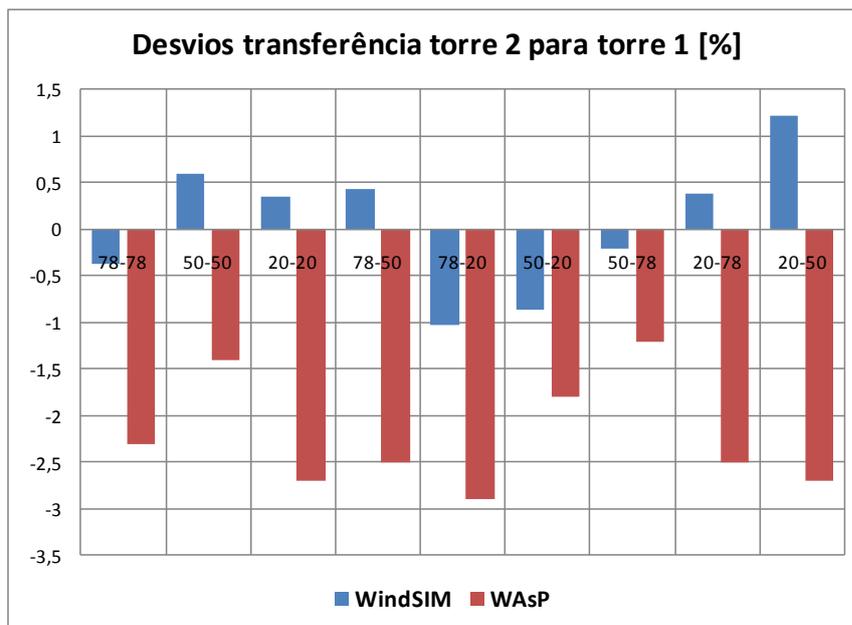


Figura 30 – Desvios em relação à medição para transferência climatológica da torre 2 para torre 1.

Observa-se que em geral os desvios WAsP tornam-se menores após os ajustes, com exceção dos desvios anteriores onde os erros eram contrabalanceados. Verifica-se que os desvios quadráticos em relação às medições ficaram menores, indicando um melhor acerto em relação aos desvios anteriores. Isto deve-se a diminuição dos erros na extrapolação vertical ao serem ajustados os parâmetros do modelo WAsP para representarem melhor a atmosfera local.

Pode-se concluir que os desvios apresentados são essencialmente provenientes da extrapolação horizontal. Visto que a torre 1 encontra-se em um nível 10 metros mais alto que a torre 2, os desvios encontrados provavelmente se devem a tendência do WAsP apresentada em estudos de sobre estimar quando a medição é realizada em um nível mais alto e em sub estimar no caso contrário no caso da extrapolação horizontal.

Outra possível causa que deve ser levada em consideração é a maior proximidade da torre 2 das bordas do platô (700 metros) enquanto a torre 1 está mais distante (1.500 metros). Como conhecido o modelo utilizado pelo WAsP apresenta dificuldades em representar o fluido próximo a inclinações fortes.

4.1.4 Resultados WindSim

Analisando a Tabela 13 verifica-se que os valores calculados pelo WindSim estão mais próximos das medições do que os valores calculados pelo WAsP.

A maior sobre estimativa calculada pelo software WindSim foi de 1,35% na transferência da climatologia da torre 1 na altura de 20 metros para a torre 2 na altura de 78 metros em relação as medições realizadas. A maior sub estimativa foi de 0,95% na transferência da climatologia da torre 1 na altura de 50 metros para a torre 2 na altura de 20 metros.

Não se pode concluir definitivamente que o WindSim tende a sobre estimar os valores medidos em relação aos calculado, pois ocorreram 4 sobre estimativas e 5 sub estimativas nos valores calculados e todas com desvio muito pequeno em relação à medição.

Analisando a Tabela 14 verifica-se que os valores calculados pelo modelo WindSim estão mais próximos das medições do que os valores calculados pelo modelo WASP. A maior sobre estimativa calculada pelo software WindSim foi de 1,22% na transferência da climatologia da torre 2 na altura de 20 metros para a torre 1 na altura de 50 metros em relação as medições realizadas. A maior sub estimativa foi de 1,03% na transferência da climatologia da torre 2 na altura de 78 metros para a torre 1 na altura de 20 metros.

Neste caso também não se pode concluir definitivamente que o WindSim tende a sobre estimar os valores medidos em relação aos calculado, pois ocorreram 5 sobre estimativas e 4 sub estimativas nos valores calculados e todas com desvio muito pequeno em relação à medição.

Mesmo utilizando as entradas padrão, os valores calculados pelo WindSim se aproximaram muito das medições realizadas, porém ressalta-se que normalmente se utiliza o WindSim para modelar regiões com topografia complexa e para validar suas modelagens deve-se ter torres de medições em pontos estratégicos da área. Esses pontos estratégicos devem ser localizados em pontos da área em estudo com grandes diferença de elevação.

Apesar da região estudada ter um relevo moderadamente complexo, com áreas com inclinação maior que 17° , as torres de medição se encontravam todas em um platô, logo não pôde-se comprovar a eficácia total do software WindSim, somente comprovar sua correta estimativa para uma medição feita em níveis com 10 metros de diferença.

Para comprovar toda capacidade do WindSim em modelar mapas eólicos em terrenos complexos seriam necessárias mais torres de medição fora do platô e em picos ou vales com inclinações maiores que 17° .

4.2 Mapas Eólicos

Os mapas eólicos gerados foram realizados considerando a altura de 78 metros para que não seja necessária uma extrapolação vertical. Isso foi feito visando a comparação somente entre as estimativas horizontais entre os modelos WAsP e WindSim.

Para ambos os softwares foram utilizados os dados medidos na torre 1 e 2 a 78 metros para modelagem do mapa.

4.2.1 WAsP

A Figura 31 apresenta o mapa eólico gerado através da ferramenta WAsP, com escala da intensidade do vento mostrada na esquerda, baseado na velocidade média anual. Esse mapa eólico foi calculado pela ferramenta através das medições provenientes da torre 1 e 2.

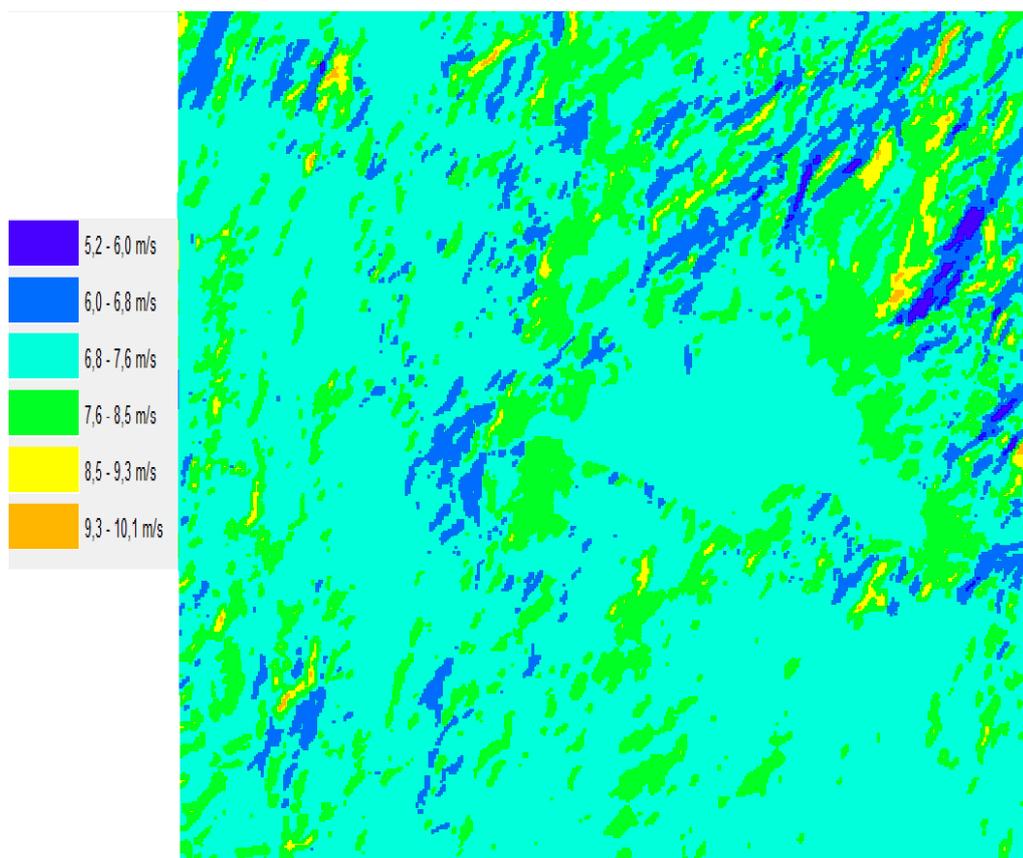


Figura 31 – Mapa eólico WAsP.

4.2.2 WindSim

A Figura 32 apresenta o mapa eólico gerado através do método CFD da ferramenta WindSim, com escala da intensidade do vento mostrada na esquerda, baseado na velocidade média anual.

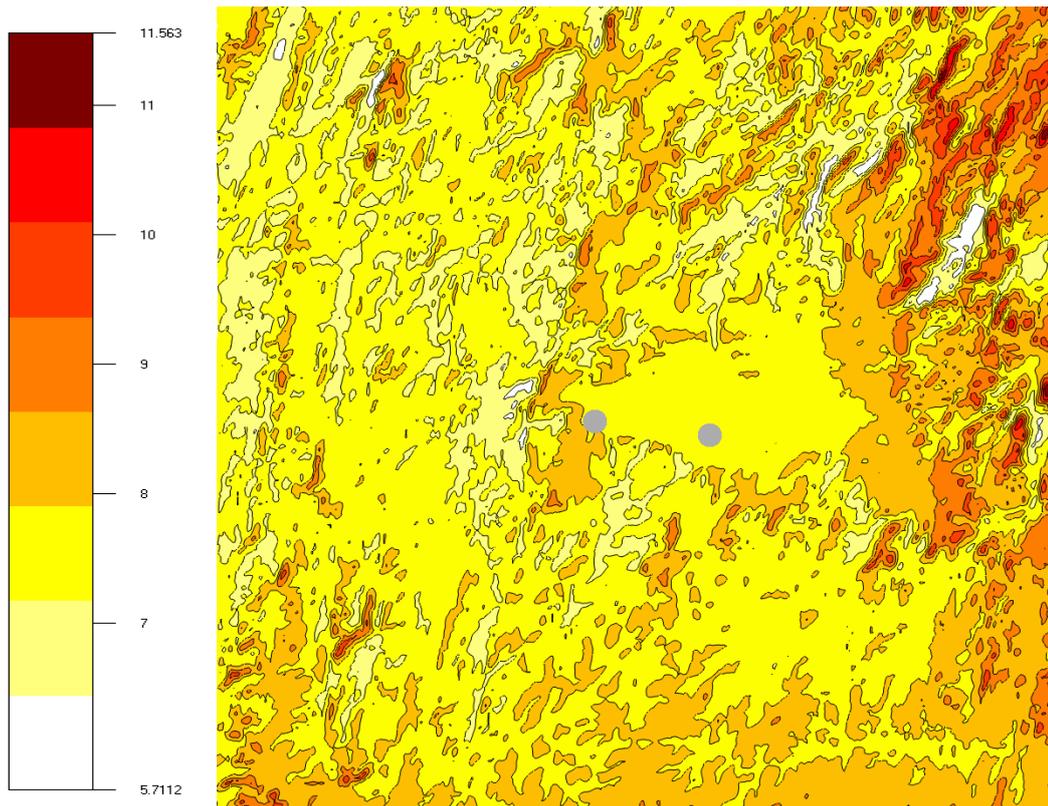


Figura 32 – Mapa eólico WindSim.

4.2.3 Comparação WAsP x WindSim

A única análise que pode ser realizada em relação aos mapas eólicos gerados é comparativa entre os dois software. Não se pode afirmar qual deles teve um melhor desempenho no geral, pois como citado anteriormente as medições foram realizadas somente no platô. Logo não será possível verificar o desempenho real dos mesmos nas estimativas horizontais entre zonas de grandes variações topográficas.

As diferenças entre os mapas eólicos podem ser verificadas na Figura 33 que apresenta o mapa de razões entre os mapas eólicos gerados pelos modelos WAsP e WindSim, sendo os valores computados como WAsP/WindSim. Logo, para valores maiores que 1 o WAsP tendeu

a sobre estimar as extrapolações em relação ao WindSim, e para valores menores que 1 o WAsP tendeu a sub estimar as extrapolações em relação ao WindSim.

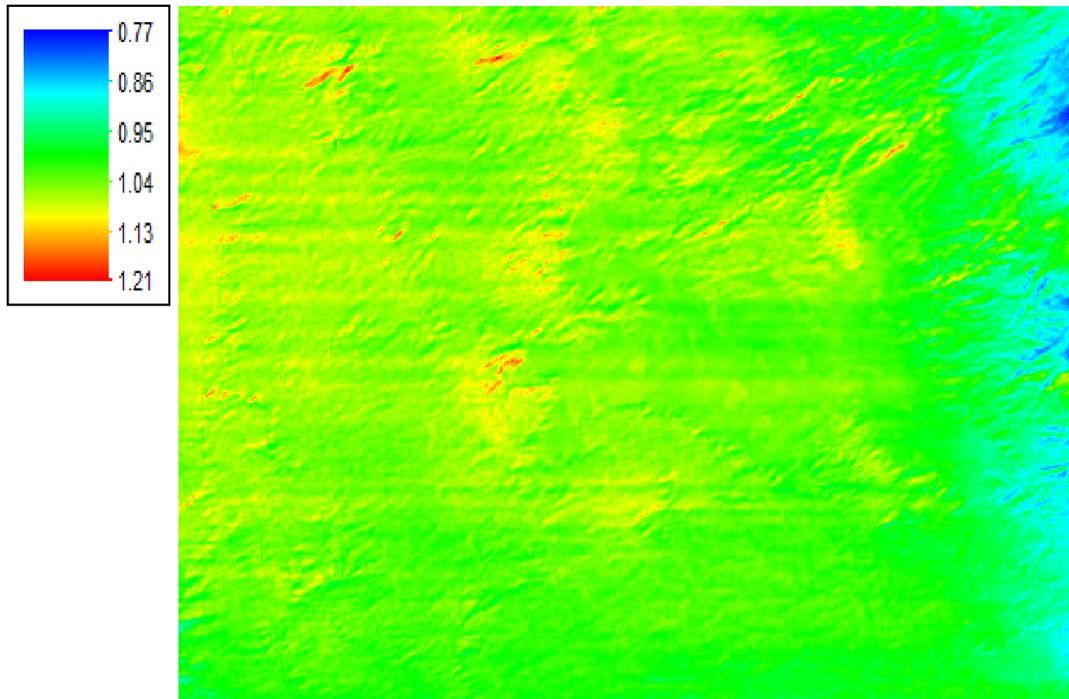


Figura 33 – Comparação mapas eólicos WindSim x WAsP.

Quando é realizada uma comparação visual entre o mapa de diferenças e o mapa de inclinações, cujas áreas vermelhas são áreas cujas inclinações ultrapassam os 15° verifica-se que nessas áreas estão concentrados as maiores diferenças das estimativas do WAsP em relação ao WindSim. A Figura 34 mostra do lado esquerdo a comparação dos mapas eólicos e do lado direito o mapa de inclinações com as áreas dos maiores desvios ressaltadas.

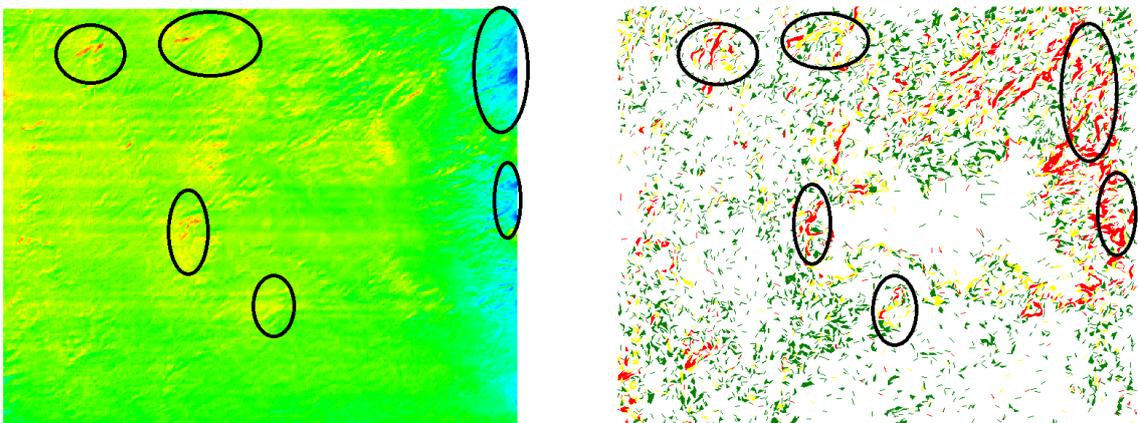


Figura 34 – Comparação mapas eólicos WindSim x WAsP (esquerda) e mapa de inclinações (direita) com áreas dos maiores desvios ressaltadas.

Nesse mapa encontram-se sobre estimativas na intensidade do vento de até 21% do mapa eólico WAsP em relação ao WindSim quando realizadas extrapolações de um nível mais baixo para um nível mais alto. Observa-se também sub estimativas de até 23 %, quando realizadas de um nível mais alto para um nível mais baixo.

Uma das prováveis causas dessas diferenças é a limitação do modelo WAsP em modelar recursos eólico entre regiões com inclinações maiores que 17° . Para esses casos estudos mostram que há uma tendência já citada do WAsP de sobre estimar valores quando extrapolados horizontalmente de um nível mais baixo para um nível mais alto e sub estimar quando extrapolados horizontalmente de um nível mais alto para um nível mais baixo, considerando que entre esses níveis há inclinações que ocasionem descolamento do fluido.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo CFD utilizado pelo WindSim mostrou-se com uma maior capacidade de gerar campos eólicos precisos para o caso estudado em relação ao modelo utilizado pelo WASP comparando com as medições em torres distribuídas no local.

O caso foi estudado numa área de complexidade topográfica moderada, as torres de medições utilizadas encontravam-se todas na parte de cima de um platô que estava contido dentro de região estudada. Não haviam medições em lugares que seriam importantes para verificação mais profunda da capacidade dos modelos em extrapolar horizontalmente.

Na Tabela 15 são mostrados o nível de profundidade que foram atingidos com os recursos disponíveis para o estudo.

Tabela 15 – Nível das análises.

Extrapolação	Nível de análise	Motivo
Vertical	Rica	Medições em 3 alturas diferentes
Horizontal < 17°	Média	Pouca diferença nas altitudes e rugosidades entre as torres anemométricas
Horizontal > 17°	Comparativa	Não há torres anemométricas em lugares estratégicos para avaliações

Não foi possível verificar toda capacidade do modelo CFD de estimar campos em áreas com inclinações superiores a 17°, assim como também não pode ser comprovada essa limitação no WASP por não haver torres de medição em lugares estratégicos para tal comparação.

Comprovou-se a importância da realização de uma campanha de medição que siga normas internacionais para haver a melhor qualidade possível nos dados de vento.

Com a utilização de dois modelos de maior importância no meio eólico pode-se verificar o desempenho de cada um deles em relação às medições locais assim como o comparativo dos mapas eólicos gerados por esses modelos.

Mostrou-se o risco de utilizar esses modelos como uma “caixa preta” sem conhecimento dos envelopes padrões utilizados e os erros provenientes da não consideração das características da atmosfera local.

Pode-se notar a importância de medir não só a direção e intensidade do vento em variadas alturas, mas também a temperatura em níveis diferentes para verificação da estabilidade atmosférica através do gradiente de temperatura da área. Verificou-se a limitação

e riscos da utilização de métodos indiretos para estimar a estabilidade atmosférica de um local. Conclui-se que sempre o mais seguro é realizar a medição local.

Foi mostrado para esse caso a tendência do WASP em sobre estimar o perfil vertical de vento quando as medidas são feitas em um nível mais baixo e a estimativa é calculada para um nível mais acima, no caso da atmosfera estudada ser menos estável que a dos parâmetros padrão do modelo WASP, e a tendência de sub estimar na situação contrária.

Estudos futuros devem ser realizados em áreas cuja estabilidade atmosférica seja mais intensamente diferente dos padrões dos softwares utilizados. Principalmente verifica-se a importância do maior conhecimento da estabilidade atmosférica do nordeste do Brasil.

Recomendam-se maiores estudos na definição dos padrões de rugosidade, visando abranger uma maior gama de coberturas de terreno assim como estudos para melhor caracterização das rugosidades existentes no interior do nordeste do Brasil.

Recomenda-se para comprovação final da precisão da modelagem dos campos eólicos instalar mais torres de medições em lugares estratégicos, que possam comprovar a capacidade do modelo CFD em estimar velocidade onde há separação do fluxo de vento. Ainda há muita discussão sobre quantas torres são realmente necessárias para correta modelagem eólica de terrenos, principalmente em áreas com topografia complexa.

Trabalhos futuros deveriam agregar às ferramentas analisadas parâmetros que pudessem utilizar os valores de estabilidade atmosférica numa base pelo menos horária para cálculos eólicos, devido a variação do gradiente de temperatura no decorrer do dia. Visto o conhecido diferente rendimento de geração de energia dos aerogeradores frente a variação do gradiente de temperatura, fornecendo assim resultados mais exatos para cálculos energéticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. ANEEL. **BIG - Banco de Informações de Geração**, 2011. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>>. Acesso em: Fevereiro 2011.

AHRENS, C. D. **Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere**. 5^a. ed. Belmont: Thomson Learning Inc., 2008. ISBN 0-495-11558-4.

ALBRECHT, C.; KLESITZ, M. Three-dimensional Wind Field Calculation Above Orographic Complex Terrain in Southern Europe. **AL-PRO**, Germany, 2006.

ANEEL. **Resolução Normativa N°391, de 15 de dezembro de 2009**. Brasília. 2009.

BERGE, E.; GRAVDHAL, A. Wind in complex terrain. A comparison of WAsP and two CFD-models. **Kjeller Vindteknikk AS**, 2006.

BOWEN, A. J.; MORTENSEN, N. G. **Exploring the limits of WAsP - The wind Atlas analysis and application program**. Anais. Goteborg, Sweden: Proc. Euro. Union Wind Energy Conference. 1996. p. 584 - 587.

BOWEN, A. J.; MORTENSEN, N. G. **WAsP prediction errors due to site orography**. Denmark. 2004.

CHEREMISINOFF, N. P. **Handbook of Air Pollution Prevention and Control**. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2002. 283-284 p. ISBN 0-7506-7499-7.

CHIEN, P. Endeavour maps the world in three dimensions.. **Geoworld**, v. 37, p. 32-38, 2000.

DORWEILER, R. P. **Aplicação de Modelagem de Turbulência na Camada Limite Atmosférica**. Belém: Universidade Federal do Pará, 2007.

EMD. **Torrild - WindSIM - Case Study**. Denmark. 2007.

FROST, W. . N. D. K. **Summary of Guidelines for Siting Wind Turbine Generators Relative to Small-Scale, Two-Dimensional Terrain Features**. Tennessee. 1979.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Wind turbine generator systems. **IEC 61400-12**, Geneva, 1998.

LLOMBART, A. et al. **Performance analysis of wind resource assessment programs in complex terrain**. Zaragoza - Spain: Department of Electrical Engineering Zaragoza University, 2007.

MOHAN, M.; SIDDIQUI, T. A. Analysis of various schemes for the estimation of atmospheric stability classification. **Atmospheric Environment**, Nova Deli, v. 32, n. 21, p. 3775-3781, Agosto 1998. ISSN 1352-2310.

MOREIRA, D. M.; TIRABASSI, T.; MARCELO, M. R. D. Meteorologia e poluição atmosférica. **Ambiente & sociedade**, Campinas, v. XI, n. 1, p. 1-13, Janeiro-Junho 2008. ISSN 1414-753X.

MORTENSE, N. G. et al. **Wind atlas analysis and application program: WASP 8 hep facility**. Roskilde, Denmark. 2005.

PEREIRA, R.; GUEDES, R.; SANTOS, C. S. Comparing WASP and CFD wind resource estimates for "regular" user. **Megajoule**, Portugal, 2010.

RISO. **WASP best practices and check list**. Dinamarca. 2010.

ROEDEL, W. **Physik unserer Umwelt – Die Atmosphäre**. Verlag: Springer, 2000.

ROHATGI, J. S. **Wind characteristics: An analysis for the generation of wind power**. 1^a. ed. Canyon: Alternative Energy Institute, West Texas A&M University, 1994. ISBN 0808714783.

SILVA, C. C. **Análise dos Aspectos Meteorológicos e Estruturais na Geração de Energia Elétrica de Centrais Eólicas**. Recife: UFPE, 2006. Dissertação (Mestrado em Energia Eólica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPE, 2006.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. New York : Kluwer Acad. Publis. 1988. p. 666 p.

SVENNINGSSEN, L. **WAsP in WindPRO**. Aalborg. 2010.

THEODOROPOULOS, P.; DELIGIORGIS, N. **Wind CFD Model Validation in Mixed Coastal & Mountainous Region With Complex Terrain**. Laboratory of Istos Renewables Ltd. Greece. 2010.

VALENÇA, D. A. **Proposição de um metodologia para a avaliação do aproveitamento da energia eólica em ambiente urbano**. Recife: UFPE, 2010. Dissertação (Mestrado em Energia Eólica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPE, 2010.

VIEIRA, C. F. A. **Sensibilidade do Modelo WAsP aos Efeitos da Estabilidade Atmosférica no Nordeste do Brasil**. Fortaleza: UECE, 2008. Dissertação - Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas - Programa de Pós-Graduação, UECE, 2008.

WALLBANK, T. **WindSim Validation Study**. Tenessee. 2008.

APÊNDICE A – INSTRUMENTOS DA CAMPANHA DE MEDIÇÃO

A TORRE

As torres mais utilizadas em campanhas de medição tem o formato circular ou triangular. Elas devem influenciar ao mínimo nas medições. As hastes a serem colocadas nas torres devem ser dispostas na direção de menor influência da torre. Na Figura 35, dimensões de uma torre típica triangular treliçada, feita para atingir até 100 metros de altura.

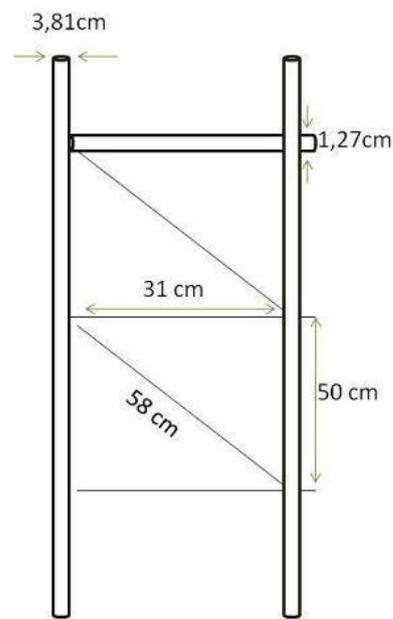


Figura 35– Dimensões típicas de uma torre anemométrica treliçada triangular.

B HASTES

As hastes servem para diminuir a interferência da torre nas medições, afastando os sensores para longe da torre. Em lugares conhecidos por terem ventos bastante unidirecionais o ideal é dispô-las perpendicular à essa direção principal numa torre com a “face” voltada para a direção principal do vento conforme Figura 36.

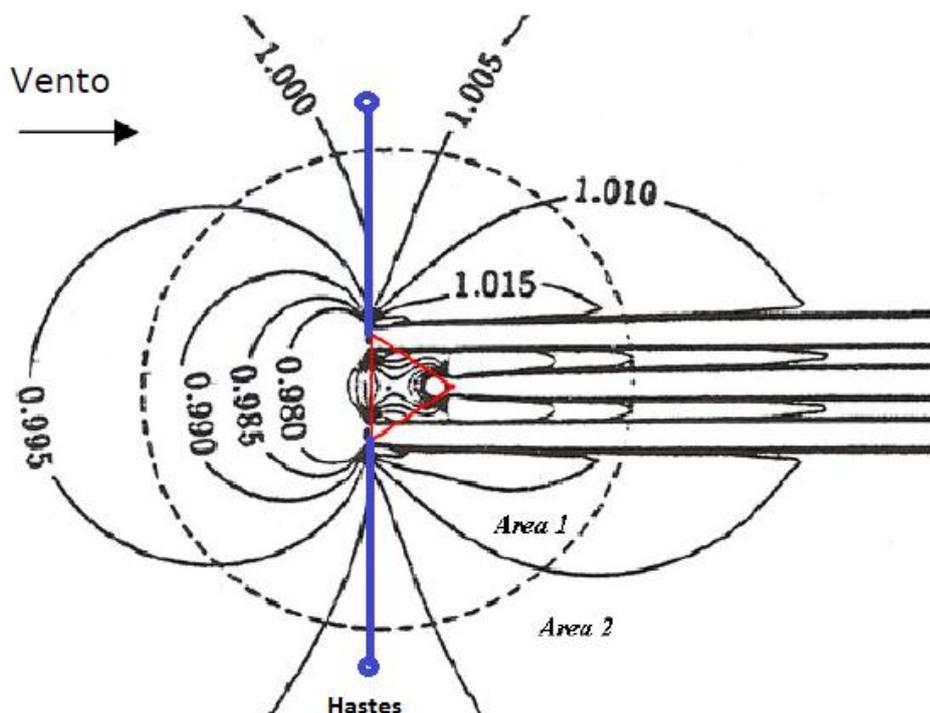


Figura 36 – Disposição ideal de hastes em regiões com ventos fortemente unidirecionais com linhas de influência da torre.

As dimensões das hastes devem obedecer padrões internacionais de modo que todo conjunto torre-haste interfiram ao máximo 0,5% nas medições do vento.

C SENSORES

i Anemômetro

O anemômetro é o sensor utilizado para medir a velocidade do vento. O anemômetro do tipo rotor vertical de conchas é considerado o mais preciso e indicado para campanhas de medição. Segundo a IEC61400-12 as medições da velocidade do vento devem ser realizadas com anemômetros de copo. A velocidade do vento que deve ser medida é definida como a média da componente horizontal, incluindo somente as componentes longitudinais e laterais, mas não as verticais.

O anemômetro utilizado na campanha deve ser calibrado antes e recalibrados após a campanha de medição. A diferença entre as linhas de regressão entre a calibração e recalibração devem estar entre $\pm 0,1$ m/s no intervalo de 6 a 12 m/s. Uma alternativa inferior à

recalibração é documentar que o anemômetro de copo manteve sua calibração durante todo o período de medição.



Figura 37 – Sensor de Vento - Anemômetro NRG #40.

O anemômetro deve ser montado na altura do rotor pretendido $\pm 2,5\%$, em relação ao solo.

ii Anemoscópio

O anemoscópio é o sensor utilizado para medir a direção do vento. De acordo com a IEC61400-12 a combinação de incertezas na calibração, operação e orientação do anemoscópio deve ser inferior a 5° .



Figura 38 – Sensor de direção - Anemoscópio NRG #200P.

Os sensores de temperatura e pressão devem ser montados o mais próximo possível da altura do rotor.

iii Sensor de Temperatura



Figura 39 – Sensor de temperatura – Termômetro NRG #110S.

iv Sensor de Pressão



Figura 40 - Sensor de pressão – Barômetro NRG #BP20.

D DADOS

Os dados provenientes dos sensores devem ser coletados continuamente numa taxa de amostragem mínima de 1 HZ, com exceção dos dados de temperatura, pressão e precipitação que podem ter uma taxa de amostragem maior, mas não menos que 1 vez a cada minuto.

O sistema de aquisição de dados deve armazenar os próprios dados amostrados ou séries estatísticas com pelo menos as seguintes informações:

- Valor médio;
- Desvio padrão;
- Valor máximo;
- Valor mínimo.

Os dados devem ser integralizados de medições contínuas em períodos de 10 minutos. Essas operações normalmente são feitas no Datalogger.

E NÚCLEO DE ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO



Figura 41 - Data logger SymphoniePLUS.

O *data logger* processa preliminarmente os dados provenientes dos sensores e armazena-os ou os envia automaticamente.