

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA MODELAGEM NUMÉRICA DO VENTO PARA AVALIAÇÃO DO
POTENCIAL EÓLICO EM UM TERRENO COMPLEXO EMPREGANDO CFD

Por

Vanessa Crippa Búrigo

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 29 de abril de 2014

ANÁLISE DA MODELAGEM NUMÉRICA DO VENTO PARA AVALIAÇÃO DO
POTENCIAL EÓLICO EM UM TERRENO COMPLEXO EMPREGANDO CFD

por

Vanessa Crippa Búrigo
Engenheira Mecânica

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

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

Aprovado por:

Prof. Dr. Acir Mércio Loredou Souza

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Prof^ª. Dr^ª. Sônia Magalhães dos Santos

Prof. Rogério José Marczak
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 29 de abril de 2014.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, de modo especial aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica;

À minha professora orientadora, Prof^a. Dr^a. Adriane Prisco Petry, o tempo disponibilizado, o conhecimento e a confiança transmitidos ao longo do trabalho;

Aos professores presentes na comissão de avaliação desta dissertação de mestrado;

Aos meus gestores e colegas da Enel Green Power, em especial a José Leopoldo Maza, o auxílio e conhecimento disponibilizados para a conclusão deste trabalho;

Aos meus gestores e colegas da Prowind Energias Alternativas, o apoio no início do desenvolvimento deste mestrado acadêmico;

Aos meus pais, Rogério Búrigo (*in memoriam*) e Rosane Maria Crippa Búrigo, o incentivo ao estudo, apoio nas minhas decisões e o exemplo transmitido durante toda minha vida;

Ao meu namorado, Mario Gaidzinski, o apoio, incentivo e compreensão no decorrer deste mestrado acadêmico;

Aos colegas do GESTE (Grupo de Ensaios Térmicos e Energéticos);

Aos amigos e colegas que me apoiaram no desenvolvimento deste trabalho.

*“Viver é como andar de bicicleta: é
preciso estar sempre em movimento
para manter o equilíbrio”*

Albert Einstein

RESUMO

O presente trabalho apresenta a modelagem do escoamento de ar sobre um terreno complexo empregando, e comparando os resultados, três programas comerciais de previsão de potencial eólico, WaSP, Meteodyn WT e WindSim. Por se tratar de um modelo simplificado, o programa WaSP nem sempre é adequado para previsão de energia em terrenos muito complexos pois não é capaz de prever turbulência, separação de escoamento e efeitos de estabilidade existentes neste tipo de terreno. Para que se consiga modelar a turbulência existente de maneira mais coerente, utilizam-se programas de mecânica dos fluidos computacional como o Meteodyn WT e o WindSim que modelam o escoamento através das equações médias de Reynolds.

A finalidade do estudo é identificar a capacidade de previsão das velocidades de vento por meio de cada um dos programas em um parque eólico localizado na Chapada da Diamantina, tendo em vista que a correta previsão da produção de energia depende de um entendimento correto e detalhado dos recursos disponíveis.

Avaliando apenas condição atmosférica neutra e comparando os resultados obtidos, conclui-se que o programa WindSim obteve o menor erro na estimativa da velocidade do vento, -3,7% quando comparado aos outros programas WaSP e Meteodyn, -5,1% e -6,5% respectivamente. O maior erro de aproximação foi obtido pelo programa WaSP, +11% quando comparado aos outros programas Meteodyn e WindSim, +10,6% e +7,9% respectivamente. Para o programa Meteodyn foram avaliados casos com diferentes condições de estabilidade, o erro máximo e mínimo foi de +10,6% e -6,5%, respectivamente em atmosfera estável, mantendo-se elevado.

O programa WindSim permite a alteração de variáveis que são fixas no Meteodyn e também a simulação dos efeitos de estabilidade através da inclusão da equação de energia inicializada através do comprimento de Monin-Obukhov o que, implicou em uma melhora significativa nos resultados obtidos e em um maior tempo computacional. O erro, menor e maior, apresentado pelo programa WindSim foi reduzido a, -1,8% e +4,4% respectivamente.

Destaca-se que as conclusões obtidas se aplicam ao caso estudado.

Palavras-chave: Energia Eólica, Dinâmica dos Fluidos Computacional - CFD, WaSP, Meteodyn, WindSim, Terrenos Complexos.

ABSTRACT

This work studies the air flow modeling over a complex terrain using and comparing the results of three commercial programs that estimates the wind field in a site: WaSP, Meteodyn WT and WindSim.

Being WAsP a simplified model, it is not always suitable to estimate the flow in complex terrain because it is not able to predict the turbulence, flow separations and stability effects present in these kind of terrains. To model the existing turbulence two computational fluid mechanics programs i.e. Meteodyn WT and WindSim, which models the flow through the Reynolds Averaged Navier-Stokes equations have been used.

This study aims to identify the wind speed predictive capacity of each program in a windfarm located on Chapada da Diamantina, as a correct production prediction depends on a correct estimation of the wind field.

Evaluating only neutral atmospheric setup and comparing it with the measures, WindSim had the lowest wind speed estimation error, -3.7% compared with WaSP and Meteodyn programs, that provided -5.1% and -6.5% respectively. The greatest error was obtained by WaSP program, +11%, followed by Meteodyn, +10.6% and WindSim, +7.9%.

WindSim enables changes in some variables that are fixed in Meteodyn and enables also the simulation of stability effects through the introduction of the energy equation with a Monin-Obukhov length initialization. For Meteodyn program different stabilities were evaluated, but the results obtained were not satisfactory. The maximum and minimum error were reduced to +10.6% and -6.5%, respectively, in stable atmosphere.

Due to the specific site studied conditions the simulation of stability effects resulted in a significant improvement in the results even though a larger computational time. Enabling the energy equations setting up stable atmospheric stability, both WindSim errors are reduced to -1.8% and +4.4% respectively.

It is noteworthy that the conclusions apply to the case studied.

Keywords: Wind Energy, Computational Fluid Dynamics, WaSP, Meteodyn, WindSim, Complex Terrain.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL	2
1.1.1	Novo modelo do setor elétrico brasileiro	2
1.1.2	Matriz Energética Brasileira	3
1.1.3	Mercado da Energia Eólica	4
1.1.4	Evolução da Capacidade Instalada da Fonte Eólica	6
1.2	DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	7
1.3	OBJETIVO E JUSTIFICATIVA	9
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS	11
2.2	MODELAGEM NUMÉRICA DA TURBULÊNCIA	12
2.2.1	Equações médias de Reynolds	14
2.3	MODELAGEM COMPUTACIONAL APLICADA À ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO	15
3	METODOLOGIA ESTATÍSTICA E ANALÍTICA	20
3.1	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE VENTO	20
3.1.1	Coleta dos dados de vento	20
3.1.2	Histograma de velocidades	21
3.1.3	Distribuição de Weibull	21
3.1.4	Direção do vento	22
3.2	CONCEITOS FÍSICOS	23
3.2.1	Estabilidade atmosférica	23
3.2.2	Camada limite atmosférica	25
3.2.3	O perfil vertical do vento	27
3.2.4	Comprimento de Monin-Obukhov	28
3.2.5	Topografia local	29
3.2.6	Efeitos da rugosidade	30
4	MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL	32
4.1	MODELAGEM EMPREGADA NO WASP	32
4.2	MODELAGEM EMPREGADA NO METEODYN WT	35

4.2.1	Modelagem do escoamento turbulento do programa Meteodyn WT	36
4.2.2	Classes de estabilidade	38
4.2.3	Geração de malha	39
4.2.4	Condições de contorno	41
4.2.5	Acoplamento pressão-velocidade	43
4.3	MODELAGEM EMPREGADA NO WINDSIM.....	44
4.3.1	Modelagem da Turbulência do programa WindSim.....	44
5	COMPLEXO EÓLICO: DADOS EXPERIMENTAIS E DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	46
5.1	DADOS ANEMOMÉTRICOS	47
5.2	TRATAMENTO ESTATÍSTICO E VALIDAÇÃO DOS DADOS DE VENTO.....	50
5.3	CARACTERÍSTICAS DO RECURSO EÓLICO	50
5.4	METODOLOGIA DE TESTE.....	53
5.4.1	Parâmetros do WASP	53
5.4.2	Parâmetros do Meteodyn WT.....	53
5.4.3	Parâmetros do WindSim	54
5.5	METEODYN WT – CASOS ESTUDADOS	55
5.5.1	Caso 1: Configuração e domínio padrão	56
5.5.2	Caso 2: Configuração padrão e domínio reduzido	57
5.5.3	Caso 3: Configuração e domínio dividido, parte superior	59
5.6	WINDSIM – CASOS ESTUDADOS.....	61
5.7	ERRO PERCENTUAL	62
6	RESULTADOS.....	63
6.1	WASP E METEODYN WT.....	63
6.1.1	Caso 1: Configuração e domínio padrão	63
6.1.2	Caso 2: Configuração padrão e domínio reduzido	67
6.1.3	Caso 3: Configuração e domínio dividido – parte superior	67
6.2	WASP, METEODYN WT E WINDSIM.....	70
7	CONCLUSÃO	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Sistema de comercialização ACR [Diniz, 2005]	3
Figura 1.2 – Matriz Energética Brasileira [ANEEL, 2014]	4
Figura 1.3 – Evolução da contratação da fonte eólica no Brasil	5
Figura 1.4 – Potência instalada de parques eólicos [ABEEólica, 2014]	6
Figura 1.5 – Evolução da capacidade instalada no Brasil [ABEEólica, 2014]	7
Figura 2.1 – Grau de Modelagem e custo computacional dos modelos de turbulência [Rezende, 2009]	14
Figura 2.2 – Comparação entre o <i>speed-up</i> dos <i>softwares</i> Meteodyn WT e WAsP em dois projetos (a) La Clape e (b) Koudia.....	16
Figura 2.3 – Erro relativo obtido na previsão cruzada [Pereira <i>et. al.</i> , 2010a]	18
Figura 2.4 – Erro na previsão do vento, considerando a influência da estabilidade atmosférica [Barrios <i>et. al.</i> , 2008].....	18
Figura 3.1 - Espectro de vento com base no trabalho de [Van der Hoven, 1957].....	21
Figura 3.2 – Histograma de Velocidade do Vento	21
Figura 3.3 – Função de Weibull adimensional [Villar Alé e Pereira, 2002]	22
Figura 3.4 – Estatística da direção do vento, rosa dos ventos	22
Figura 3.5 – Os estados da atmosfera, adaptado de [Rohatgi, 1994].....	23
Figura 3.6 – Influência da estabilidade sobre o escoamento (a) e o perfil de vento (b) [Wenzel, 2013 e Dorweiler, 2007].....	24
Figura 3.7 – Camada Limite e Efeito Rotacional de Partículas [Villar Alé e Pereira, 2002] ..	25
Figura 3.8 – Estrutura dinâmica da camada limite atmosférica [Dorweiler, 2007].....	26
Figura 3.9 – Desenvolvimento do perfil de vento sobre uma colina [Stangroom, 2004]	29
Figura 4.1 – Representação do modelo de análise do programa WaSP, adaptado de [Troen e Lundtang, 1990].....	33
Figura 4.2 – Perfil do vento de acordo com a estabilidade atmosférica	39
Figura 4.3 – Geração de malha, um ponto dentro de uma área delimitada e outros dois pontos fora da área [Meteodyn WT, 2013].....	40
Figura 4.4 – Condições de contorno do programa Meteodyn WT, adaptado de [Meteodyn WT, 2013].....	41
Figura 5.1 – Representação do relevo e da rugosidade do Complexo Eólico	46

Figura 5.2 – (a) Curvas de Nível (b); Curvas de Rugosidade do Complexo Eólico.....	47
Figura 5.3 – Imagem representativa das torres de medição	48
Figura 5.4 – Localização das torres de medição e topografia do terreno.....	49
Figura 5.5 – Velocidade média das torres em todo o período analisado, normalizadas pela torre MM02.....	51
Figura 5.6 – Comportamento da velocidade do vento ao longo do dia nas torres de medição em todo o período analisado	51
Figura 5.7 – Gradiente Vertical (α) das torres de medição instaladas no complexo eólico	52
Figura 5.8 – Direção predominante do vento nas torres de medição.....	52
Figura 5.9 – Domínio estudado para o caso MT_01.....	56
Figura 5.10 – Domínio estudado para o caso MT_02.....	58
Figura 5.11 – Domínio estudado para o caso MT_03.....	59
Figura 5.12. Modelo digital do terreno (a) Elevação em metros (b) Inclinação em graus.....	61
Figura 6.1 – Comparação entre as velocidades, normalizadas pela torre MM02.....	63
Figura 6.2 – Comparação entre o MT_01_a e o MT_01_d (a) e (b) <i>Speed-up</i> (c) e (d) Intensidade de turbulência, para a direção de 100°	64
Figura 6.3 – Comparação entre as velocidades normalizadas pela torre MM02.....	65
Figura 6.4 – Comparação entre as velocidades normalizadas pela torre MM02.....	66
Figura 6.5 – Comparação entre as velocidades normalizadas pela torre MM02.....	67
Figura 6.6 – Gradiente vertical de velocidade para cada caso em cada torre de medição	68
Figura 6.7 – Gradiente vertical de velocidade <i>versus</i> rugosidade	69
Figura 6.8 – Velocidade normalizada <i>versus</i> rugosidade.....	69
Figura 6.9. Comparação entre as velocidades normalizadas pela torre MM02.....	70
Figura 6.10. Comparação entre as velocidades normalizadas pela torre MM02.....	71
Figura 6.11. Comparação entre as velocidades normalizadas pela torre MM02.....	72
Figura 6.12. Comparação de velocidade média entre os casos (a) WS_01_a (Neutro) e (b) WS_01_c (Pouco Estável)	72
Figura 7.1 – Erro normalizado dos métodos analisados, WAsP, Meteodyn WT e WindSim..	73
Figura 7.2 – Erro normalizado dos métodos analisados, WAsP e Meteodyn, considerando condições de estabilidade atmosférica	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Erro de predição médio absoluto para cada local em estudo	17
Tabela 3.1. Características da Superfície do Terreno e rugosidade aerodinâmica z_0 , adaptado de [WAsP, 2013].....	31
Tabela 4.1. Classes de Estabilidade térmica e comprimento de Monin-Obukhov	38
Tabela 4.2. Constantes do modelo k-epsilon.....	45
Tabela 5.1. Informações das torres de medição utilizadas no projeto	47
Tabela 5.2. Distância em metros (m) entre as torres de medição anemométrica	49
Tabela 5.3. Informações das torres de medição instaladas no complexo eólico	50
Tabela 5.4. Configuração padrão do programa Meteodyn WT.....	54
Tabela 5.5. Configuração para o programa WindSim	55
Tabela 5.6. Resumo dos casos analisados	57
Tabela 5.7. Casos computados, tamanho de malha, tempo computacional e convergência	57
Tabela 5.8. Resumo dos casos analisados	58
Tabela 5.9. Casos computados, tamanho de malha, tempo computacional e convergência	58
Tabela 5.10. Resumo dos casos analisados	60
Tabela 5.11. Casos computados, tamanho de malha, tempo computacional e convergência ..	60
Tabela 5.12. Resumo dos casos analisados	62
Tabela 5.13. Casos computados, direção, estabilidade e tempo computacional	62
Tabela 6.1. Resultados normalizados pela torre de medição MM02	63
Tabela 6.2. Resultados normalizados pela torre de medição MM02.....	65
Tabela 6.3. Resultados normalizados pela torre de medição MM02.....	66
Tabela 6.4. Resultados normalizados pela torre de medição MM02.....	67
Tabela 6.5. Resultados normalizados pela torre de medição MM02.....	70
Tabela 6.6. Resultados normalizados pela torre de medição MM02.....	71
Tabela 6.7. Resultados normalizados pela torre de medição MM02.....	72

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A-3	Leilão de Energia Nova, A-3
A-5	Leilão de Energia Nova, A-5
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
ARPS	<i>Advanced Regional Prediction System</i>
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
CHAM	<i>Concentration Heat and Momentum Limited</i>
CLA	Camada Limite atmosférica
DNS	Simulação Numérica Direta
ENS	Equações de Navier-Stokes
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FDM	Método de Diferenças Finitas
FEM	Método dos Elementos Finitos
FVM	Método dos Volumes Finitos
LER	Leilão de Energia Reserva
LES	Simulação de Grandes Escalas
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RANS	Equações de Navier-Stokes com média de Reynolds
RIX	<i>Ruggedness Index</i>
TKE	Energia Cinética Turbulenta
WAsP	<i>Wind Atlas Analysis and Application Program</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$(\overline{w'\theta'_v})_s$	Superfície do fluxo de temperatura virtual potencial
$\overline{u'_i u'_j}$	Tensor de Reynolds
$\bar{\theta}_v$	Temperatura média virtual potencial
C_s	Função da rugosidade do local e da estabilidade térmica
F_S	Redução de superfície
L_T	Comprimento de escala turbulenta
P_k	Termo de produção turbulenta
R_{if}	Numero de Richardson
\bar{T}	Temperatura absoluta
U_t	Velocidade do vento tangencial à superfície inferior
V_h	<i>Speed-up</i>
$V_x; V_y$	Componente de velocidade
Z_{max}	Altitude máxima do terreno dentro do domínio computacional
Z_{min}	Altitude mínima do terreno dentro do domínio computacional
Z_{top}	Altitude para a condição de contorno superior
$c_\mu; \sigma_k; \sigma_\epsilon; c_{\epsilon 1}; c_{\epsilon 2}$	Constantes do modelo de turbulência k-epsilon
\bar{u}	Componente média da velocidade
u'	Componente flutuante da velocidade
u_*	Velocidade de atrito
u_g	Velocidade do vento geostrófico
$u_i; u_j$	Componente de velocidade
u_{zs}	Velocidade do vento no topo
$x_i; x_j$	Componente de posicionamento
z_0	Comprimento de rugosidade
z_m	Altura sobre o solo
z_h	Espessura da camada limite
ν_T	Viscosidade turbulenta
τ	Tensão superficial
A	Constante

$A; c$	Fator de escala
B	Constante
G	Vento geostrófico
L	Comprimento de Monin-Obukhov
P	Pressão
R_{if}	Número de Richardson
Ro	Número de Rossby
U	Velocidade Média
Z	Altura
a	Constante
c	Constante
dH	Fluxo de calor na superfície
f	Parâmetro de Corolis
$f(v)$	Função de Weibull
k	Energia cinética turbulenta
k	Fator de forma
l	Comprimento de mistura
q	Humidade Específica
t	Tempo
u	Componente instantânea da velocidade
z	Altura
Ω	Velocidade angular
α	Gradiente vertical de velocidade
ε	Dissipação turbulenta
θ	Temperatura potencial
κ	Constante de Von Kàrmàn
μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Massa específica
ϕ	Latitude local

1 INTRODUÇÃO

O vento é o deslocamento das massas de ar na superfície terrestre, resultado da diferença de pressão atmosférica entre duas regiões distintas. Essa diferença de pressão é causada pelo aquecimento desigual da superfície terrestre em função da radiação solar e dos processos de aquecimento das massas de ar, ocasionando a circulação atmosférica.

A correta previsão de produção de energia e otimização de um parque eólico, dependem de uma compreensão correta e detalhada da distribuição espacial dos recursos disponíveis em toda a área do projeto [Beaucage, 2012].

Preferencialmente os parques eólicos devem ser instalados em terrenos planos, sem muitos obstáculos naturais, como vales e montanhas, corroborando desta maneira com a previsibilidade do potencial eólico da região. Em terrenos de alta complexidade, falésias ou montanhas, o vento sofre mais intensamente o efeito da turbulência, o que inibe a capacidade de previsão de sua trajetória [Stangroom, 2004].

Entretanto, por motivos políticos, econômicos e/ou ambientais, os empreendedores têm utilizado em seus planos de negócio regiões complexas para instalação de parques eólicos; portanto, compreender e prever o escoamento de ar sobre estas áreas tem sido objeto de estudo ao longo das últimas décadas.

Os modelos simplificados, como o WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*) [WAsP, 2013], são amplamente empregados na previsão da velocidade do vento, direção predominante, gradiente vertical de velocidade, e outras características da camada limite. Estes modelos surgiram na década de 1980, e, respeitando o limitado recurso computacional existente, modelavam de maneira aceitável o recurso disponível, limitados à previsão de terrenos com baixa complexidade e com uma correlação pouco precisa entre os obstáculos naturais, que causam turbulência, e a tendência natural do vento [Stangroom, 2004].

Estes programas já foram validados e avaliados em diversas condições de vento, demonstrando serem confiáveis em terrenos planos, além de serem rápidos e fáceis de empregar [Stangroom, 2004].

Atualmente, a indústria eólica tem optado pela modelagem numérica combinada com as medições meteorológicas locais para a aproximação e estimação da distribuição espacial dos recursos eólicos [Beaucage, 2012].

A simulação do vento em um terreno complexo é uma tarefa árdua e difícil, uma vez que o campo de vento deve ser determinado em uma escala muito pequena para se obter um alto índice de precisão do resultado almejado [Stangroom, 2004].

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) é altamente difundida nos estudos de engenharia, e atualmente está sendo considerada uma boa alternativa na modelagem do escoamento do ar com o objetivo de prever os recursos eólicos disponíveis em terrenos complexos. Isto se deve ao fato de que esta abordagem resolve as equações diferenciais parciais não lineares de conservação de massa e quantidade de movimento, Equação de Navier-Stokes, resultando em um maior nível de detalhe nas características turbulentas do escoamento, diminuindo assim a incerteza de produção [Beaucage, 2012].

Vários estudos mostram que os modelos CFD obtém melhor resultado do que o modelo WASP em muitos, mas não em todos os casos [Beaucage, 2012].

O presente trabalho busca apresentar um comparativo entre a simulação numérica de três programas comerciais, WASP, Meteodyn e WindSim, e as medições locais derivadas de quatro torres de medição instaladas na área de implantação de um complexo eólico. Para o programa CFD Meteodyn, foram analisados os resultados provenientes de três diferentes casos de estudo, nos quais se observa a influência nos resultados da mudança das características de análise como rugosidade, estabilidade atmosférica, refinamento de malha e tamanho de domínio. O programa WindSim foi utilizado para a verificação dos resultados obtidos com os outros dois programas e aprimoramento dos resultados. O projeto eólico de topografia complexa está localizado na Chapada da Diamantina, no Nordeste brasileiro.

1.1 Panorama da Energia Eólica no Brasil

1.1.1 Novo modelo do setor elétrico brasileiro

No biênio 2003/2004 foi proposto pelo governo federal “um novo modelo para o setor elétrico brasileiro”. Considerado um marco regulatório, o modelo gerou estabilidade no setor implicando cenários favoráveis ao investimento privado. Os principais objetivos do novo modelo eram: assegurar a estabilidade regulatória, promover a modicidade tarifária e garantir a segurança do suprimento.

Desde então, estabeleceram-se dois tipos de ambientes de comercialização de energia para novos empreendimentos, por meio dos quais geradores, produtores independentes e comercializadores poderiam atuar em um ambiente de contratação regulada (ACR), leilões de

energia, ou ambiente de contratação livre (ACL), em que os contratos são livremente negociados [Diniz, 2005].

Pelo Decreto 5.163, estipulou-se que as aquisições de energia deveriam ser realizadas por meio de três modelos de leilões (Figura 1.1) no ACR: os leilões de energia para empreendimentos já existentes, os leilões para novos empreendimentos e leilões de ajuste tarifário [Diniz, 2005].

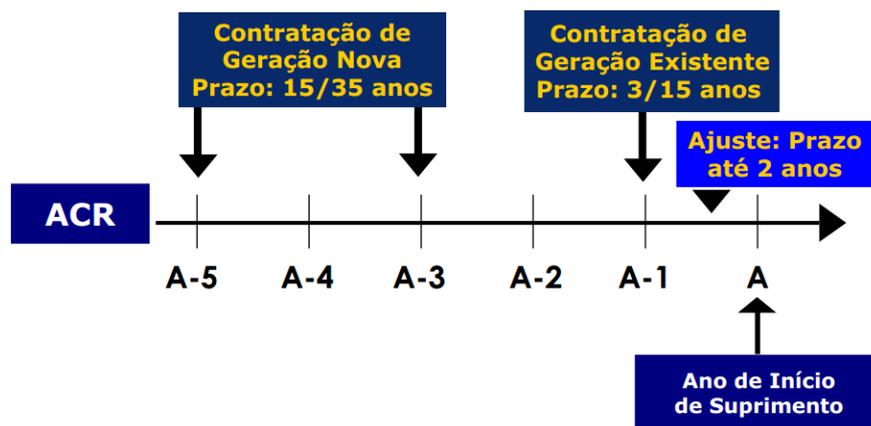


Figura 1.1 – Sistema de comercialização ACR [Diniz, 2005]

Com o início da realização de leilões de energia para novos empreendimentos, já foram contratados 63,6 GW de capacidade instalada, sendo 43% de hidrelétrica, 40% de térmicas, 12% de eólica e 5% de biomassa [Melo, 2013].

1.1.2 Matriz Energética Brasileira

O Brasil apresenta em data uma matriz de 3.040 empreendimentos geradores de energia elétrica em operação, com capacidade total de 134.737.083 kW, composta por aproximadamente 68% de hidroelétricas; 19%, termelétricas; 1,7%, eólicas; e 1,6%, nucleares, dispondo de diversas alternativas de geração limpa para o seu crescimento, como: hidro, eólica, biomassa e solar (Figura 1.2) [ANEEL, 2014]. A fonte eólica no Brasil permanece valorada em 3,45 GW, distribuída em 142 parques eólicos [ABEEólica, 2014].

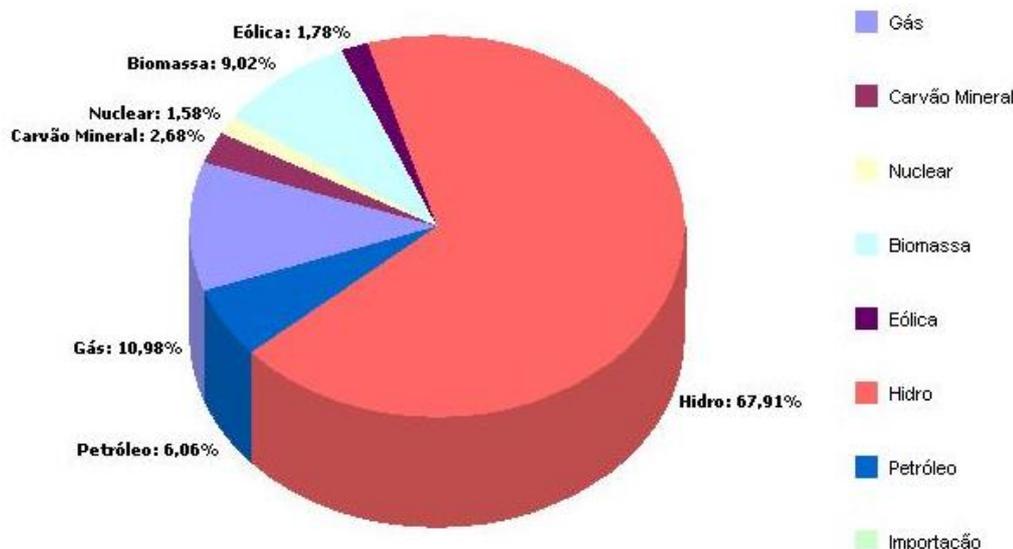


Figura 1.2 – Matriz Energética Brasileira [ANEEL, 2014]

O país ainda está desenvolvendo um banco de dados de qualidade para que se possa realizar uma boa avaliação do potencial eólico nacional, já que até um tempo atrás não havia dados de vento qualitativos. Os primeiros anemômetros instalados no país com este intuito são da década de 1990, localizados no estado do Ceará e em Fernando de Noronha [Silva et. al., 2005]. Atualmente, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) tem recolhido dados quinzenais das estações meteorológicas instaladas em frente aos parques eólicos com energia contratada no país com o objetivo de aprimorar o banco de dados nacional.

1.1.3 Mercado da Energia Eólica

A exploração eólica no Brasil foi marcada pela operação comercial do primeiro aerogerador instalado em 1992. O aerogerador de 225 kW foi instalado no arquipélago de Fernando de Noronha e foi o primeiro gerador eólico a entrar em operação comercial em toda a América do Sul [ABEEólica, 2013].

Possivelmente, pelo alto custo da tecnologia, o país tenha estagnado durante aproximadamente dez anos a utilização da energia eólica como fonte alternativa de produção de energia elétrica e no ano de 2002, durante a crise energética, foi lançado pelo governo o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), revisado e regulamentado no biênio 2003/2004. Este programa teve como objetivo desenvolver fontes alternativas de geração de energia como, pequenas centrais hidroelétricas, eólicas e de

biomassa. O PROINFA foi responsável pela contratação de 1.422,9 MW de energia eólica, por meio de preços subsidiados, e também abriu caminho para a fixação do cluster setorial no país [Melo, 2013].

O primeiro leilão de energia voltado exclusivamente para a fonte foi realizado no final de 2009, Leilão de Energia Reserva (LER), considerado um sucesso após a contratação de 1,8 GW de energia. A geração de energia por fonte eólica no Brasil só foi consolidada em 2011, quando foram contratados 2.905 MW da fonte em dois leilões de energia por meio de leilões de energia nova A-3 e A-5, valor superior aos 2 MW esperados para que a indústria mantivesse sua cadeia produtiva de forma sustentável [Melo, 2013]. A Figura 1.3 mostra a evolução do mercado eólico no país desde o lançamento do PROINFA até os dias atuais pela contratação de energia por meio dos leilões de energia.

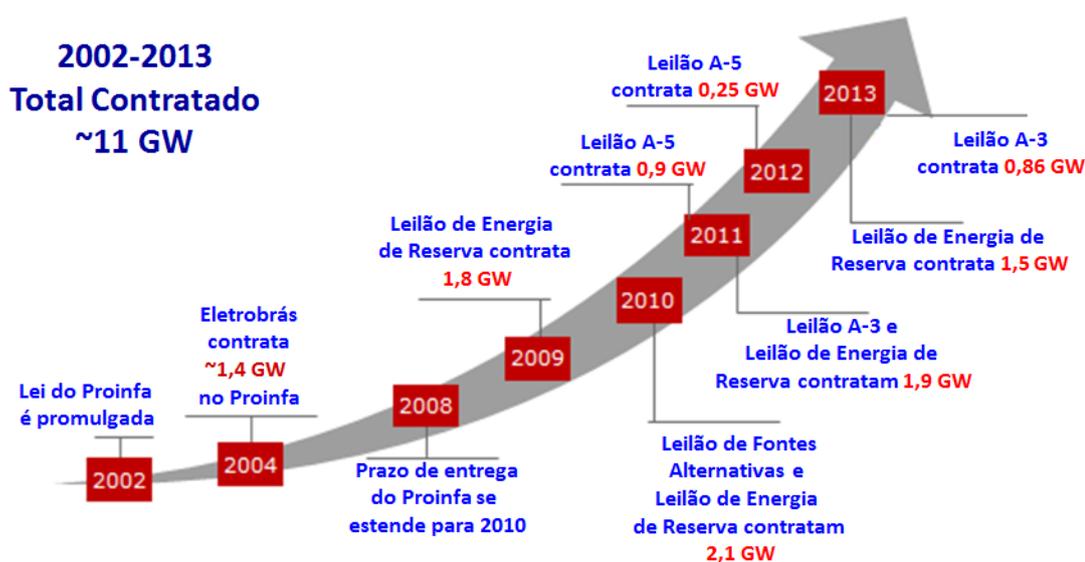


Figura 1.3 – Evolução da contratação da fonte eólica no Brasil

Além do PROINFA e dos leilões de energia, a fonte eólica também comercializa sua energia no mercado livre, onde as condições contratuais são livremente negociadas entre as contrapartes; atualmente o país tem aproximadamente 0,4 GW de energia comercializada desta maneira [ABEEólica, 2013].

O potencial crescimento desta fonte no mercado se deu no momento em que os preços negociados na fonte eram equivalentes à metade do que havia sido pago inicialmente pelo PROINFA. Desde então a fonte chegou a ser comercializada na ordem de R\$ 100,00/MWh, tornando-se a segunda fonte mais competitiva do Brasil.

1.1.4 Evolução da Capacidade Instalada da Fonte Eólica

O cenário nacional se concretizou com políticas estruturantes sólidas, fazendo com que o setor de energia eólica alcançasse patamares diferenciados de maturação e consolidação, tornando-o competitivo com as energias já estabelecidas, como hidrelétricas e térmicas; logo, o setor vivencia uma nova fase, saindo da dependência dos subsídios governamentais, como as tarifas *feed-in* utilizadas por países desenvolvidos, para uma nova proposta de autossustentabilidade e competitividade global.

Como resultado do PROINFA, dos leilões realizados e do mercado livre, ao final de 2013 o Brasil possuía 142 parques eólicos em operação, que totalizavam 2,2 GW de capacidade instalada (Figura 1.4) [ABEEólica, 2014].

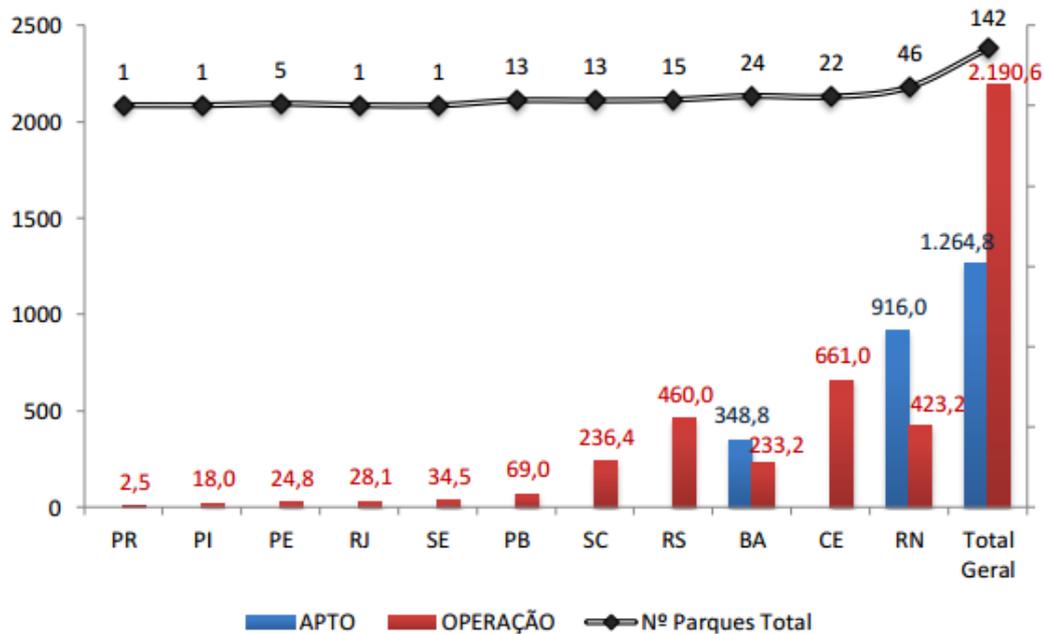


Figura 1.4 – Potência instalada de parques eólicos [ABEEólica, 2014]

A Figura 1.5 mostra a evolução da capacidade instalada da fonte eólica e a previsão de crescimento em função das contratações já realizadas nos leilões regulados e no mercado livre.

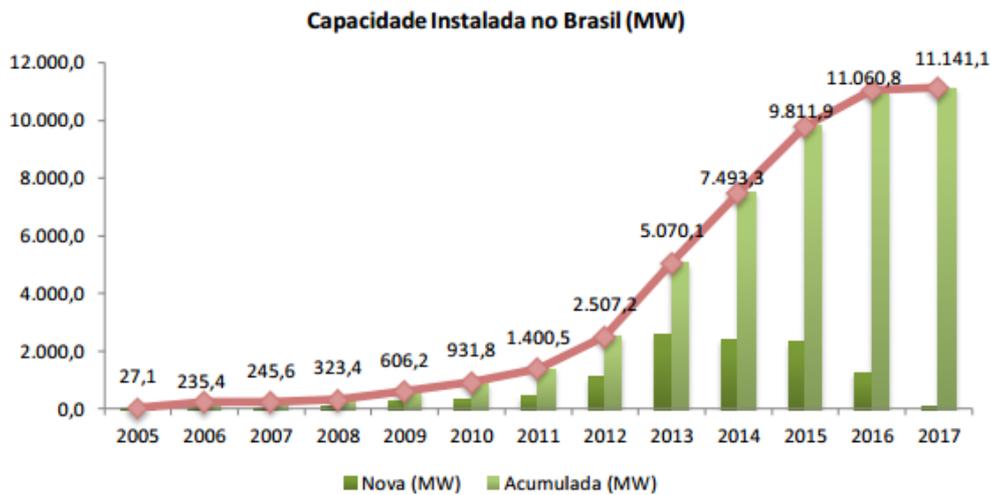


Figura 1.5 – Evolução da capacidade instalada no Brasil [ABEEólica, 2014]

1.2 Dinâmica dos fluidos computacional

Os escoamentos estão presentes em diversas situações de nossas vidas e em diferentes áreas do conhecimento. Compreender e ser capaz de prever o seu comportamento é importante em temas que variam desde o projeto de uma aeronave até a distribuição de medicamentos no organismo humano pelas vias respiratórias [Petry, 2002].

Os escoamentos são, em sua maioria, turbulentos [Möller e Silvestrini, 2004], e é nesta afirmação que estão presentes grande parte dos problemas de interesse.

White [1974] relata que os escoamentos de fluidos têm sido estudados há séculos. O início da abordagem científica foi registrado aproximadamente 300 anos antes de Cristo, por Arquimedes, com uma versão preliminar do cálculo diferencial para análise de escoamentos. Relata ainda que em 1500, Leonardo da Vinci deduziu a equação da conservação de massa para escoamentos unidimensionais e viscosos, seguido por Newton, Euler, Laplace, Navier, Poisson e Stokes, entre os anos de 1600 e 1800, finalizando com Prandtl, que formulou a teoria da camada limite, em 1904.

Embora a turbulência esteja presente com frequência nas experiências do mundo real, e seja objeto de intensa pesquisa científica, não existe nem mesmo unanimidade em sua definição. Durante um longo período, em decorrência da complexidade das equações deduzidas e consequente dificuldade em obterem-se soluções analíticas, a mecânica dos fluidos preocupou-se em estudar estes movimentos de maneira experimental muito antes que de forma matemática. A teoria da camada limite foi um marco para aproximar as correntes experimental e teórica, considerando que a descrição matemática desses movimentos só foi

possível a partir do século XIX, com a dedução das Equações de Navier-Stokes (ENS) [Petry, 2002; Xavier, 2008].

O desenvolvimento computacional permitiu, nas últimas décadas, o surgimento de uma nova linha de pesquisa, a Dinâmica dos Fluidos Computacional, a qual emprega métodos numéricos para a solução das equações que governam os escoamentos e tem por interesse resolver numericamente as ENS. Apesar de terem sido formuladas há mais de um século, ainda não foi possível a descoberta de uma solução analítica universal de um problema de dinâmica dos fluidos a partir das ENS [Petry, 2002 e Xavier, 2008].

Os principais métodos utilizados para a simulação numérica de escoamentos de fluido são: Método de Diferenças Finitas (FDM – *Finite Difference Method*), utilizado para o cálculo de escoamentos de fluidos e transferência de calor; Método dos Volumes Finitos (FVM – *Finite Volume Method*), que constitui atualmente um dos principais métodos para a análise numérica de escoamentos e transferência de calor; e o Método dos Elementos Finitos (FEM – *Finite Element Method*), que inicialmente foi desenvolvido para a análise estrutural. Atualmente, também é empregado em escoamentos devido à sua versatilidade na discretização de domínios complexos [Xavier, 2008].

Os modelos empregados para prever o potencial eólico de uma região envolvem a análise de escoamentos turbulentos. A análise computacional feita pelo programa WAsP é baseada na teoria de Jackson-Hunt, e resolve as ENS linearizadas sob várias suposições, como escoamento de estado estacionário, advecção linear e problema de fechamento de turbulência de primeira ordem [Sveinbjornsson, 2013]. Já o programa Meteodyn WT resolve as equações diferenciais parciais não lineares da dinâmica dos fluidos, ENS, através do método dos volumes finitos. Este modelo CFD assume um escoamento em estado estacionário e incompressível e utiliza o modelo de turbulência de uma equação com base em Yamada [1983] e Arritt [1987] [Hurley, 1997]. Sem resolver a conservação da equação da energia, o modelo leva em conta os efeitos de gradiente de temperatura por meio de uma alteração das características turbulentas, ajustando a escala de comprimento com base na estabilidade térmica da equação da energia cinética turbulenta. O programa WindSim é fundamentado nas Equações Médias de Reynolds para solucionar as condições de vento em cada célula da malha. A solução tem início a partir das condições de contorno iniciais especificados pelo usuário, chegando a uma solução de estado estacionário, que reflete uma solução média do tempo.

1.3 Objetivo e justificativa

O principal objetivo desta dissertação é realizar um estudo comparativo entre os resultados obtidos empregando diferentes modelagens numéricas, adotadas nos programas de dinâmica dos fluidos computacional dedicado à avaliação de potencial eólico, Meteodyn WT e WindSim; o programa WAsP e as medições de vento realizadas em torres instaladas em um terreno complexo.

A finalidade do estudo é identificar a capacidade de previsão das velocidades de vento de cada um dos programas para o caso em estudo, em um projeto de parque eólico localizado na Chapada da Diamantina, comparando três ferramentas computacionais corporativas, WAsP, Meteodyn WT e WindSim, tendo como referência os dados reais obtidos por meio de torres de medição instaladas no local.

Durante as simulações com o programa Meteodyn WT foram avaliados três casos cujos resultados diferem em tamanho de domínio, classe de estabilidade atmosférica, rugosidade superficial do local e refinamento de malha. Para o programa WAsP foram avaliadas somente as condições padrão que o programa oferece. O uso do programa WindSim teve como finalidade a verificação dos resultados obtidos com o programa Meteodyn e seu possível aprimoramento, já que o programa disponibiliza ao usuário a alteração de alguns parâmetros iniciais.

Os casos foram modelados a fim de que os resultados obtidos pudessem ser comparados com os resultados apurados em quatro torres de medição instaladas na área do complexo eólico. Com a obtenção de todos os resultados pode-se então avaliar qual a melhor metodologia de previsão eólica para o caso em estudo, analisando tempo e custo computacional e a incerteza obtida com cada método.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta seção apresenta os tópicos discutidos no decorrer desta dissertação. Os capítulos apresentados transcorrem da maneira descrita nos tópicos que seguem.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre a dinâmica dos fluidos computacional, descreve as equações de governo do escoamento, relata os escoamentos turbulentos e expõe as maneiras de modelá-lo numericamente, aprofundando-se na modelagem tipo RANS, equações de Navier-Stokes com média de Reynolds, utilizadas pelos programas apresentados Meteodyn WT e WindSim. O capítulo também traz a revisão de

trabalhos de aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional em análise de potencial eólico, publicados em anos anteriores, expondo os resultados obtidos na comparação entre os três programas comerciais apresentados neste trabalho.

O terceiro capítulo aborda a metodologia estatística e analítica do tratamento de dados das torres de medição anemométricas. Inicia apresentando o conceito do histograma de velocidade, distribuição de Weibull, e direção predominante do vento, passando para conceitos físicos, como estabilidade atmosférica, conceitos de camada limite, perfil logarítmico de velocidades, topografia e rugosidade local.

O quarto capítulo expõe a modelagem matemática e computacional dos programas utilizados no transcorrer desta dissertação – WAsP, Meteodyn WT e WindSim. O capítulo apresenta, ainda, os conceitos abordados por cada modelo, expondo a modelagem de turbulência utilizada, a maneira que ele modela as classes de estabilidade, geração de malha, condições de contorno e qual acoplamento pressão-velocidade é utilizado.

O quinto capítulo apresenta o estudo de caso analisado e descreve as características do problema, como topografia e rugosidade local, ilustradas com fotos, localização das torres de medição anemométricas instaladas no projeto, bem como a análise, tratamento estatístico e validação dos dados obtidos. Neste capítulo também é apresentada a caracterização do recurso eólico local e a metodologia de teste da dissertação, descrevendo a metodologia de teste analisada.

O sexto capítulo é referente aos resultados obtidos por meio das simulações realizadas, comparando-se os resultados reais das torres de medição com os valores extrapolados pelos programas WAsP, Meteodyn e WindSim WT. Para o programa WAsP foi avaliada apenas a condição padrão do programa; já o programa Meteodyn foi avaliado em diferentes tamanhos de domínio, direção de interesse, mudança nas condições de estabilidade atmosférica local, mudança de rugosidade superficial e refinamento de malha. No programa WindSim foram avaliadas diferentes classes de estabilidade atmosférica em um mesmo domínio de cálculo.

O sétimo e último capítulo apresenta as conclusões provenientes do uso de cada programa computacional, incluindo um comparativo da qualidade de previsão de cada um deles para o caso em estudo.

No final da dissertação são apresentadas, em ordem alfabética, as referências bibliográficas utilizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A dinâmica dos fluidos computacional teve início na década de 60 e representou uma revolução no modo de aplicação dos princípios de mecânica dos fluidos e transferência de calor. Seu escopo envolve analisar numericamente problemas que envolvam mecânica dos fluidos e/ou transferência de calor e massa, utilizando os métodos numéricos em simulações computacionais, viabilizando a solução de problemas complexos.

2.1 Equações fundamentais

A solução numérica de qualquer problema de escoamento requer a solução das equações fundamentais da dinâmica dos fluidos, Navier-Stokes e equação da continuidade. As ENS são um conjunto de equações diferenciais parciais não lineares acopladas com condições de contorno apropriadas que descrevem matematicamente os problemas de escoamento de fluidos. Essas equações são derivadas da Segunda Lei de Newton e descrevem o balanço da quantidade de movimento [Meteodyn WT, 2013].

A equação de Navier-Stokes, também conhecida como equação do princípio da quantidade de movimento, é apresentada na sua forma conservativa como (Equação 2.1).

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F \quad (2.1)$$

A Equação 2.2 representa a equação da continuidade ou conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.2)$$

As principais dificuldades inerentes à solução das ENS encontram-se na não linearidade das equações governantes, podendo ser interpretadas como um mecanismo de geração de escalas e de transferência de energia entre diferentes escalas, e na complexidade da solução procurada [Möller e Silvestrini, 2004].

2.2 Modelagem numérica da turbulência

Um fluido em regime laminar pode se tornar turbulento caso seja submetido a forças inerciais e/ou energia potencial, grandes o bastante para que supere sua resistência em se manter linear [Möller e Silvestrini, 2004].

Não existe uma definição concreta de turbulência que abranja todas as características. Em 1972, Tennekes e Lumley estabeleceram que um escoamento turbulento caracteriza-se por: irregularidade, difusividade, altos números de Reynolds, tridimensionalidade da vorticidade, dissipação e meio contínuo; e ainda afirmam que “escoamentos turbulentos são escoamentos”, e a turbulência é uma particularidade do escoamento, não do fluido [Möller e Silvestrini, 2004].

Segundo Piomelli [1999], as soluções analíticas e numéricas para problemas de escoamento turbulento podem ser conseguidas por meio de vários níveis de aproximação, adotando-se maior ou menor descrição no detalhamento das características do escoamento.

A forma mais precisa para modelar o escoamento turbulento, se dá por meio da simulação numérica direta (DNS). Esse método obtém diretamente a solução das equações de conservação e da continuidade sem a necessidade da utilização de constantes ajustáveis envolvendo a discretização das equações em uma malha com espaçamento inferior à escala de comprimento de Kolmogorov, tamanho das menores estruturas turbulentas no escoamento [Meteodyn WT, 2013]. Para obter-se a solução direta de todas as escalas envolvidas, o domínio computacional necessita de uma discretização espacial e temporal que conduz a um número muito elevado de equações a serem resolvidas [Petry, 2002]. Diante disso e por questões de capacidade computacional, a maioria dos problemas práticos de engenharia não pode ser solucionada via DNS [Freire *et. al.*, 2002 e Möller e Silvestrini, 2004].

Portanto, com o intuito de reduzir a quantidade de esforço computacional, se faz necessária a utilização de modelos de turbulência. Existe, atualmente, uma grande quantidade de modelos de turbulência disponíveis; porém, nenhum deles pode ser aplicado adequadamente a todos os tipos de escoamento. Além da abordagem DNS, a modelagem da turbulência pode ser dividida nos seguintes métodos:

- Simulação Numérica de Escoamentos Turbulentos via Equações de Médias de Reynolds (RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*). Esse método inicia a partir das condições de contorno iniciais especificadas pelo usuário e chega a uma solução em estado estacionário, refletindo uma solução média no tempo [Wallbank, 2008]. A criticidade da modelagem RANS está na representação das tensões de Reynolds, ou

tensões turbulentas, que descrevem os efeitos das flutuações turbulentas de pressão e velocidade e suas equações são obtidas por meio de um conjunto de médias das ENS e da continuidade [Rezende, 2009].

- Simulação de Grandes Escalas (LES – *Large Eddy Simulation*). Nesta técnica, as escalas turbulentas que transportam energia e quantidade de movimento são resolvidas diretamente. Apenas as menores escalas são modeladas, já que tendem a ser mais homogêneas, isotrópicas e menos afetadas pelas condições de contorno. As metodologias LES e DNS são semelhantes no sentido de que ambas permitem a obtenção de resultados transientes e tridimensionais [Freire *et. al.*, 2002].

A turbulência, por sua vez, é caracterizada por um grande número de escalas temporais e espaciais, as quais aumentam rapidamente com o número de Reynolds. Considerando esta situação, a solução via DNS torna-se inviável do ponto de vista prático, e as simulações RANS e LES tornam-se as melhores alternativas de predição numérica [Rezende, 2009].

A decomposição das ENS provoca o aparecimento do conhecido problema de fechamento da turbulência, obtendo-se mais incógnitas que equações, e é justamente sobre este problema que a maior parte das pesquisas reside, ou seja, na investigação por melhores modelos de turbulência que solucionem o problema de fechamento [Rezende, 2009].

Assim, os métodos RANS e LES são as duas abordagens para predição de escoamentos turbulentos que possuem o problema de fechamento da turbulência. Na modelagem RANS, todas as informações espectrais são perdidas. As quantidades estatísticas são médias sobre todas as escalas de turbulência. Já a metodologia LES é intermediária tanto em custo como em esforço computacional entre a solução DNS e a modelagem RANS, uma vez que prediz a dinâmica das grandes escalas [Rezende, 2009]. A Figura 2.1 mostra o grau de modelagem e o custo computacional dos modelos de turbulência explanados.

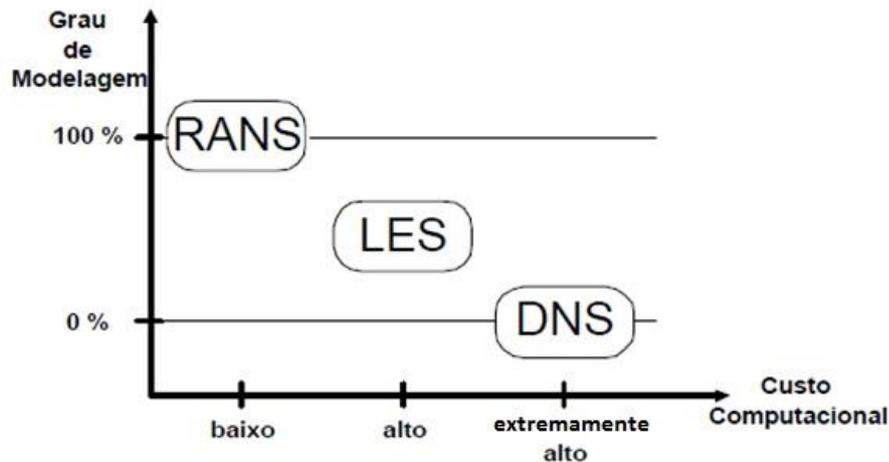


Figura 2.1 – Grau de Modelagem e custo computacional dos modelos de turbulência
[Rezende, 2009]

2.2.1 Equações médias de Reynolds

As equações para valores médios do escoamento são obtidas aplicando-se a decomposição de Reynolds às equações de Navier-Stokes. A decomposição de Reynolds implica que toda variável dependente, escalar ou vetorial, pode ser decomposta em uma parte média temporal, que varia lentamente com o tempo, mais uma parte flutuante, que varia rapidamente. Assim, a componente instantânea da velocidade é descrita na Equação 2.3.

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.3)$$

As equações de Reynolds (Equação 2.4) são obtidas das equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis, substituindo-se a Equação 2.3 nas Equações 2.1 e 2.2 e integrando-a ao longo do tempo [Meteodyn WT, 2013].

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_i\bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial\bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho\overline{u'_i u'_j} \right] + F_i \quad (2.4)$$

Observa-se que as equações RANS (Equação 2.4) são semelhantes às equações de Navier-Stokes (Equação 2.1), diferindo-se no fato de que as variáveis dependentes nas equações RANS são as velocidades médias e pressão média, em vez de valores instantâneos. Outra distinção é o aparecimento do termo $\overline{u'_i u'_j}$ conhecido como tensor de Reynolds e que representa a influência das flutuações turbulentas no escoamento médio.

O surgimento do tensor de Reynolds leva ao aparecimento de mais variáveis do que equações, o que implica no já conhecido problema de fechamento matemático da turbulência. Para solucionar este problema é necessária a introdução de modelos que avaliem o tensor de Reynolds [Möller e Silvestrini, 2004].

De um modo geral, o tensor de Reynolds possui nove componentes; no entanto, como o tensor de Reynolds é simétrico, a presença deste tensor nas equações médias somente introduz seis novas incógnitas [Rezende, 2009].

Na metodologia estatística clássica são empregadas duas classes de modelos: modelos de viscosidade turbulenta e modelos de fechamento de segunda ordem. Os modelos de viscosidade turbulenta relacionam a tensão de Reynolds com uma função da viscosidade turbulenta e do tensor taxa de deformação do escoamento médio. As soluções para esta classe de modelo podem ser obtidas por meio do comprimento de mistura de Prandtl, e pela solução de uma ou duas equações de transporte de propriedades ligadas à turbulência, denominadas modelo de uma equação e modelos de duas equações, respectivamente. Os modelos de fechamento de segunda ordem resolvem versões simplificadas do tensor de Reynolds utilizando diversos tipos de aproximações e hipóteses [Wilcox, 1998].

Considera-se, portanto, que os modelos de turbulência existentes têm como objetivo prever o efeito das tensões de Reynolds no escoamento do ar [Meteodyn WT, 2013].

No presente trabalho, procurou-se investigar o modelo numérico de uma e duas equações via equações médias de Reynolds, utilizado pelos programas comercial Meteodyn WT e WindSim, respectivamente. Será apresentado também um descritivo do modelo utilizado pelo WAsP, modelo o qual este trabalho compara.

2.3 Modelagem computacional aplicada à análise do potencial eólico

Bowen e Mortensen [1996] exploraram os limites do programa WAsP em relação à eficiência na previsão de energia em terrenos complexos. O estudo de caso foi realizado nas colinas do norte de Portugal e concluem que os erros obtidos na previsão de energia podem ser significativos quando o programa é utilizado fora dos padrões de complexidade do terreno recomendados.

Delaunay [2006] comparou os resultados obtidos com o programa Meteodyn WT e WAsP em dois projetos de topografia complexa, denominados La Clape e Koudia. Para ambos os casos, a Figura 2.2 mostra que o programa Meteodyn WT resultou em erros na velocidade do vento de menor proporção quando comparado ao programa WAsP. O autor

conclui que com o crescente desempenho dos computadores, a tecnologia CFD tende a se tornar uma ferramenta padrão na indústria eólica, proporcionando aos investidores maior confiança.

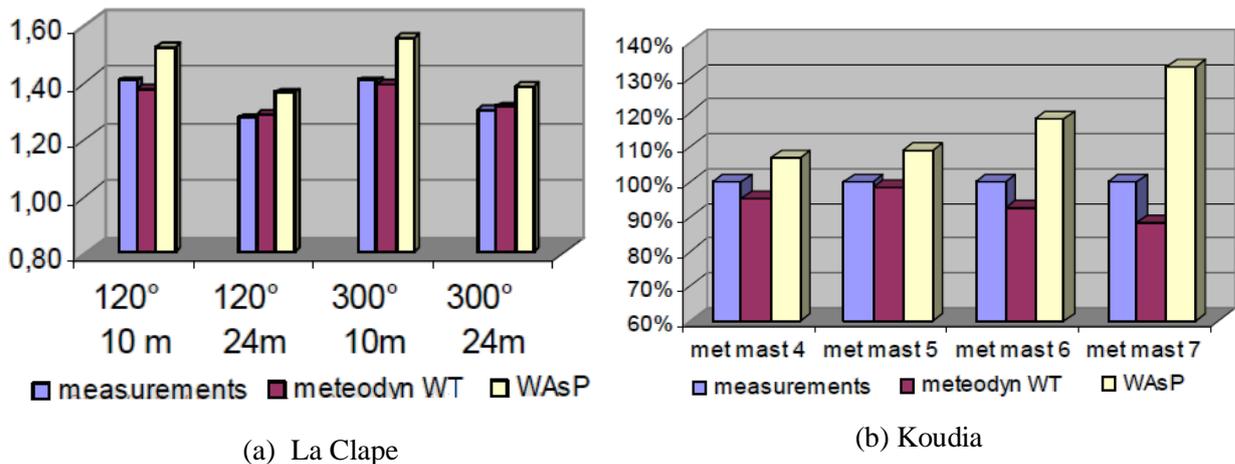


Figura 2.2 – Comparação entre o *speed-up* dos *softwares* Meteodyn WT e WAsP em dois projetos (a) La Clape e (b) Koudia

Berge *et. al.* [2006] relatam que uma questão importante é determinar se os modelos em CFD podem melhorar a confiança do atlas eólico local. Os autores comparam o programa WAsP com outros dois métodos CFD em um terreno complexo localizado no oeste da Noruega e concluem que, apesar da topografia local complexa nas direções predominantes do vento, o WAsP representa melhor as velocidades reais do projeto do que os programas CFD.

Barrios *et. al.* [2007] verificam a capacidade de calibração numérica de um projeto por meio de dois programas comerciais de CFD, WindSim e o Meteodyn WT. Para o desenvolvimento desta verificação foram utilizados sete projetos com diferentes orografia e rugosidade. Finalizam afirmando que ambos os programas comerciais produzem resultados aceitáveis na calibração numérica de projetos que não possuam alta complexidade orográfica.

Wallbank [2008] comparou os resultados obtidos com os programas WAsP e WindSim em quatro localidades diferentes e concluiu que ambos os programas realizam previsões muito semelhantes em cada local. Considerando as previsões transversais obtidas pelo modelo WindSim ligeiramente melhores do que no WAsP. Mas considera ainda que, de modo geral, o desempenho do programa CFD neste estudo não obteve um desempenho significativamente melhor do que o padrão do programa WAsP (Tabela 2.1).

Tabela 2.1. Erro de predição médio absoluto para cada local em estudo

Mean Absolute Prediction Error			
Site	WindSim	WAsP	WAsP Δ RIX
Site A - 01	2.8%	2.9%	8.0%
Site A - 02	5.3%	5.1%	5.9%
Site B - 01	2.4%	2.5%	6.2%
Site B - 02	3.4%	3.9%	2.8%
overall mean	3.5%	3.6%	5.7%

Van Luvanee *et. al.* [2009] comparam os resultados obtidos com o programa WAsP com outros três métodos de previsão de recurso eólico, um CFD e dois modelos de mesoescala. Foram utilizados dados de cinco projetos operacionais na América do Norte com distintos modelos de topografia. Concluem que, em geral, todos os modelos de análise retornam resultados semelhantes, não clarificando qual programa captura de forma consistente e confiável o regime dos ventos no local. O desempenho de cada modelo com relação ao tipo de terreno mostrou que, para todos os métodos, a incerteza calculada aumenta de acordo com a complexidade do terreno.

Tristan *et. al.* [2009] avaliam o programa Meteodyn WT em um projeto eólico localizado em uma área florestal e montanhosa na província de Hebei, China. O objetivo do trabalho é comparar os dados obtidos em campo por meio de quatro torres de medição com os resultados da extrapolação feita pelo programa em cada uma das torres por uma torre de referência. O trabalho mostra resultados satisfatórios na previsão de velocidade e confirma a utilização de ferramentas CFD na avaliação do escoamento do vento em terrenos complexos.

Pereira *et. al.* [2010a] afirmam que a aplicação da dinâmica de fluidos computacional na avaliação do recurso eólico tornou-se uma alternativa real aos modelos lineares comuns. Os autores apresentam sete estudos de caso em diferentes localidades comparando o desempenho dos programas Meteodyn WT, modelo CFD e WAsP, modelo linear. Em onze das quatorze previsões cruzadas analisadas, os erros na estimação da velocidade média por meio do programa CFD foram, ao menos, 50% menores quando comparados aos resultados obtidos no modelo linear WAsP (Figura 2.3). Apesar dos resultados satisfatórios com o método CFD, o autor conclui que não se pode chegar a uma conclusão definitiva sobre o desempenho de ambos os métodos, já que o desvio padrão dos erros em ambos os programas é considerado muito elevado e as diferenças entre eles não foram consideradas relevantes.

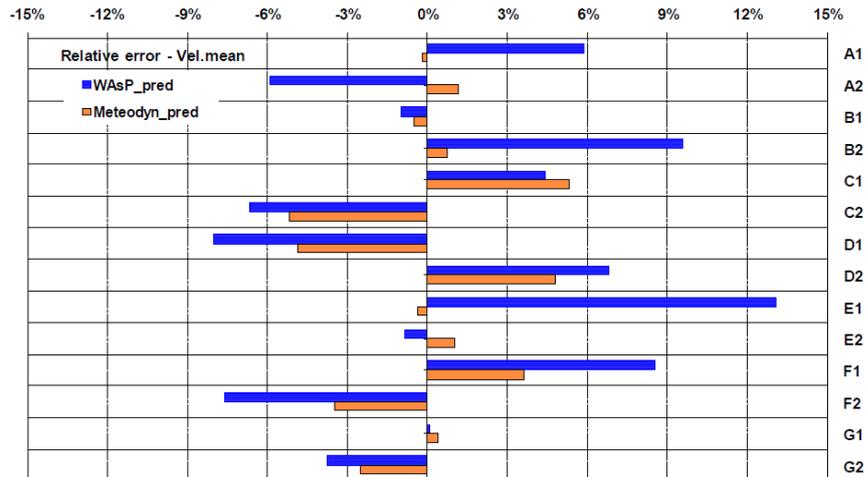


Figura 2.3 – Erro relativo obtido na previsão cruzada [Pereira *et. al.*, 2010a]

Barrios *et. al.* [2008] têm como objetivo checar a influência dos diferentes parâmetros de estabilidade atmosférica e perfil do vento na calibração de um projeto eólico utilizando o programa comercial Meteodyn WT. No trabalho, é observado que, para o projeto em questão, quando o parâmetro estabilidade atmosférica é considerado na calibração do modelo, obtém-se redução do erro em 10% (Figura 2.4).

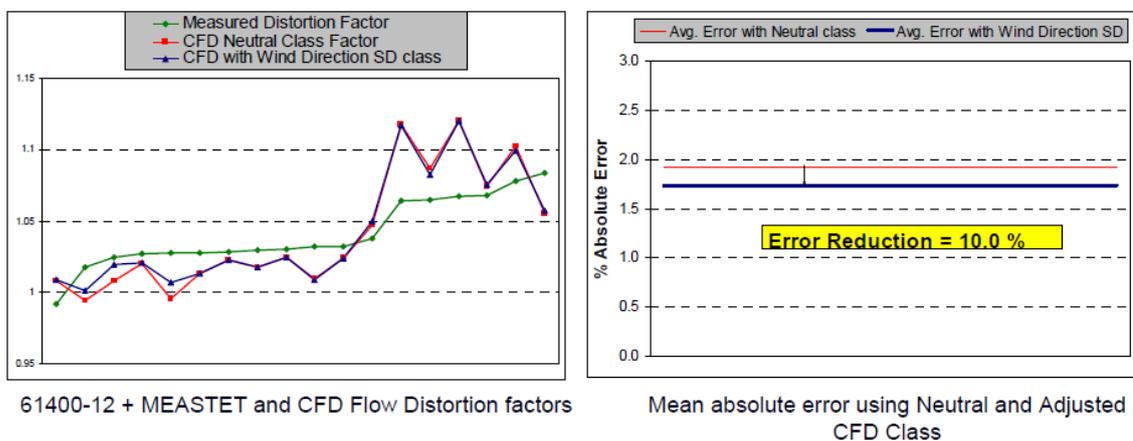


Figura 2.4 – Erro na previsão do vento, considerando a influência da estabilidade atmosférica [Barrios *et. al.*, 2008]

Pereira *et. al.* [2010b], em sua publicação sobre a redução das incertezas associadas ao cálculo do recurso eólico, acreditam que ambos os modelos, WAsP e CFD, não podem ser considerados alternativas de avaliação e sim devem ser utilizados em associação, já que compartilham princípios muito diferentes. Afirmam também que o uso associativo inteligente

de ambos os programas pode reduzir a incerteza do projeto quando comparado ao uso individual de cada um.

Beaucage [2012] realiza um estudo por meio de dados de vinte e seis torres de medição, em quatro locais distintos, com diferentes características orográficas e climáticas, comparando o desempenho de cinco métodos de modelagem de escoamento, WAsP, Meteodyn WT, WindMap, SiteWind e ARPS (*Advanced Regional Prediction System*), os três últimos classificados como métodos de mesoescala. Beaucage conclui que o desempenho superior dos três modelos de mesoescala está relacionado à correta simulação dos efeitos de estabilidade térmica locais e afirma que a desvantagem desta abordagem está no maior esforço computacional necessário, cabendo ao usuário decidir se o ganho em precisão equivale ao custo adicional de processamento.

Em 2013, Beaucage *et. al.* aperfeiçoam o estudo realizado em 2012 com a inserção de diferentes classes de estabilidade para o programa Meteodyn, utilizando apenas quatro modelos ferramentais, WAsP, Meteodyn WT, SiteWind e ARPS. O trabalho relata a ampla gama de condições de estabilidade no mundo real e a importância dos seus efeitos sobre a velocidade do vento. Em suas conclusões, mostram que para estes casos o erro quadrático médio entre todas as torres de medição para os modelos WAsP, Meteodyn WT (condição estabilidade neutra) e Meteodyn WT (condição de estabilidade neutra, instável e estável) são 8,0%, 9,4% e 9,5%, respectivamente. Observa-se que as mudanças de condições de estabilidade no programa Meteodyn WT, embora alterem os resultados individuais de cada local, não alteram o erro global do modelo. Neste estudo, os métodos de modelagem de escoamento de mesoescala apresentam erro médio de 5,6%.

Estes são alguns dos trabalhos disponíveis publicados que procuram realizar a validação dos programas CDF Meteodyn WT e WindSim, comparando seus resultados a resultados reais de torres de medição anemométrica assim como erro existente entre os programas Meteodyn WT, WindSim e WAsP quando comparados às medições reais.

3 METODOLOGIA ESTATÍSTICA E ANALÍTICA

3.1 Análise estatística dos dados de vento

A previsão adequada do potencial eólico no decorrer dos anos seguintes ao período de medição em campo é a principal característica a ser determinada na análise da viabilidade de um parque eólico. Sabe-se que a velocidade do vento varia ao longo do dia, do mês, do ano e até mesmo ao longo dos anos; portanto, faz-se necessário que o período-base de medição das características do vento em campo não constitua uma amostra atípica do regime dos ventos locais, fazendo-se necessária a correlação com dados de longo prazo, período de aproximadamente vinte anos, obtidos próximo ao local de medição.

3.1.1 Coleta dos dados de vento

A coleta dos dados anemométricos é realizada através de torres de medição instaladas no local de interesse e obedece a parâmetros normatizados pela IEC 61400-12, que define o período de coleta dos dados de 10 em 10 minutos.

A cada período de 10 minutos são registrados quatro valores, médio, máximo, mínimo e desvio padrão, para cada sensor instalado na torre de medição e estes dados são armazenados em um *datalogger*, compilador de dados.

Quando relacionamos a média de 10 em 10 minutos há perda de informação a cerca da turbulência do local, observa-se na Figura 3.1 que se perde a série de dados que leva ao pico de turbulência, mantendo-se as informações estatísticas do pico de turbulência e a serie de dados dos picos diários e sinópticos. Considerando a coleta de dados a cada minuto observa-se que o tratamento dos picos diários e sinópticos continuaria sendo realizado como serie de dados, mas o pico de turbulência seria dividido em metade como série de dados e a outra metade como estatística. Ressalta-se também que coletar dados a cada minuto não seria eficiente em termos de memória disponível no *datalogger*, o mesmo completaria sua memoria muito rapidamente.

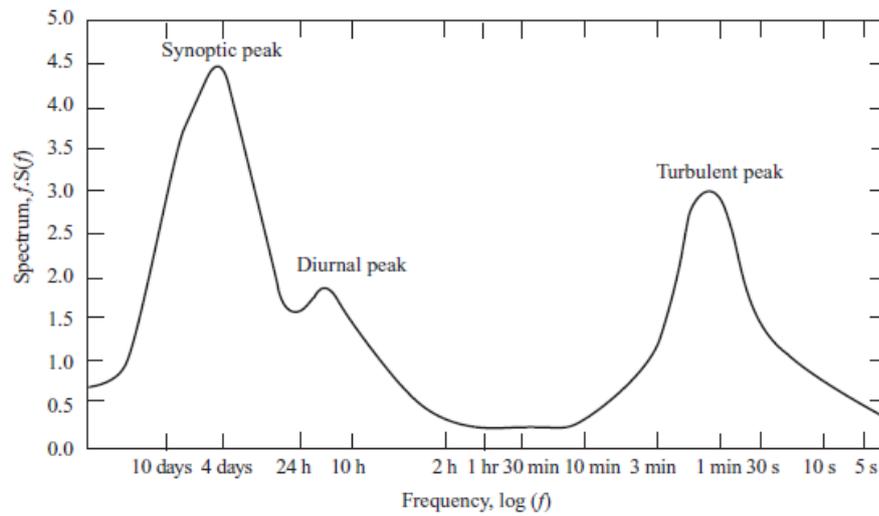


Figura 3.1 - Espectro de vento com base no trabalho de [Van der Hoven, 1957]

3.1.2 Histograma de velocidades

A série de dados obtida em uma estação anemométrica tem característica estocástica, e sua velocidade é uma variável aleatória contínua. Desta forma, com o objetivo de facilitar sua análise, faz-se necessária sua discretização, construindo-se assim um histograma de velocidades no tempo que representa a frequência dos dados obtidos na série temporal em cada intervalo de velocidade (Figura 3.2) [Villar Alé e Pereira, 2002].

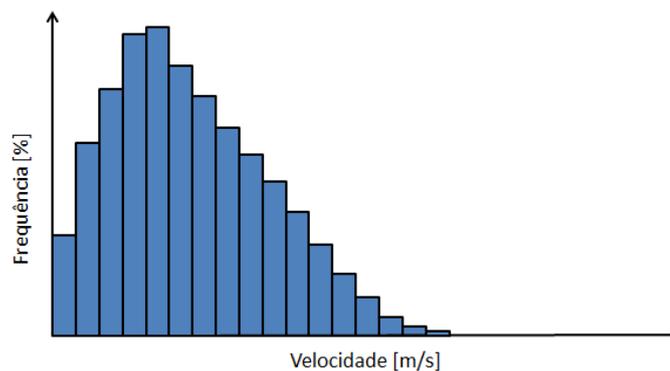


Figura 3.2 – Histograma de Velocidade do Vento

3.1.3 Distribuição de Weibull

Estudos estatísticos da velocidade do vento em diversas regiões consagraram o uso da função de Weibull como a função distribuição que melhor se ajusta ao histograma de

velocidades do vento, reportando os melhores resultados. A expressão da densidade de distribuição da velocidade de Weibull é dada pela Equação 3.1.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right\} \quad (3.1)$$

Onde v é a velocidade do vento em m/s, c é o fator de escala em m/s e k é o fator de forma. O fator de escala está relacionado com a velocidade média, e o fator de forma, adimensional, é relacionado com a variância da velocidade do vento em torno da velocidade média. Graficamente, a função de Weibull é representada pela Figura 3.3 [Villar Alé e Pereira, 2002].

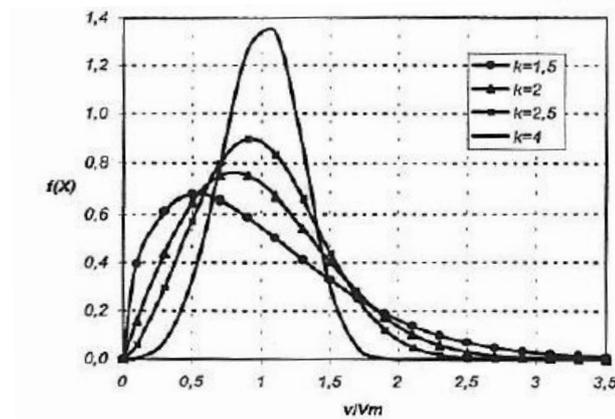


Figura 3.3 – Função de Weibull adimensional [Villar Alé e Pereira, 2002]

3.1.4 Direção do vento

A direção predominante do vento também deve ser avaliada por meio de uma distribuição de frequência da direção do vento. Esta direção é graficamente representada na forma de uma rosa dos ventos (Figura 3.4), dividida normalmente em 24, 36 ou 48 setores.

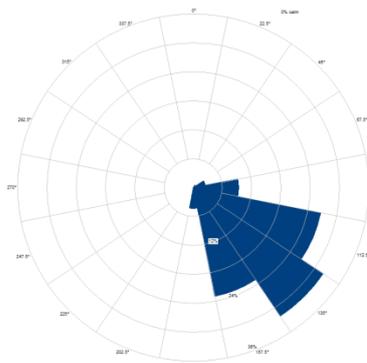


Figura 3.4 – Estatística da direção do vento, rosa dos ventos

A informação obtida por meio da rosa dos ventos é de grande importância para o correto posicionamento dos aerogeradores em um parque eólico, otimizando-se assim a interferência entre os aerogeradores.

3.2 Conceitos físicos

3.2.1 Estabilidade atmosférica

Os efeitos da estabilidade atmosférica na energia eólica foram desprezados pelos especialistas durante um longo período de tempo. Atualmente, entendeu-se que o fenômeno deve ser considerado, pois influencia consideravelmente a velocidade do vento. Nos aerogeradores, esse efeito gera uma diferença de força ao longo do diâmetro do rotor, fazendo com que as pás sejam submetidas a esforços diferentes ao longo do seu ciclo.

De acordo com Villar Alé e Pereira [2002], a estabilidade atmosférica depende do ciclo diário de radiação solar e é regida por uma distribuição vertical de temperatura resultante do calor radioativo ou do resfriamento da superfície da terra e a consequente mistura convectiva das massas de ar adjacentes à superfície.

Podemos classificar a estabilidade atmosférica em estável, instável ou neutra (Figura 3.5).

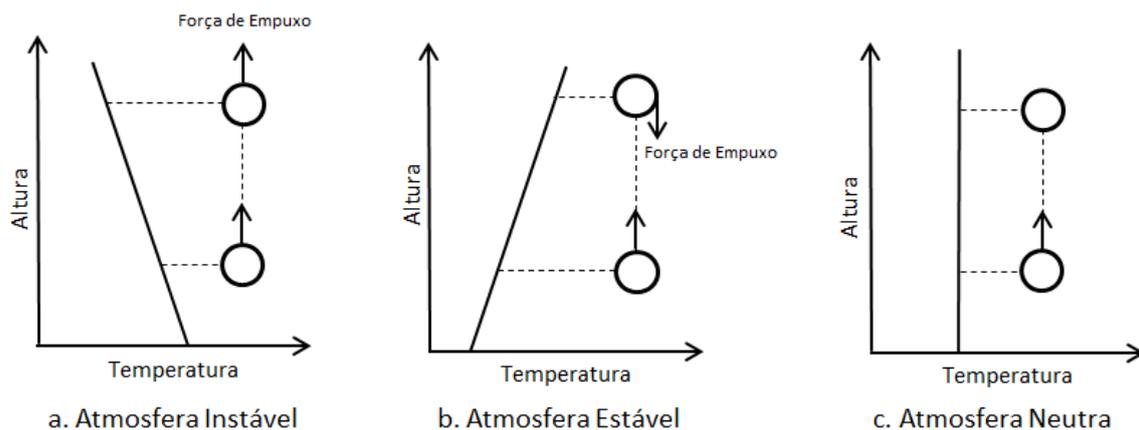


Figura 3.5 – Os estados da atmosfera, adaptado de [Rohatgi, 1994]

Tendo como exemplo a bolha de ar do desenho anterior, que chamaremos de elemento, temos a condição de atmosfera neutra quando o elemento possui a mesma densidade que o ar no seu entorno, permanecendo em equilíbrio e com gradiente vertical de velocidade, *wind shear*, constante ao longo do dia. O caso de instabilidade atmosférica

acontece quando o elemento é menos denso que o ar ao seu entorno e tende a subir por flutuação; neste caso o gradiente vertical de velocidade tende a diminuir devido ao aumento da intensidade de turbulência. Caso o elemento seja mais denso que o ar do seu entorno, ele tenderá a descer da sua posição inicial sendo classificado como condição de atmosfera estável; neste caso o gradiente vertical de velocidade tende a aumentar, ocorrendo diferentes misturas de massa de ar entre camadas a diferentes altitudes [Villar Alé e Pereira, 2002]. A Figura 3.6 mostra a influência da estabilidade atmosférica no escoamento e no perfil do vento. A densidade do ar é classificada como massa por unidade de volume da atmosfera da Terra; ela diminui com o aumento da altitude e sofre mudanças com a diferença de temperatura e umidade do local.

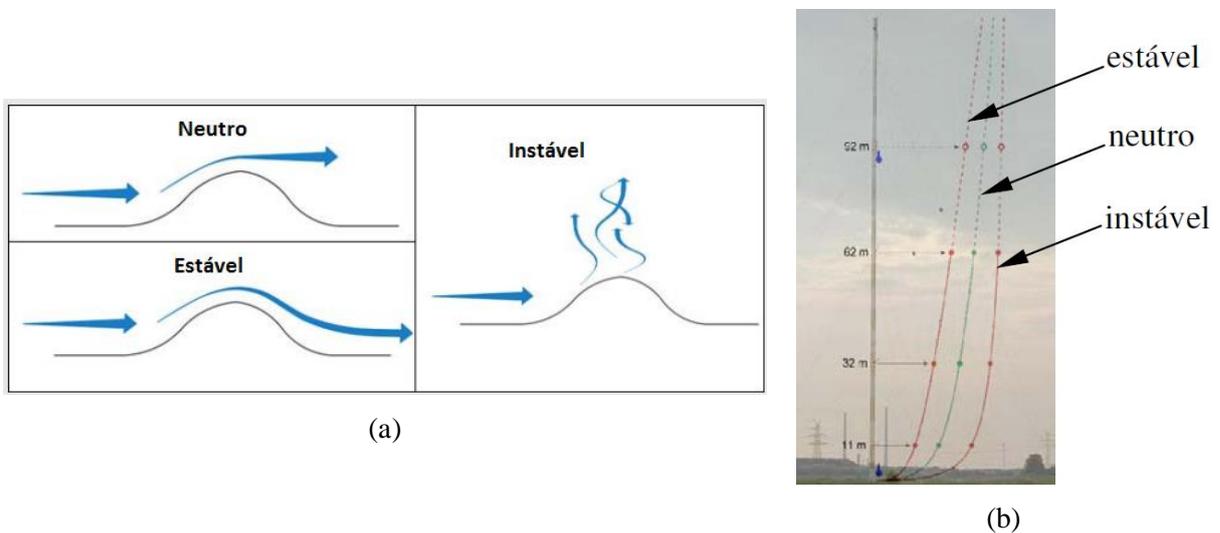


Figura 3.6 – Influência da estabilidade sobre o escoamento (a) e o perfil de vento (b) [Wenzel, 2013 e Dorweiler, 2007]

A estabilidade atmosférica é verificada por meio de médias diárias ou sazonais, não devendo ser avaliada pontualmente em um curto período de tempo. Porém, certas áreas tendem a ter uma condição de estabilidade definida dadas as características térmicas do solo. Por exemplo, durante o dia o deserto possui um grande aquecimento do solo por radiação solar e do ar por convecção livre; portanto, produz condições atmosféricas instáveis mais frequentemente que um terreno onde exista cultivo. Já, durante a noite, o rápido resfriamento do terreno desértico e do ar o induz a condições atmosféricas estáveis. Pode-se considerar, então, que este parâmetro depende dos dados de nebulosidade, insolação e velocidade média do vento [Villar Alé e Pereira, 2002].

Observa-se a importância do desenvolvimento de modelos de escoamento que preveem a ampla gama de condições de estabilidade atmosférica existentes no mundo real,

dada sua grande influência sobre a variação da velocidade do vento durante o período de um dia. Embora esta combinação de estabilidade varie em cada local de implantação de um projeto eólico, a convecção diurna devido ao aquecimento solar da superfície e estabilidade noturna devido ao resfriamento radiativo é comum [Beaucage *et. al.*, 2013].

3.2.2 Camada limite atmosférica

O conceito de camada limite surgiu dentro da mecânica dos fluidos, no fim do século XIX, quando o engenheiro inglês William Froude desenvolveu experimentos em laboratório para estudar a resistência de água em contato com um meio sólido. Na atmosfera, o conceito foi introduzido por Ludwig Prandtl no princípio do século XX dentro de suas pesquisas aerodinâmicas. O fato marcou o começo da era moderna da mecânica dos fluidos. Prandtl mostrou que o escoamento viscoso pode ser analisado em duas regiões distintas: uma, próxima das fronteiras, chamada de camada limite, onde o efeito da viscosidade é importante; e outra, sobre esta camada, onde o fluido pode ser tratado como não viscoso [Schlichting, 1978].

A camada limite descreve a região de contato direto entre um fluido em movimento e um corpo, onde se observa que o fluido em contato direto com a fronteira sólida tem a mesma velocidade que ela, ou seja, zero. Percebe-se, então, uma desaceleração do fluido entre as camadas fluidas próximas à superfície embora o fluido continue em movimento. Assim, as camadas de fluido com menor velocidade exercem uma força retardadora no fluido até uma distância em que a velocidade do escoamento seja essencialmente igual à velocidade de corrente livre [Fox e McDonald, 2001]. A Figura 3.7 ilustra o processo de formação da camada limite em uma placa plana e o efeito rotacional das partículas de fluido dentro da camada limite.

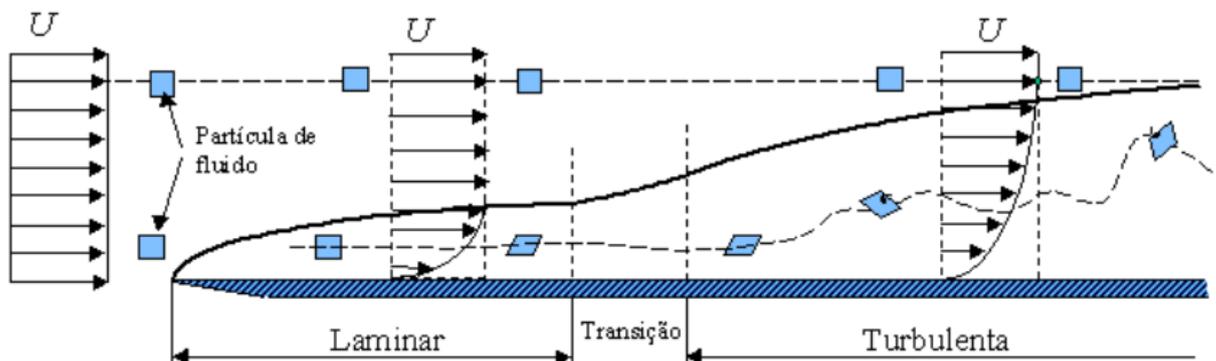


Figura 3.7 – Camada Limite e Efeito Rotacional de Partículas [Villar Alé e Pereira, 2002]

A estrutura da Camada Limite Atmosférica (CLA) em terrenos planos é similar à estrutura da camada limite em uma placa plana, ambas apresentam um perfil logarítmico de velocidades. Na CLA, para qualquer velocidade de vento, o número de Reynolds é tão alto, que se confia que o escoamento seja turbulento [Loredo-Souza *et al.*, 2004]. A CLA está localizada na troposfera terrestre e pode ser definida como a região diretamente influenciada pela superfície terrestre e suas propriedades, atrito, aquecimento e resfriamento. Sua escala de tempo é inferior a uma hora e sua altura varia de centenas de metros a vários quilômetros, que vai desde a superfície da Terra até o nível do vento geostrófico, na atmosfera livre [Stull, 1988].

De acordo com Dorweiler [2007], (Figura 3.8), divide-se a CLA abaixo da atmosfera livre em três níveis:

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

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

3. A última camada antes da atmosfera livre é a Camada de Ekman; sua dinâmica é dominada pela força de Coriolis, gradiente de pressão e força de atrito. Com a altura, as forças de atrito diminuem, e a uma altura de aproximadamente 1.000 m deixa de ter influência.

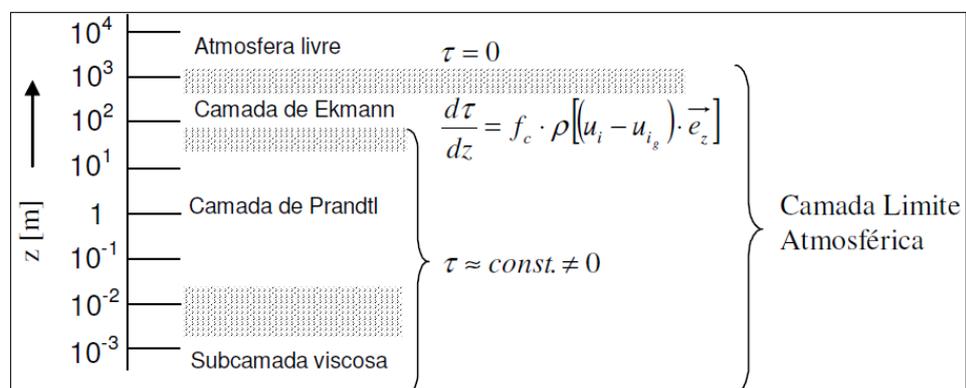


Figura 3.8 – Estrutura dinâmica da camada limite atmosférica [Dorweiler, 2007]

A altura da camada limite é controlada principalmente pelo gradiente de pressão e sofre efeito considerável da rugosidade da superfície, já que, por definição, tem de ser o ponto em que a velocidade média do vento torna-se independente do solo [De Freitas Filho, 2012].

Como os aerogeradores em operação comercial são instalados no interior da camada limite atmosférica, é importante conhecer o perfil de distribuição da velocidade do vento com a altura, tendo em vista a direta influência energética na produtividade do aerogerador. O perfil do vento influencia também na vida útil do aerogerador, pois ele tem seus componentes trabalhando com cargas cíclicas em função da turbulência existente no interior da camada limite.

3.2.3 O perfil vertical do vento

Os ventos são influenciados pelos parâmetros do local, como obstáculos próximos à medição anemométrica, rugosidade e orografia do terreno. Existem dois perfis de velocidade média para a realização de estudos de aproveitamento energético dos ventos, o perfil em lei de potência e o perfil logarítmico [Loredou-Souza *et. al.*, 2004].

O modelo baseado na lei logarítmica (Equação 3.2) é mais complexo e realístico, pois considera que o escoamento na atmosfera é altamente turbulento. O modelo apresenta um bom ajuste na camada próxima ao solo, mas pobre na região superior da CLA; e é obtido pela equação do escoamento da quantidade de movimento na camada superficial:

$$\overline{u'w'} = -l^2 \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right| \frac{\partial U}{\partial z} \quad (3.2)$$

Onde o comprimento de mistura l praticamente não varia com a altura na camada superficial e é dado pela Equação 3.3.

$$l = \kappa z \quad (3.3)$$

Onde κ representa a constante de Von Kàrmàn, cujo valor adotado geralmente é 0,4 [Schlichting, 1978]. Quando integrados ao longo da altura $z = z_0$ para qualquer altura z obtém-se a equação logarítmica apresentada na forma da Equação 3.4.

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (3.4)$$

Onde $u(z)$ é a velocidade do vento na altura z . A velocidade de atrito u_* e o comprimento de rugosidade z_0 são dependentes das características do vento e da rugosidade local. A velocidade de atrito u_* está relacionada com a tensão superficial τ e é definida pela Equação 3.5 [Troen e Lundtang, 1990].

$$|\tau| = \rho u_*^2 \quad (3.5)$$

A velocidade de corte é uma medida da declividade do perfil logarítmico, e a rugosidade aerodinâmica define a intersecção do perfil de velocidades média com o plano de deslocamento zero [De Freitas Filho, 2012].

3.2.4 Comprimento de Monin-Obukhov

O comprimento de Monin-Obukhov L , foi definido pela primeira vez por Alexander Obukhov em 1946 e é conhecido por esse nome devido ao seu importante papel na teoria da similaridade desenvolvido por Monin e Obukhov [American, 2014].

O comprimento de Monin-Obukhov [Equação 3.6] é definido como a altura da CLA onde os efeitos da turbulência mecânica se equivalem aos efeitos da turbulência convectiva e é utilizado para descrever os efeitos da flutuação nos escoamentos turbulentos acima da superfície [American, 2014].

$$L = -\frac{u_*^3 \bar{\theta}_v}{\kappa g (\overline{w'\theta'_v})_s} \quad (3.6)$$

onde u_* é a velocidade de atrito, $\bar{\theta}_v$ é a temperatura média virtual potencial, $(\overline{w'\theta'_v})_s$ é a superfície do fluxo de temperatura virtual potencial e κ é a constante de Von Kármán. O fluxo temperatura virtual potencial é dada pela Equação 3.7 [American, 2014].

$$\overline{w'\theta'_v} = \overline{w'\theta'} + 0,61\bar{T} \cdot \overline{w'q'} \quad (3.7)$$

onde θ é a temperatura potencial, \bar{T} é a temperatura absoluta e q é umidade específica.

Por esta definição, L é geralmente negativo durante o dia considerando que $\overline{w'\theta'_v}$ é tipicamente positivo durante o dia, positivo à noite, considerando que $\overline{w'\theta'_v}$ é normalmente negativo, e se torna infinito ao amanhecer e ao entardecer, quando $\overline{w'\theta'_v}$ passa através de zero, ficando positivo e negativo [American, 2014].

A interpretação física de L é dada pela teoria da similaridade de Monin-Obukhov. Durante o dia, $-L$ é a altura em que a produção flutuante de energia cinética turbulenta (TKE) é igual à produzida pela ação cisalhante do vento [American, 2014].

3.2.5 Topografia local

A análise da topografia local é parte fundamental para o sucesso de um empreendimento eólico, pois o comportamento do vento é diretamente afetado pelas suas características e peculiaridades. A complexidade do terreno deve ser avaliada devido a existência de montanhas e vales, que causam uma grande variação de altura na área e exercem grandes efeitos no escoamento do ar. Os incrementos de velocidade e turbulência ocasionados pela topografia devem ser considerados no potencial de um parque eólico, assim como as regiões de separação e recirculação de vento que não são benéficas aos aerogeradores e fazem com que a viabilidade do projeto seja muito mais complicada, Figura 3.9 [Stangroom, 2004].

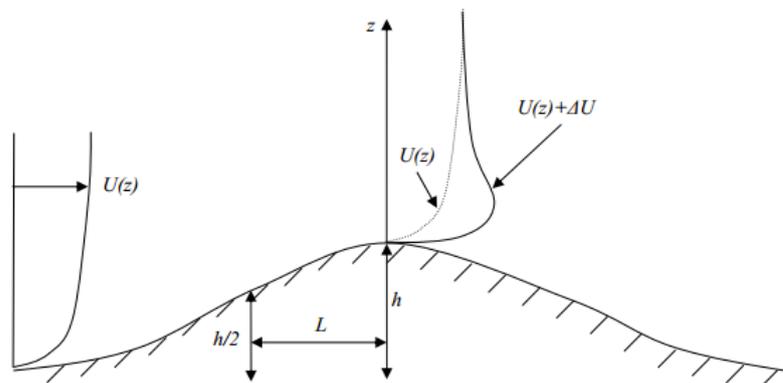


Figura 3.9 – Desenvolvimento do perfil de vento sobre uma colina [Stangroom, 2004]

O local ideal de inserção de um parque eólico é em regiões planas, onde o escoamento está totalmente desenvolvido e é muito bem compreendido. Ao mesmo tempo devemos considerar a implantação de parques em regiões complexas, onde em parte das vezes o potencial eólico disponível se apresenta superior ao disponível em terrenos planos. Portanto, deve-se possuir um claro entendimento desses efeitos e sua influência.

Bowen e Mortensen criaram, em 1996, um índice que avalia a complexidade topográfica de um terreno, chamado de RIX (*Ruggedness Index*) ou índice de complexidade. O índice tem como objetivo indicar a fração percentual da área de um terreno circular que excede a inclinação crítica. Um terreno plano terá, então, um RIX de 0%; já um terreno complexo, acima de 30%. Isto significa que cerca de um terço do terreno é mais acentuado do que a inclinação crítica [WAsP, 2013].

Os modelos numéricos atuais utilizados pela indústria de energia eólica, por exemplo, o programa WAsP, estão limitados a regiões com terreno plano por conterem modelos simplificados de turbulência e rugosidade superficial. Estes modelos são rápidos e fáceis de usar; entretanto, não conseguem prever adequadamente a separação e recirculação do escoamento e tendem a superestimar a velocidade do vento e subestimar a turbulência [Stangroom, 2004].

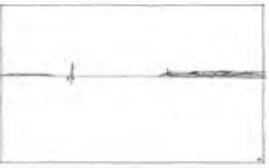
Modelos de escoamento mais complexos estão disponíveis, e o que se espera deles é um aumento na precisão da previsão do recurso eólico, especialmente em terrenos altamente complexos onde ocorre a separação do escoamento ou quando os efeitos de estabilidade térmica tornam-se importantes. Assim, neste trabalho o estudo dos efeitos da topografia será feito por meio da utilização de ferramentas de CFD.

3.2.6 Efeitos da rugosidade

A CLA é diretamente afetada pelas características superficiais do terreno e pelos obstáculos existentes. Entretanto, nem todos os elementos topográficos contribuem para o aumento da rugosidade, como é o caso dos elementos que causam aumento da turbulência. A rugosidade superficial é determinada pelo tamanho e pela distribuição dos elementos de rugosidade que a compõem, parametrizada em uma escala de comprimento, chamada de comprimento de rugosidade z_0 . [Custódio, 2013].

No estudo prévio de implantação de um parque eólico faz-se necessária a análise completa da rugosidade superficial do terreno, em toda a sua extensão. A rugosidade superficial do terreno é classificada de acordo a Tabela 3.1 [WAsP, 2013].

Tabela 3.1. Características da Superfície do Terreno e rugosidade aerodinâmica z_0 , adaptado de [WAsP, 2013]

	Características da superfície do terreno	z_0 Físico [m]
	Florestas altamente densas	>1.00
	Cidades	1.00
	Florestas	0.80
	Área residencial	0.50
	Plantações (<i>Shelterbelts</i>)	0.30
	Grande quantidade de árvores baixas e/ou arbustos	0.20
	Fazenda com aparência fechada	0.10
	Fazenda com aparência aberta	0.05
	Fazenda com muito poucos prédios/árvores	0.03
	Áreas de aeroporto com prédios e árvores	0.02
	Área de pista do aeroporto	0.01
	Grama Cortada	0.008
	Solo sem vegetação	0.005
	Superfícies com neve	0.001
	Superfícies com areia	0.0003
	Lagos	0.0002
	Mar Aberto	0.0001

4 MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

4.1 Modelagem empregada no WAsP

O programa WAsP, *Wind Atlas Analysis and Application Program*, desenvolvido pelo Risø DTU National Laboratory, é um modelo espectral baseado na teoria de Jackson-Hunt, 1975. O modelo resolve as equações linearizadas de Navier-Stokes assumindo várias condições, como escoamento permanente, advecção linear e problema de fechamento de turbulência de primeira ordem [Beaucage *et. al.*, 2013].

Para a avaliação do recurso eólico disponível sobre determinada localidade por meio do programa WAsP, é necessário o desenvolvimento de um atlas eólico que consiste na extrapolação vertical e horizontal das estatísticas do clima, derivadas de uma série de dados de vento medidos em um ponto específico do projeto, torre anemométrica, em uma malha de dados que descreva climatologicamente a área que deseja ser analisada [WAsP, 2013].

Os cálculos se baseiam em uma combinação de modelos aplicados à camada limite atmosférica que representam a mudança da velocidade do vento devido às diferentes alturas orográficas, ao efeito de arrasto nas mudanças de rugosidade, o efeito de bloqueio de obstáculos e os efeitos de estabilidade térmica [Wallbank, 2008].

O programa foi desenvolvido para uso sob as hipóteses de que o local possui predominantemente estabilidade neutra, o terreno suficientemente suave tal que a separação do escoamento seja mínima, o que torna-o mais linear e o local de referência (torre de medição) e o local previsto possuam regime climático relativamente semelhante [Wallbank, 2008].

A Figura 4.1 mostra a representação do modelo de análise utilizado pelo programa WAsP, com todos os parâmetros de entrada necessários para a estimativa de potencial eólico, como topografia, rugosidade obstáculos e a série temporal de dados de vento.

Em primeiro lugar, os dados temporais são transformados em representações estatísticas através do ajuste da curva de Weibull, atribuindo aos dados correspondentes fatores de distribuição de escala A e forma k para cada setor [Wallbank, 2008].

Os dados são extrapolados a uma altura de vento geostrófico, paralelo às isobáricas, através da aplicação da lei do arrasto geostrófico, responsável por eliminar os efeitos da rugosidade, orografia e obstáculos do escoamento de ar. Em seguida, os dados são reinsertos

no local previsto e os efeitos do terreno, rugosidade e obstáculos específicos são reintroduzidos [Wallbank, 2008].

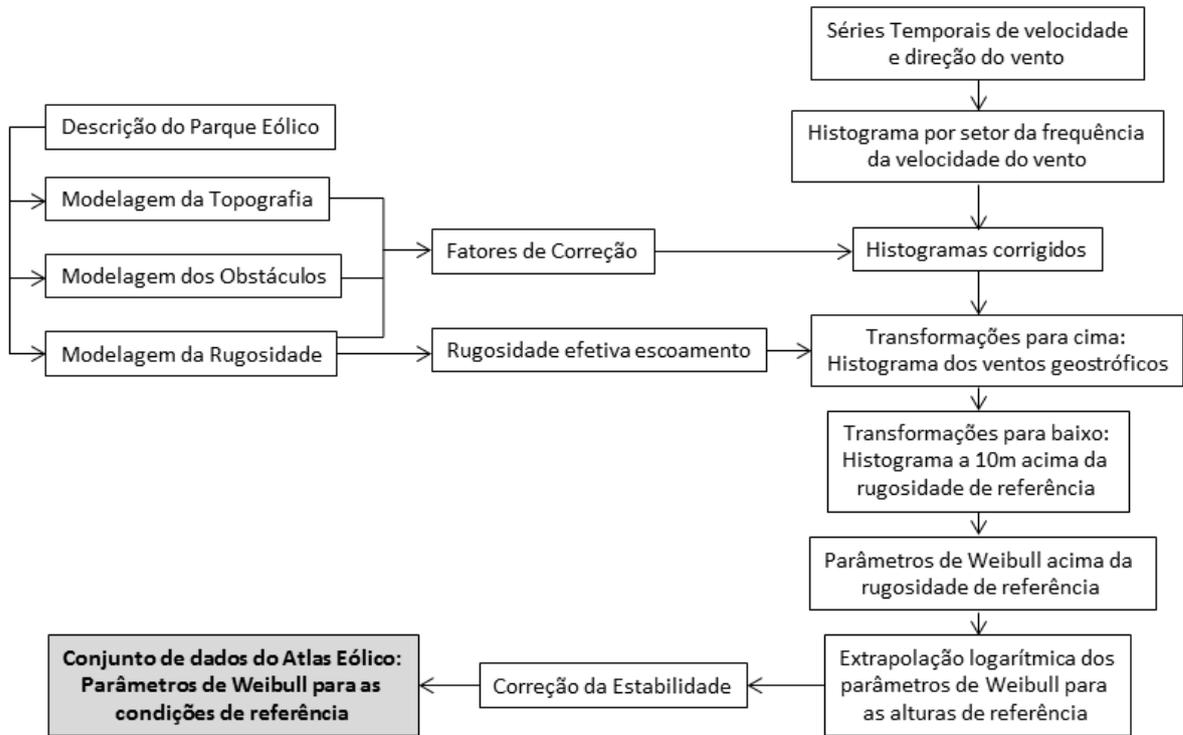


Figura 4.1 – Representação do modelo de análise do programa WaSP, adaptado de [Troen e Lundtang, 1990].

O modelo (Equação 4.1) se deduz da lei de resistência aerodinâmica geostrófica e do perfil vertical do vento, expressando a estabilidade atmosférica como uma expansão de primeira ordem de um estado neutro devido ao fluxo de calor na superfície [Troen e Lundtang, 1990].

$$dG = 0 = \frac{du_*}{u_*} G - \frac{u_*^2}{\kappa^2 G} \left[\left(\ln \frac{u_*}{fz_0} - A(\mu) \right) \left(\frac{du_*}{u_*} - \frac{dA}{d\mu} d\mu \right) + B \frac{dB}{d\mu} d\mu \right] \quad (4.1)$$

Para estabilidade neutra $A(0) \approx 1,8$, $B(0) \approx 4,5$, $\frac{dA}{d\mu} \approx -0,2$ e $\frac{dB}{d\mu} \approx +0,2$.

Desprezando os termos pequenos da Equação 4.1 obtém-se a Equação 4.2.

$$\frac{du_*}{u_*} \cong \left[\frac{cg}{fT_0 c_p \rho G^2} \right] dH \quad (4.2)$$

com constante $c \approx 2,5$. A Equação 4.2 nos dá o desvio do valor neutro de u_* a partir do valor médio de fluxo de calor na superfície dH , e serve também para avaliar a raiz quadrada das flutuações u_* a partir da raiz quadrada do fluxo de calor na superfície para dH . Para o vento geostrófico G , escolhe-se um valor em que a distribuição de frequência da velocidade do vento tenha o máximo de densidade de energia. A diferencial do perfil de vento é apresentada na Equação 4.3 [Troen e Lundtang, 1990].

$$du(z) = \frac{du_*}{\kappa} \left(\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \psi \left(\frac{z}{L} \right) \right) - \frac{u_*}{\kappa} \frac{d\psi}{dL} \frac{dL}{dH} dH \quad (4.3)$$

Introduzindo nesta equação os valores dos coeficientes em condição neutra de estabilidade térmica, e utilizando também a Equação 4.2, se obtém uma expressão para uma altura z_m sobre o solo, onde os efeitos de primeira ordem da modelagem do fluxo de calor na superfície desaparecem, fazendo com que haja muito pouca variação da velocidade do vento. Considera-se então que $du(z_m) = 0$ e a partir disso obtém-se a Equação 4.4 [Troen e Lundtang, 1990].

$$\frac{z_m}{\ln \left(\frac{z_m}{z_0} \right)} = \left(\frac{c}{a\kappa} \right) \frac{u_*^3}{fG^2} \quad (4.4)$$

Onde o novo valor para a constante a é dependente da função ψ , para o caso neutro, e com valor entre 4 e 5 torna a expressão estável ou instável. Utilizando a lei de resistência aerodinâmica neutra (Equação 4.5), gera-se uma expressão mais elegante para a Equação 4.4, mostrada na Equação 4.6 [Troen e Lundtang, 1990].

$$\frac{u_{*0}}{G} = \frac{0,5}{\ln(Ro) - A(0)} \quad (4.5)$$

$$\frac{z_m/z_0}{\ln(z_m/z_0)} \approx \text{constante} \cdot Ro(\ln(Ro) - A(0))^{-3} \quad (4.6)$$

Com o valor da *constante* $\approx 0,1$, o número de Rossby na superfície, Ro , se define através da Equação 4.7, aproximando a equação de uma expressão potencial (Equação 4.8) [Troen e Lundtang, 1990].

$$Ro = \frac{G}{fz_0} \quad (4.7)$$

$$\frac{z_m}{z_0} \approx \alpha \cdot Ro^\beta \quad (4.8)$$

Com constantes $\alpha = 2,0 \cdot 10^{-3}$ e $\beta = 0,9$. É interessante perceber que a altura z_m é constante longo de grandes áreas devido à fraca dependência com z_0 . Essa afirmação não é válida na costa, onde o z_m no mar é aproximadamente a metade do que na terra [Troen e Lundtang, 1990].

Como a maioria dos modelos de diagnóstico em microescala, o WAsP calcula o vento médio para cada setor, independentemente. A fim de melhorar a precisão das previsões, alguns analistas têm proposto aplicar correções com base em sua experiência ou no RIX do terreno [Beaucage *et. al.*, 2013]. No entanto, para fins de comparabilidade com os outros modelos de previsão de velocidade do vento, nenhuma correção foi aplicada.

4.2 Modelagem empregada no Meteodyn WT

A principal hipótese utilizada pelo Meteodyn WT para a obtenção de resultados é a de que na gama de velocidades do ar analisadas quando se trata de velocidades de vento, as variações do número de Reynolds não implicam em alterações dos padrões de escoamento.

Para o desenvolvimento de um projeto eólico por meio deste programa é necessária uma etapa de pré-processamento que consiste em fornecer os dados de entrada necessários, como topográfica, tamanho do domínio, localização e pontos de interesse.

Os resultados obtidos são direcionais e na forma de *speed-ups* (V_h), fator de aceleração horizontal, em todos os pontos denominados como pontos de interesse. Os *speed-ups* são calculados de acordo com a Equação 4.9 [Meteodyn WT, 2013].

$$V_h = \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{v_{ref}} \quad (4.9)$$

O programa resolve as equações de conservação de massa e Navier-Stokes com médias de Reynolds, empregando o método de volumes finitos. O conjunto de equações diferenciais parciais não lineares é resolvido em um domínio geométrico, dividido em pequenos volumes, comumente conhecido como malha.

Como dito anteriormente, a solução numérica de qualquer problema de escoamento requer a solução das equações de Navier-Stokes e continuidade. Os problemas de escoamento são descritos matematicamente por estas equações, caracterizadas por um conjunto de equações diferenciais parciais acopladas não lineares com condições de contorno apropriadas [Meteodyn WT, 2013].

O programa, portanto, aplica a decomposição de Reynolds às equações de Navier-Stokes utilizando a Simulação Numérica de Escoamentos Turbulentos via Equações de Médias de Reynolds, descrito no Capítulo 4.2.1, como modelo de turbulência [Meteodyn WT, 2013].

4.2.1 Modelagem do escoamento turbulento do programa Meteodyn WT

A Simulação Numérica de Escoamentos Turbulentos via Equações de Médias de Reynolds, como explanado no Capítulo 2.2, é um método que emprega duas classes de modelos: modelos de viscosidade turbulenta e modelos de fechamento de segunda ordem. O programa Meteodyn WT foi desenvolvido empregando o modelo de viscosidade turbulenta pela solução de uma equação de transporte com propriedades ligadas à turbulência (Rezende, 2009).

Considerando-se um escoamento permanente, incompressível e isotérmico, de um fluido Newtoniano, obtém-se a equação da conservação de massa (Equação 4.10) e da conservação de momento, com média de Reynolds (Equação 4.11).

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.10)$$

$$-\frac{\partial(\rho \bar{u}_j \bar{u}_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] + F_i = 0 \quad (4.11)$$

O tensor de Reynolds é avaliado com base no problema de fechamento de uma equação, considerando-se a hipótese de proporcionalidade entre suas correlações e os gradientes médios (Equação 4.12).

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \nu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.12)$$

A viscosidade turbulenta ν_T é considerada igual à raiz quadrada da energia cinética turbulenta, equação de transporte adicional, multiplicado por uma escala de comprimento turbulento (Equação 4.13).

$$\nu_T = k^{1/2} L_T \quad (4.13)$$

A energia cinética turbulenta representa a energia cinética, por unidade de massa, das variações de velocidade em um escoamento turbulento (Equação 4.14).

$$k = \frac{1}{2} u'_i u'_i \quad (4.14)$$

O modelo de turbulência resolve uma nova equação de transporte, a energia cinética turbulenta, permitindo que a solução leve em consideração os efeitos de esteira, obtendo assim resultados mais adequados quando estudado sobre terrenos complexos [Metodyn WT, 2013].

A equação de transporte adicional, que resolve a equação da energia cinética turbulenta, é dada na Equação 4.15.

$$\bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4.15)$$

Onde:

$$P_k = \nu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} \quad (4.16)$$

$$\varepsilon = C_\mu \frac{\nu_T}{L_T^2} k \quad (4.17)$$

A escala de comprimento turbulenta é calculada de acordo com um modelo baseado em Yamada e Arritt [Hurley, 1997]. Este modelo leva em conta os casos estratificação térmica estável neutra, ou instável, e é calculada pela Equação 4.18. [Metodyn WT, 2013].

$$L_T = \sqrt{2} S_m^{3/2} l \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{l} = \left(\frac{1}{l_o} + \frac{1}{kz} \right) \text{ onde } z \text{ é a altura} \\ C_\mu = \frac{4S_m}{B_1} \\ S_m \left\{ \begin{array}{ll} 1,96 \frac{(0,1912-R_{if})(0,2341-R_{if})}{(1-R_{if})(0,2231-R_{if})} & \text{se } R_{if} < 0,16 \\ 0,085 & \text{se } R_{if} > 0,16 \end{array} \right. \\ B_1 = 16,6 \\ l_o = 100m \\ k = 0,41 \end{array} \right. \quad (4.18)$$

O número de Richardson (R_{if}) é considerado um indicador da turbulência na camada limite e é calculado de acordo com o comprimento de Monin-Obukhov. Cada classe de estabilidade definida no programa corresponde a um comprimento de Monin-Obukhov diferente (Capítulo 4.2.2) [Meteodyn WT, 2013].

4.2.2 Classes de estabilidade

O programa define classes de estabilidade da camada limite atmosférica que variam de 0 a 9. Cada classe de estabilidade térmica corresponde a um determinado comprimento de Monin-Obukhov, mostrada na Tabela 4.1. A Figura 4.2 mostra o perfil do vento de acordo com a estabilidade atmosférica [Meteodyn WT, 2013].

Tabela 4.1. Classes de Estabilidade térmica e comprimento de Monin-Obukhov

Classe de Estabilidade Térmica	Comprimento de Monin-Obukhov Utilizado	Intervalo de comprimento de Monin-Obukhov	Estabilidade térmica
0	-80	$L \leq -100$	Muito instável
1	-500	-1000 / -100	Instável
2	1 000	-1000 / 2000	Neutra
3	1 500	1000 / 2000	Pouco estável
4	800	600 / 1000	Estável
5	500	400 / 600	Estável
6	300	250 / 400	Estável
7	200	150 / 250	Estável
8	130	100 / 150	Muito estável
9	60	$L < 100$	Muito estável

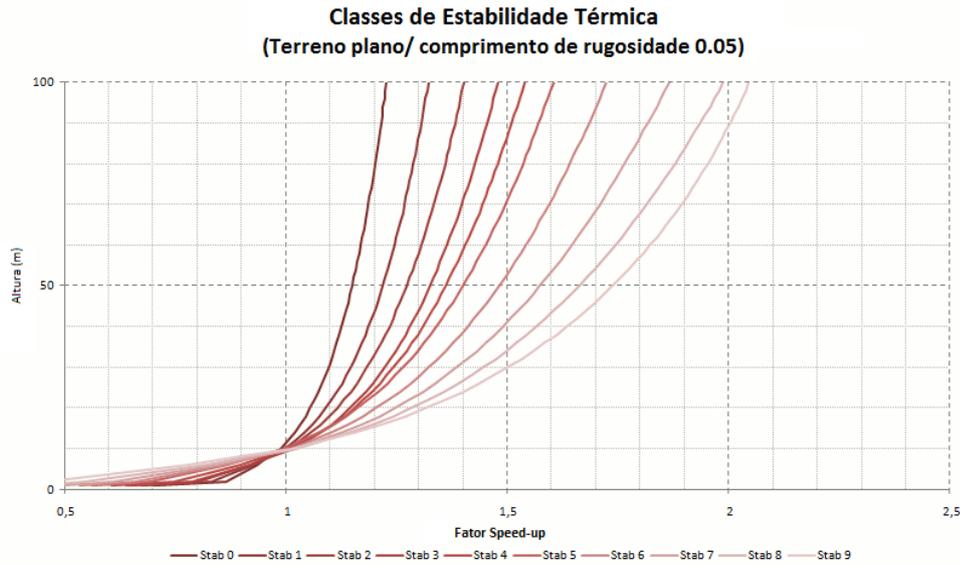


Figura 4.2 – Perfil do vento de acordo com a estabilidade atmosférica

4.2.3 Geração de malha

O programa Meteodyn WT, no seu formato padrão, gera a malha cartesiana refinada nos pontos de interesse inseridos, controlando-a dimensional e proporcionalmente de forma a evitar a instabilidade da convergência [Meteodyn WT, 2013].

O limite de pontos que definem o tamanho da malha no programa é de 28 milhões de células, e este limite não gera a malha de acordo com a topografia do projeto; portanto, para que áreas com fortes inclinações sejam corretamente modeladas, é necessária a inserção de pontos de interesse na região correspondente para obter-se o refinamento de malha local.

Salienta-se também que o programa disponibiliza ao usuário a delimitação de uma área de domínio onde se impõe alto refinamento de malha. A consequência negativa da utilização deste modelo é que o tamanho do domínio e/ou a resolução mínima a ser utilizada reduzirá drasticamente, pois o programa possui limitação máxima de 28 milhões de pontos em sua malha.

Observa-se na Figura 4.3 que na área de domínio delimitada, quadrado em linha preta, a malha é altamente refinada, o que acontece também na inserção de pontos de interesse fora do domínio [Meteodyn WT, 2013].

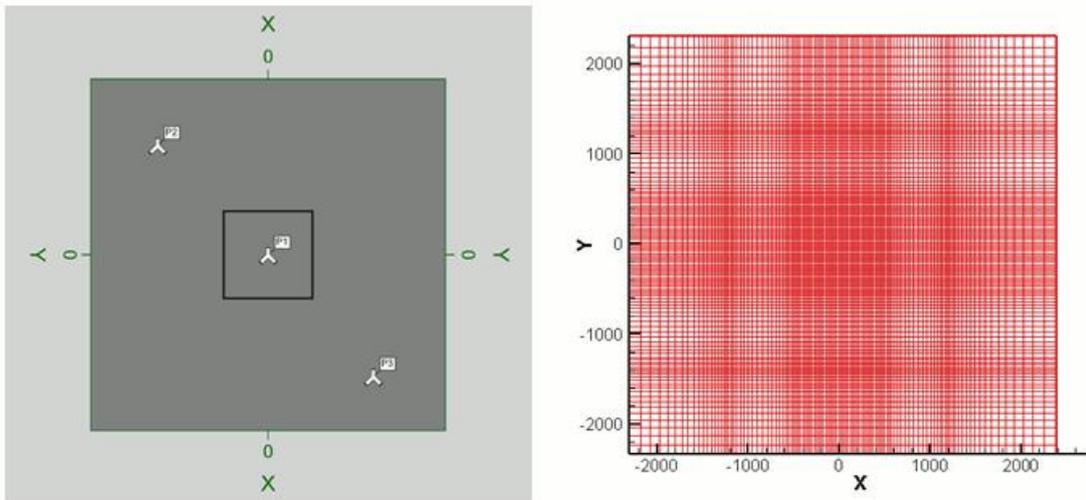


Figura 4.3 – Geração de malha, um ponto dentro de uma área delimitada e outros dois pontos fora da área [Meteodyn WT, 2013]

A altura Z da malha, que a transforma em um volume, é calculada pela Equação 4.19 a fim de condicionar um limite superior ao domínio.

$$Z_{top} = Z_{max} + \max(2800,5(Z_{max} - Z_{min})) \quad (4.19)$$

Onde:

Z_{top} : Altitude para a condição de contorno superior

Z_{max} : Altitude máxima do terreno dentro do domínio computacional

Z_{min} : Altitude mínima do terreno dentro do domínio computacional

O programa disponibiliza um parâmetro chamado verticalidade; este parâmetro tem como função controlar a ortogonalidade da linha sobre a superfície do solo a fim de evitar a geração de células enviesadas [Meteodyn WT, 2013].

O parâmetro corresponde à tangente do ângulo entre a célula e a normal ao solo e varia entre 0, malha perpendicularmente à superfície; e 1, extrusão direta da malha.

Caso o domínio a ser resolvido apresente problemas de convergência devido à existência de áreas montanhosas na fronteira, o programa disponibiliza um parâmetro chamado *smoothing*, que tem como função suavizar os limites da malha [Meteodyn WT, 2013].

4.2.4 Condições de contorno

As condições de contorno para o programa são definidas de acordo com a Figura 4.4 e detalhadas nos capítulos 4.2.4.1, 4.2.4.2, 4.2.4.3, 4.2.4.4 e 4.2.4.5.

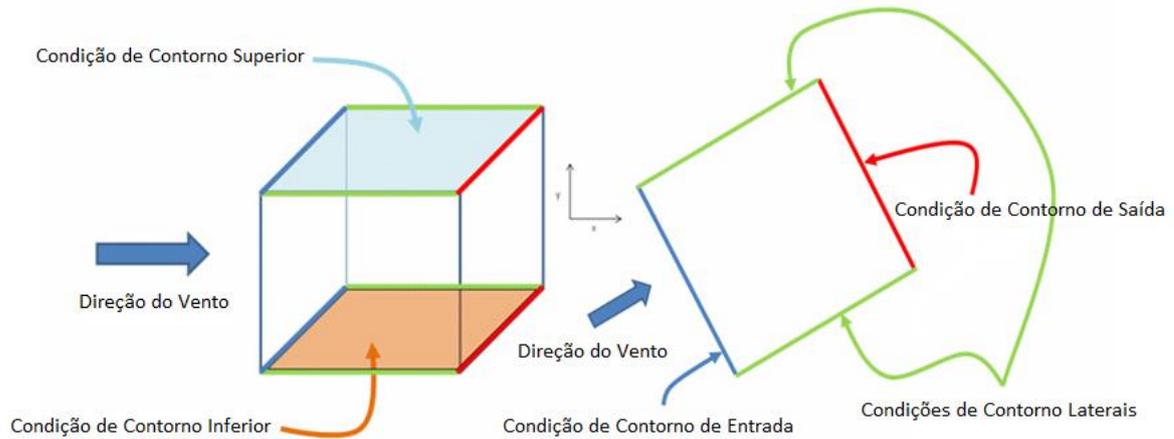


Figura 4.4 – Condições de contorno do programa Meteodyn WT, adaptado de [Meteodyn WT, 2013]

4.2.4.1 Condição de contorno de entrada

O programa define a condição de contorno de entrada, baseado em um determinado vento geostrófico, o qual, por definição, é independente das condições locais. Portanto, a velocidade de atrito (u_*) é deduzida da velocidade do vento geostrófico (u_g), de acordo com a Equação 4.20 [Meteodyn WT, 2013].

$$\left(\frac{u_g}{u_*}\right)^2 = \left(\ln\left(\frac{z_h}{z_0}\right) - A_2\right)^2 + B_2^2 \quad (4.20)$$

Onde z_0 é a rugosidade. Tennekes, 1982 mostrou que a espessura da camada limite atmosférica (z_h) é proporcional à velocidade de atrito (u_*). Conforme a Equação 4.21 [Meteodyn WT, 2013].

$$z_h = c \frac{u_*}{f} \quad (4.21)$$

Onde u_* é a velocidade de atrito e c , uma constante empírica que depende da estabilidade e varia de 0,60, instável, até 0,16, muito estável. O parâmetro de Coriolis (f) é definido com base na Equação 4.22 [Meteodyn WT, 2013].

$$f = 2\Omega \sin\phi \quad (4.22)$$

Onde Ω é a velocidade angular da terra e ϕ é a latitude do local. As funções de A_2 e B_2 são dadas pelas Equações 4.23, 4.24 e 4.25 [Meteodyn WT, 2013].

$$\text{Instável - Neutro } (\mu < 0): \quad A_2 = 5 - 4(1 - 0,0084\mu)^{-1/3} \quad B_2 = 4,5(1 - 3,3\mu)^{-1/3} \quad (4.23)$$

$$\text{Pouco Estável } (0 < \mu < 35): \quad A_2 = 1 - 0,38\mu \quad B_2 = 4,5 + 0,3\mu \quad (4.24)$$

$$\text{Muito Estável } (\mu > 35): \quad A_2 = -3,17(\mu - 20)^{1/2} \quad B_2 = 3,17(\mu - 12,5)^{1/2} \quad (4.25)$$

A velocidade do vento (\bar{u}) e a energia cinética da turbulência (k) são dadas pelas Equações 4.26, 4.27 e 4.28.

$$z < z_s \quad \bar{u} = \left(\frac{u_*}{\kappa}\right) \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi\left(\frac{z}{L}\right) \right] \quad k = 0,9 \left(\frac{u_*}{\kappa}\right)^2 \quad (4.26)$$

$$z_s < z < z_h \quad \bar{u} = u_g - (u_g - u_{zs}) \frac{\ln\left(\frac{z_h}{z}\right)}{\ln\left(\frac{z_h}{z_s}\right)} \quad k = \left(\frac{z_{top} - z}{z_{top} - z_s} 0,99 + 0,01\right) \left(\frac{u_*}{\kappa}\right)^2 \quad (4.27)$$

$$z > z_h \quad \bar{u} = u_g \quad k = \left(\frac{z_{top} - z}{z_{top} - z_s} 0,99 + 0,01\right) \left(\frac{u_*}{\kappa}\right)^2 \quad (4.28)$$

Onde z_{top} é o início do domínio de computação, u_{zs} é a velocidade do vento no topo, κ é a constante de Von Kàrmàn, z é a altura acima do nível do solo, z_0 é o comprimento de rugosidade e L , o comprimento de Monin-Obukhov [Meteodyn WT, 2013].

4.2.4.2 Condição de contorno de inferior

Na fronteira inferior do domínio computacional é aplicado um termo de redução de superfície F_s nas equações de momento, em todas as células que limitam a superfície inferior (Equação 4.29) [Meteodyn WT, 2013].

$$F_S = -\rho C_s U_t |U| \quad (4.29)$$

Onde:

U_t : Velocidade do vento tangencial à superfície inferior.

C_s : Uma função da rugosidade do local e da estabilidade térmica.

Em condições de alta rugosidade, como florestas, o programa possui condições específicas de cálculo para a condição de contorno inferior. Para maiores informações ver [Meteodyn WT, 2013].

4.2.4.3 Condições de contorno laterais

Nas fronteiras laterais do domínio computacional são aplicadas condições de simetria como condição de contorno.

4.2.4.4 Condição de contorno superior

Na fronteira superior do domínio computacional é aplicada a pressão atmosférica como condição de contorno.

4.2.4.5 Condição de contorno de saída

Na fronteira de saída do domínio computacional é aplicada a pressão atmosférica como condição de contorno.

4.2.5 Acoplamento pressão-velocidade

A solução segregada das equações de conservação da quantidade de movimento e da equação de conservação da massa resulta na necessidade de um esquema de acoplamento pressão-velocidade. O método utilizado pelo programa Meteodyn WT para a solução deste problema é o MIGAL, desenvolvido pela empresa MFRDC. Este *solver* tem sido utilizado regularmente ao longo dos anos e foi totalmente validado em casos acadêmicos [Ferry, 2002].

O MIGAL é um *solver* iterativo que atualiza, simultaneamente, as componentes da velocidade do vento e pressão ao longo de todo o domínio computacional. Este método exige uma maior capacidade de armazenamento quando comparado a outros métodos, mas tem a vantagem de aumentar drasticamente o processo de convergência.

Uma descrição muito precisa dos métodos numéricos desenvolvidos pode ser encontrada em na referência [Ferry, 2002].

4.3 Modelagem empregada no WindSim

O programa WindSim é utilizado como interface de outro programa CFD chamado Phoenix, desenvolvido pela empresa CHAM, (CHAM - *Concentration Heat and Momentum Limited*) localizada no Reino Unido. O programa se baseia em um sistema de modelagem do vento e do terreno em forma de malha e é fundamentado nas Equações Médias de Reynolds para solucionar as condições de vento em cada célula da malha [Wallbank, 2008].

4.3.1 Modelagem da Turbulência do programa WindSim

O escoamento do vento em mesoescala e microescala em um complexo eólico pode ser descrito de maneira estacionária e incompressível. O programa WindSim, através do modelo Phoenix, emprega as Equações Médias de Reynolds na modelagem do escoamento do vento mostradas nas Equações 4.30 e 4.31.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.30)$$

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - (\overline{u_i u_j}) \right) \quad (4.31)$$

Onde U é a velocidade média temporal, x é a componente de posicionamento, P é a pressão, ρ é a densidade, ν é a viscosidade cinemática e os índices i e j definem vetores unitários. O problema de fechamento relacionado é obtido relacionando as tensões de Reynolds com a velocidade média através da viscosidade turbulenta (Equação 4.32).

$$\overline{u_i u_j} = -\nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (4.32)$$

Onde ν_T é a viscosidade turbulenta e k é a energia cinética turbulenta.

4.3.1.1 Modelo de turbulência k-epsilon, padrão e modificado

O programa WindSim calcula a turbulência através do modelo k-epsilon ($k - \varepsilon$). Modelo de duas equações, usual na estrutura CFD, que inclui duas equações de transporte adicionais para modelar a turbulência. A primeira descreve a energia cinética turbulenta k (Equação 4.34), enquanto a segunda equação descreve a dissipação turbulenta ε (Equação 4.35), que determina a escala da estrutura turbulenta. A viscosidade turbulenta é dada na Equação 4.33 [Wallbank, 2008].

$$\nu_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \varepsilon \quad (4.34)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.35)$$

Onde c_μ , σ_k , σ_ε , $c_{\varepsilon 1}$ e $c_{\varepsilon 2}$ são constantes definidas na Tabela 4.2. E P_k é o termo de produção turbulenta dado na Equação 4.36.

$$P_k = \nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (4.36)$$

Para o modelo k-epsilon modificado, o modelo utiliza diferentes valores nas constantes aplicadas conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Constantes do modelo k-epsilon

Modelos de Turbulência	c_μ	σ_k	σ_ε	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$
k-epsilon padrão	0,09	1,0	1,3	1,44	1,92
k-epsilon modificado	0,0324	1,0	1,85	1,44	1,92

5 COMPLEXO EÓLICO: DADOS EXPERIMENTAIS E DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

O Complexo Eólico em estudo está localizado na zona oriental da Chapada Diamantina, no Nordeste brasileiro, tem 27 quilômetros de extensão e dista aproximadamente 400 quilômetros da costa do Oceano Atlântico.

As terras que envolvem o complexo, chamadas de zona de interferência, possuem dimensões aproximadas de 20 quilômetros acerca dos limites do projeto e apresentam relevo parcialmente acidentado, variando entre 800 e 1.200 m. As torres de medição estão localizadas nos cumes das montanhas, regiões mais altas da zona de interferência.

Grande parte da zona de interferência apresenta vegetação típica do semiárido nordestino, predominantemente caatinga. A caatinga tem característica de vegetação densa, entre dois e três metros de altura e é considerada o único bioma exclusivamente brasileiro, não podendo ser encontrada em nenhum outro lugar do planeta.

A Figura 5.1 mostra imagens reais do complexo eólico; nelas, podem-se observar as reais características do local, como o relevo e a rugosidade.

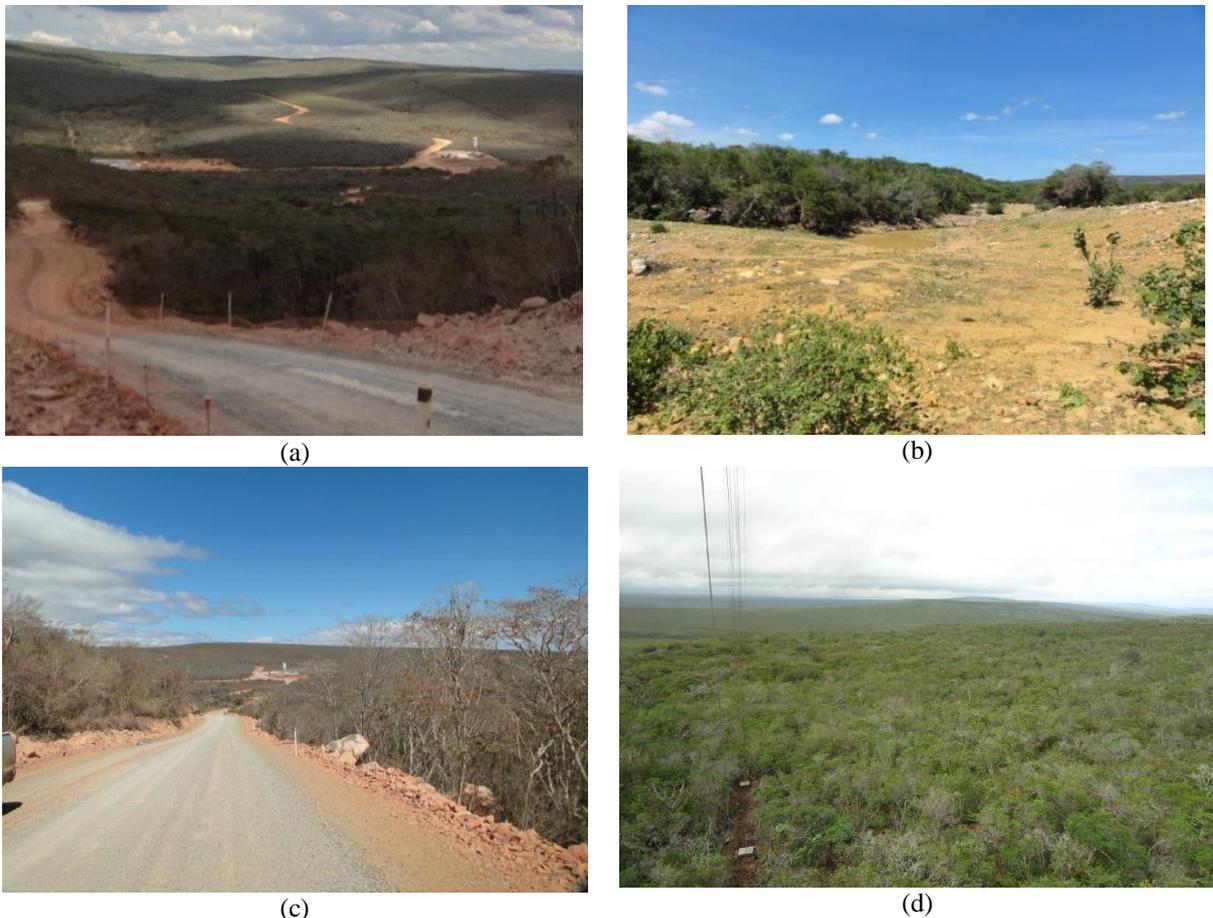


Figura 5.1 – Representação do relevo e da rugosidade do Complexo Eólico

A análise da influência da topografia de um terreno complexo, com suas características orográficas e de rugosidade, no vento local é altamente recomendada para o estudo com um modelo CFD. A Figura 5.2 mostra a modelagem computacional destes fatores.

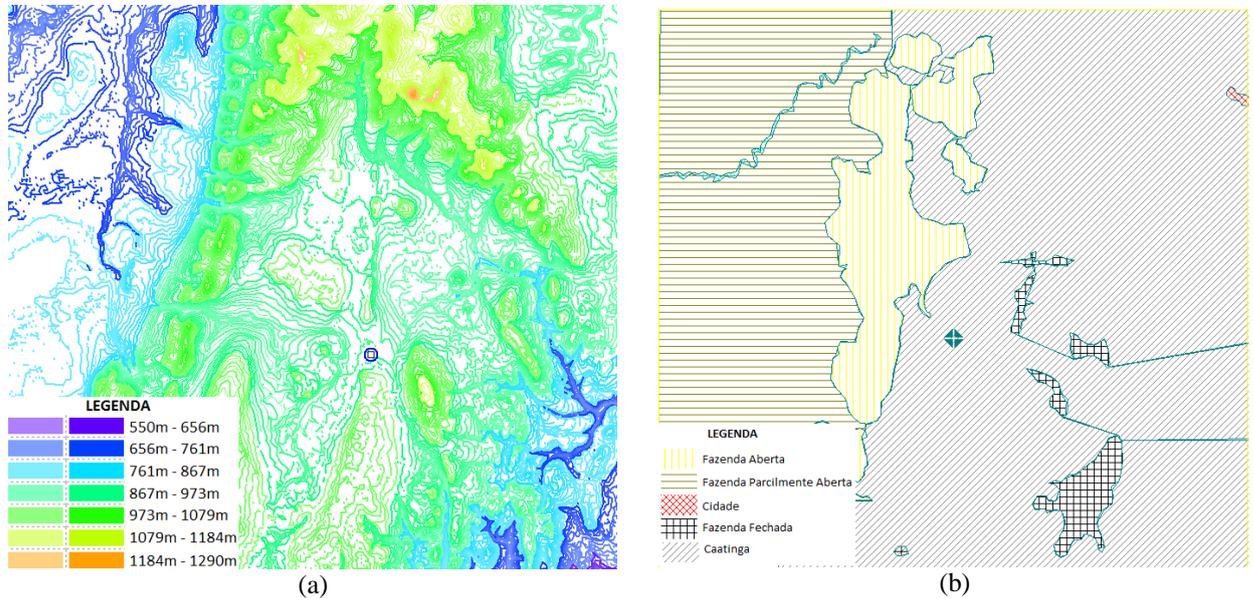


Figura 5.2 – (a) Curvas de Nível (b); Curvas de Rugosidade do Complexo Eólico

5.1 Dados anemométricos

A campanha de medição no local iniciou-se em 2009 com a instalação de sua primeira torre de medição. Desde então diversas torres de medição foram instaladas com o intuito de aperfeiçoar a previsão eólica do local.

Este estudo está baseado em quatro torres de medição, denominadas MetMast 01, MetMast 02, MetMast 03 e MetMast 04. A Tabela 5.1 mostra as informações básicas das torres de medição, incluindo altitude, índice de complexidade do terreno e altura dos sensores de medição. Todas as torres de medição são de estrutura treliçada e possuem 80 m de altura. A Figura 5.3 mostra uma imagem real de uma das torres de medição instaladas.

Tabela 5.1. Informações das torres de medição utilizadas no projeto

Torre de Medição	Altitude (m)	RIX (%)	Alturas de Medição (m)			
			Velocidade	Direção	Temperatura	Pressão
MetMast 01	1051	0,8	80, 75, 55, 30	80, 30	75	70
MetMast 02	1056	0,4	80, 75, 55, 30	80, 30	75	70
MetMast 03	1061	1,0	80, 75, 55, 30	80, 30	75	70
MetMast 04	1045	0,7	81, 80, 60, 40	80, 60	10	11



Figura 5.3 – Imagem representativa das torres de medição

Os dados das torres MM01, MM02 e MM03 foram registrados por meio do *datalogger* Campbell Scientific CR1000. O *datalogger* fornece o registro dos dados de velocidade e direção do vento, temperatura e pressão em escala de 10 em 10 minutos. Os anemômetros de copo instalados são do fabricante Thies Clima, modelo *first class*, todos

calibrados pela instituição Wind Guard. Os sensores de direção são do fabricante Vector Instruments, modelo W200P. O sensor de umidade e temperatura é do fabricante Elektronik, e o de pressão modelo AB60, do fabricante Ammonit.

A torre MM04, por ser uma torre antiga, não possui os mesmos equipamentos das mais modernas. Seus dados foram registrados pelo *datalogger* NRG Symphonie. O *logger* fornece o registro dos dados de velocidade e direção do vento, temperatura e pressão em escala de 10 em 10 minutos. Todos os sensores instalados são do fabricante NRG. Os anemômetros de copo são do modelo #40, todos calibrados pela instituição Otech Engineering e os sensores de direção, modelo #200P.

A Figura 5.4 e a Tabela 5.2 mostram a localização no projeto das torres anemométricas e a distância existente entre elas, respectivamente.

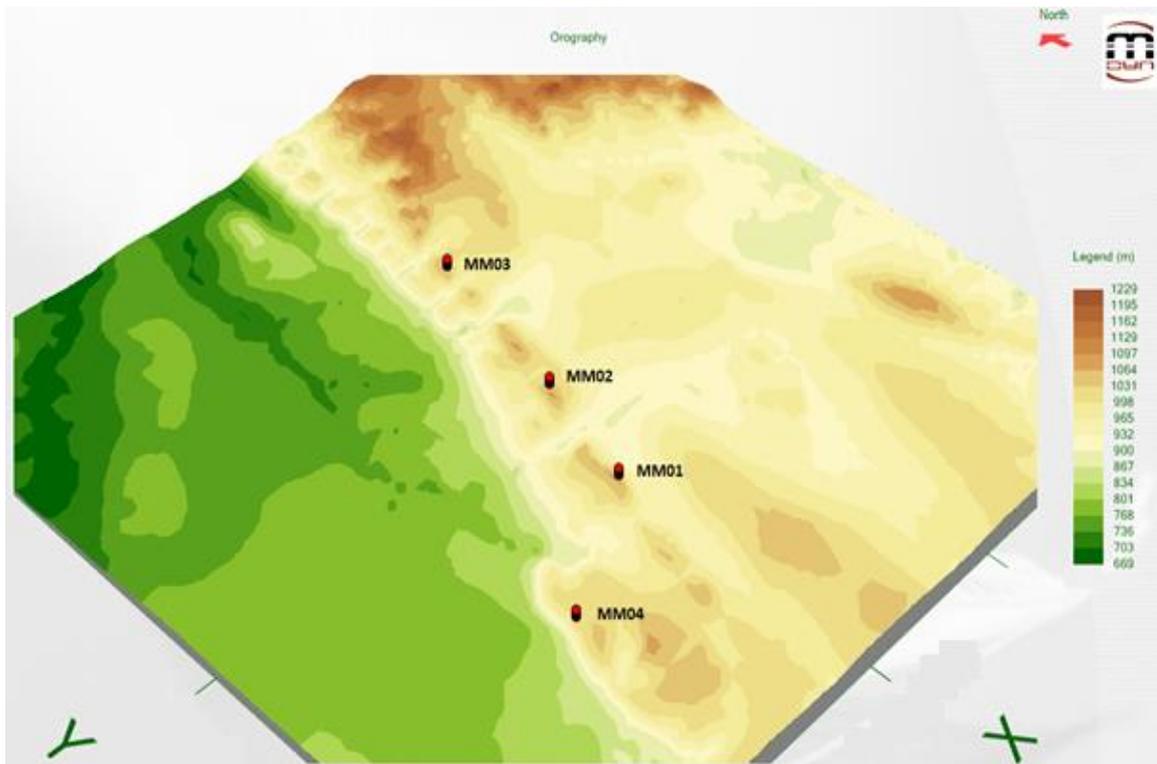


Figura 5.4 – Localização das torres de medição e topografia do terreno

Tabela 5.2. Distância em metros (m) entre as torres de medição anemométrica

	MM01	MM02	MM03	MM04
MM01	0	7449	18457	9444
MM02	7449	0	11016	15683
MM03	18457	11016	0	25923
MM04	9444	15683	25923	0

5.2 Tratamento estatístico e validação dos dados de vento

Os dados obtidos por meio das torres de medição foram validados e revisados para comprovar sua plenitude e seu nível de coerência. Os principais fatores verificados no processo de validação foram as falhas dos equipamentos e o efeito de sombreamento causado pela torre nos seus equipamentos.

O período de dados selecionado para o desenvolvimento deste trabalho foi o período de seis meses, compreendido entre março e agosto. A Tabela 5.3 mostra a disponibilidade dos sensores em cada torre de medição.

Tabela 5.3. Informações das torres de medição instaladas no complexo eólico

Torre de Medição	Disponibilidade (%)				
	Velocidade		Direção	Temperatura	Pressão
MM01	80m 99,19	55m 99,19	80m 99,19	75m 99,19	70m 99,19
MM02	80m 99,68	55m 99,68	80m 99,68	75m 99,68	70m 99,68
MM03	80m 100,00	55m 100,00	80m 99,98	75m 100,00	70m 100,00
MM04	80m 99,92	60m 99,83	60m 100,00	10m 100,00	11m 100,00

O período de dados selecionado apresentou boa disponibilidade em todos os sensores instalados. As medições de vento, utilizadas como base principal deste trabalho, foram realizadas à altura de 80 m.

5.3 Características do recurso eólico

A Figura 5.5 mostra as velocidades médias de cada torre de medição normalizadas pela torre MM02. A normalização dos dados de velocidade do vento se faz necessária por se tratar de um projeto em execução, no qual é exigida confidencialidade. Ressalta-se que o procedimento não prejudica o desenvolvimento do trabalho acadêmico.

A Figura 5.6 tem como objetivo mostrar o comportamento diário da velocidade do vento por meio das torres de medição, motivo pelo qual não pode ser normalizado. No gráfico, quando se separa o comportamento das torres de medição em dia, das 12h às 18h, noite, das 21h às 6h, e transição, entre 6h e 12h e entre 18h e 21h, observa-se que no período da noite a diferença de velocidade entre as torres de medição é consideravelmente maior do

que no período do dia. Isto ocorre por causa da estabilidade atmosférica existente no local de implantação do complexo eólico.

A estabilidade atmosférica influencia diretamente o escoamento do vento. A instabilidade térmica diurna existente, em consequência do aquecimento solar da superfície da Terra, gera convecção térmica e turbulência, e, devido à troca de temperatura entre as massas de ar, uma redução das diferenças de velocidade do vento. No período da noite, em consequência do resfriamento terrestre, se estabelece uma estratificação estável, que restringe os movimentos verticais das partículas de ar, modificando o padrão do escoamento, reduzindo a troca térmica e por consequência, aumentando as diferenças de velocidade do vento.

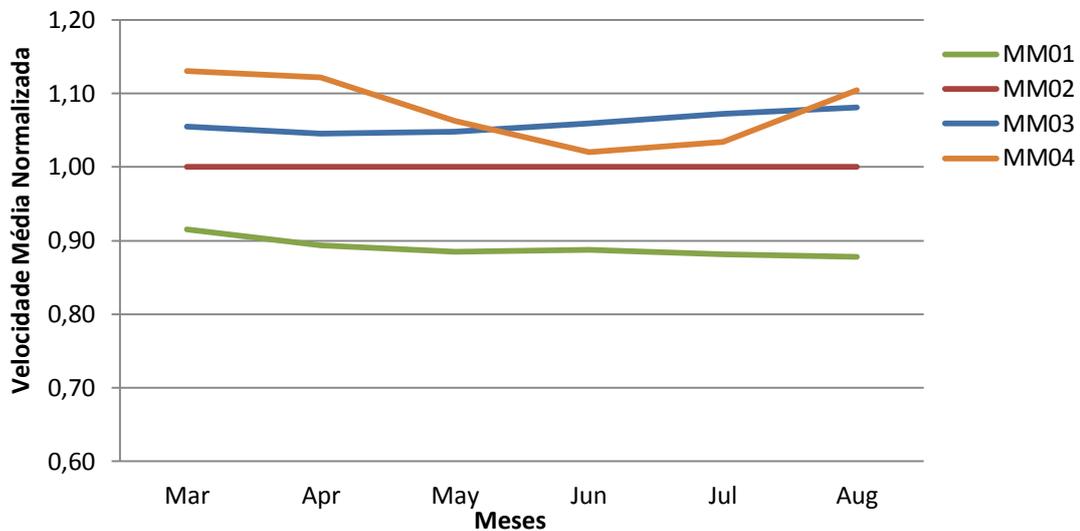


Figura 5.5 – Velocidade média das torres em todo o período analisado, normalizadas pela torre MM02

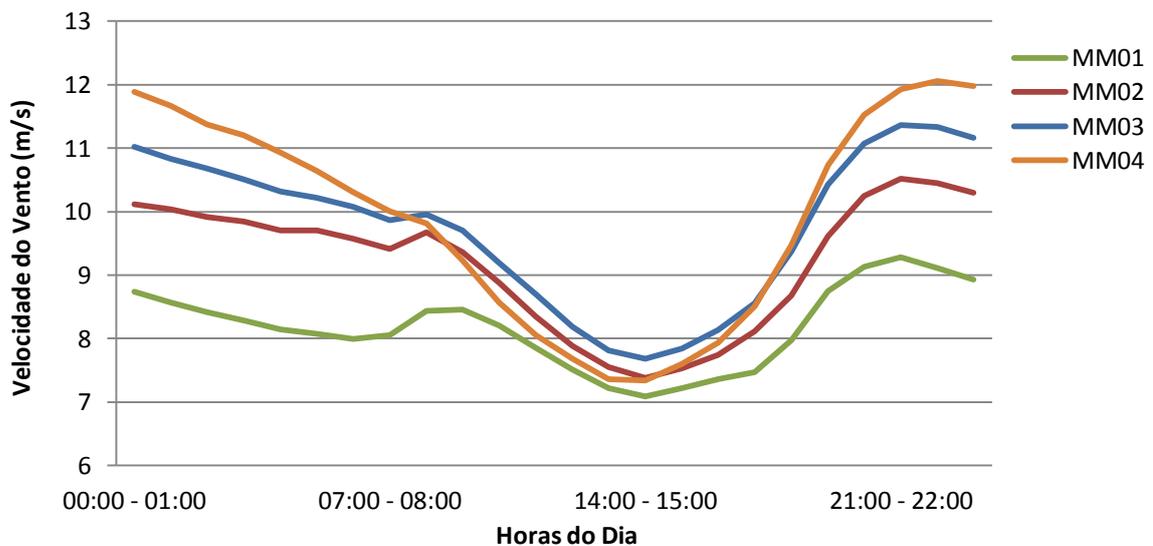


Figura 5.6 – Comportamento da velocidade do vento ao longo do dia nas torres de medição em todo o período analisado

Os efeitos da estabilidade térmica também podem ser observados na Figura 5.7, em que o gradiente vertical de velocidade é apresentado. Como apresentado no item 3.2.1, o gradiente vertical de velocidade tende a diminuir com o aquecimento solar da superfície terrestre e aumentar com o seu resfriamento.

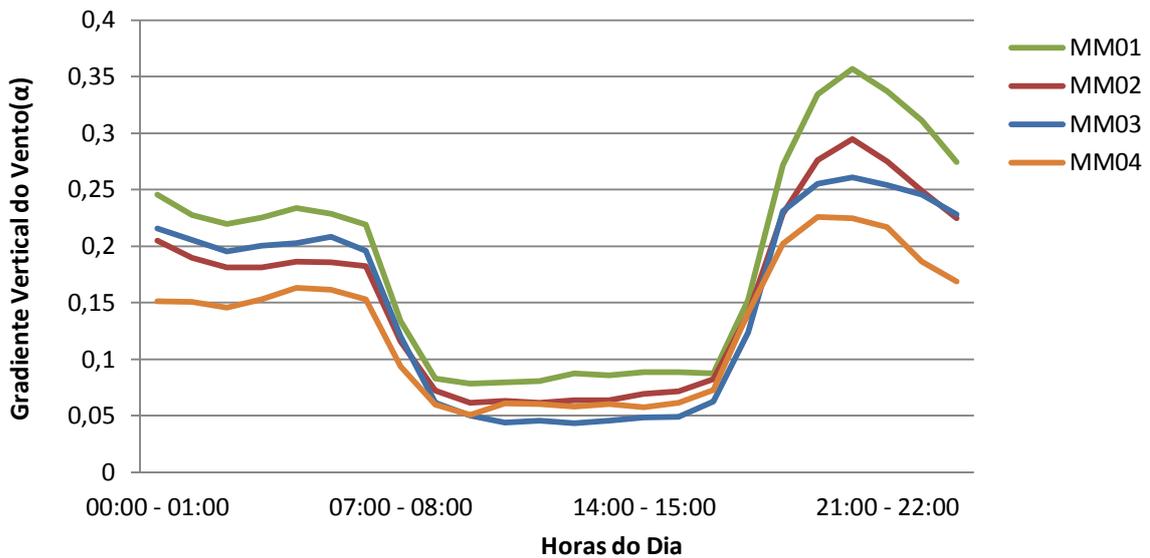


Figura 5.7 – Gradiente Vertical (α) das torres de medição instaladas no complexo eólico

Na Figura 5.8, verifica-se o comportamento análogo das direções predominantes do vento em todas as torres de medição. A separação da frequência do vento a cada 10° faz-se necessária, pois as resultantes do programa Meteodyn WT são separadas por setor.

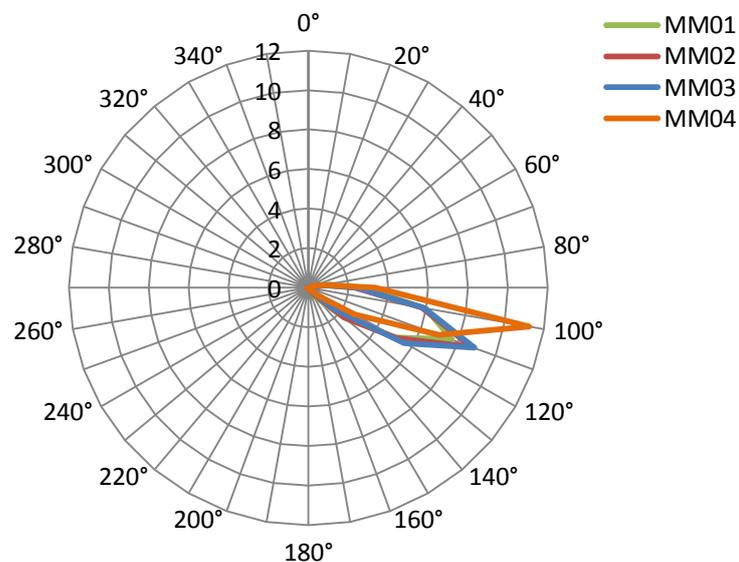


Figura 5.8 – Direção predominante do vento nas torres de medição

5.4 Metodologia de teste

Este trabalho tem como objetivo comparar os resultados alcançados por meio de três programas comerciais, WAsP, Meteodyn WT e WindSim, mediante dados obtidos de quatro torres de medição instaladas em campo em um complexo eólico prospectado na Chapada Diamantina, na região Nordeste do Brasil.

Os programas resolvem diferentes modelagens de turbulência, simplificada, RANS com uma equação e RANS com duas equações, para o WaSP, Meteodyn WT e WindSim respectivamente descritas em capítulos anteriores. Esta comparação tem por objetivo observar qual programa obteve o melhor desempenho na previsão do vento do projeto eólico em análise.

Ressalta-se que todos os modelos compartilham dos mesmos parâmetros geométricos, isto é, curvas de nível, rugosidade superficial e pontos de interesse.

5.4.1 Parâmetros do WAsP

As análises realizadas com o programa WAsP foram executadas utilizando a configuração padrão do programa, versão 10.02.010. Não foram consideradas correções ou outras adaptações definidas pelo usuário.

Os resultados obtidos são valores de velocidade do vento extrapolados a partir de um ponto de referência, no caso a torre de medição MM02, através da qual é inserido um arquivo que contém as frequências de ocorrência do vento em um dado número de setores de acordo com seu respectivo valor de velocidade do vento.

A divisão destes resultados em setores de direção do vento se faz necessária, pois os programas de metodologia CFD, Meteodyn WT e WindSim, resultam em valores de aceleração do vento, *speed-up*, em setores definidos pelo usuário.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram analisados os principais setores de direção do vento, isto é, 90°, 100°, 110°, 120° e 130°.

5.4.2 Parâmetros do Meteodyn WT

As análises realizadas com o programa Meteodyn WT foram executadas inicialmente utilizando a configuração padrão do programa, a versão utilizada foi a 4.5.2 – 64 bits. O critério básico exigido era convergência mínima de 98% em todas as simulações.

O refinamento de malha em todos os casos estudados foi feito pela inserção de pontos de interesse em estudo no projeto. Para as posições referentes às torres de medição foram inseridos pontos de interesse para avaliação dos perfis verticais do vento que vão desde 30 m a 150 m de altura, variando de 10 em 10 metros.

A Tabela 5.4 mostra um resumo de todos os parâmetros utilizados no cálculo do programa Meteodyn.

Tabela 5.4. Configuração padrão do programa Meteodyn WT

Resolução	Vertical	4
	Horizontal	25
Coeficiente de Expansão	Vertical	1.2
	Horizontal	1.1
Verticalidade		0.7
<i>Smoothing</i>		1
Rugosidade Padrão	Mar	0.001
	Terreno	0.05

5.4.3 Parâmetros do WindSim

As análises realizadas com o programa WindSim foram executadas inicialmente utilizando a configuração padrão do programa, a versão utilizada foi a 6.2.0 – 64 bits. O programa exige grande esforço computacional sendo necessária a utilização de supercomputadores na previsão de áreas grandes e refinadas.

Diferentemente do Meteodyn, o WindSim permite que o usuário defina o tamanho e o nível de refinamento da malha utilizada no estudo de caso. Fazendo com que pontos adicionais de interesse possam ser extraídos ao final da modelização.

Para as posições referentes às torres de medição foram inseridos objetos, turbinas eólicas, na altura de 80m, com o intuito de extrair-se a velocidade relativa ao ponto na altura de interesse.

A Tabela 5.5 mostra um resumo de todos os parâmetros utilizados no cálculo do programa WindSim.

Tabela 5.5. Configuração para o programa WindSim

TERRENO	
1: Extensão do Terreno	Torres MM01, MM02 e MM03
2: Rugosidade	Padrão de 0,05
3: Modelo Numérico	
Área Refinada	Torres MM01, MM02 e MM03
Altura acima do terreno	Automático
Malha Horizontal	Máximo número de células
Máximo número de células	4.000.000
Número de células em Z	45
4: <i>Smoothing</i>	Desligado
5: Modelo Floresta	Desligado
CAMPO DE VENTO	
1: Condições Iniciais	
Setor de Análise	100°
Altura da camada limite	500m
Velocidade de entrada	10m/s
Condição contorno topo	Pressão
2: Modelo Físico	
Temperatura Potencial	Varia de caso para caso
Temperatura de Referência	Varia de caso para caso
Comprimento de Monin-Obukhov	Varia de caso para caso
Altura de Referência	Varia de caso para caso
Velocidade do Vento na Altura de Referência	Varia de caso para caso
Densidade do ar	1,05 kg/m ³
Modelo de Turbulência	Modificado
3: Parâmetros de cálculo	
Número de iterações	600
Critério de convergência	0,001

5.5 Meteodyn WT – casos estudados

Neste item serão descritos os casos analisados por meio do programa Meteodyn WT. Para o desenvolvimento do estudo foram feitas diversas alterações nas configurações do programa, a fim de verificar a influência desta alteração nos resultados obtidos. Os resultados obtidos nos casos estudados serão exibidos no Capítulo 6. Ressalta-se que, em princípio, o objetivo deste trabalho seria analisar e comparar todos os resultados obtidos no primeiro caso desenvolvido, mas como os resultados, demonstrado no Capítulo 6.1.1 não foram satisfatórios, fez-se necessária a avaliação de diferentes condições como: redução do domínio do projeto, mudanças nas condições de estabilidade atmosférica, inserção de diferentes valores de rugosidade do terreno e refinamento de malha; com isso houve o incremento no número de casos. Os resultados são avaliados em setores de direção do vento a fim de comparar os resultados numéricos com os valores obtidos por meio das torres de medição.

5.5.1 Caso 1: Configuração e domínio padrão

O caso inicial em estudo foi desenvolvido dentro de um domínio de 25 quilômetros de raio, como mostrado na Figura 5.9. Os pontos em vermelho são pontos de refinamento de malha, definidos e localizados nos cumes das montanhas, onde há interesse em obter resultados detalhados. Para este caso foram analisadas quatro situações (Tabela 5.6): na primeira, utilizando as configurações padrão do programa indicadas na Tabela 5.4 e condição de estabilidade 2, neutro; na segunda e na terceira situações foi alterada somente a condição de estabilidade para 0, instável; e para a situação 4, estável, respectivamente. Na quarta situação foram utilizadas as configurações padrão do programa, estabilidade 2, e incluído um mapa de rugosidade definido pelo usuário (Figura 5.2 [b]).

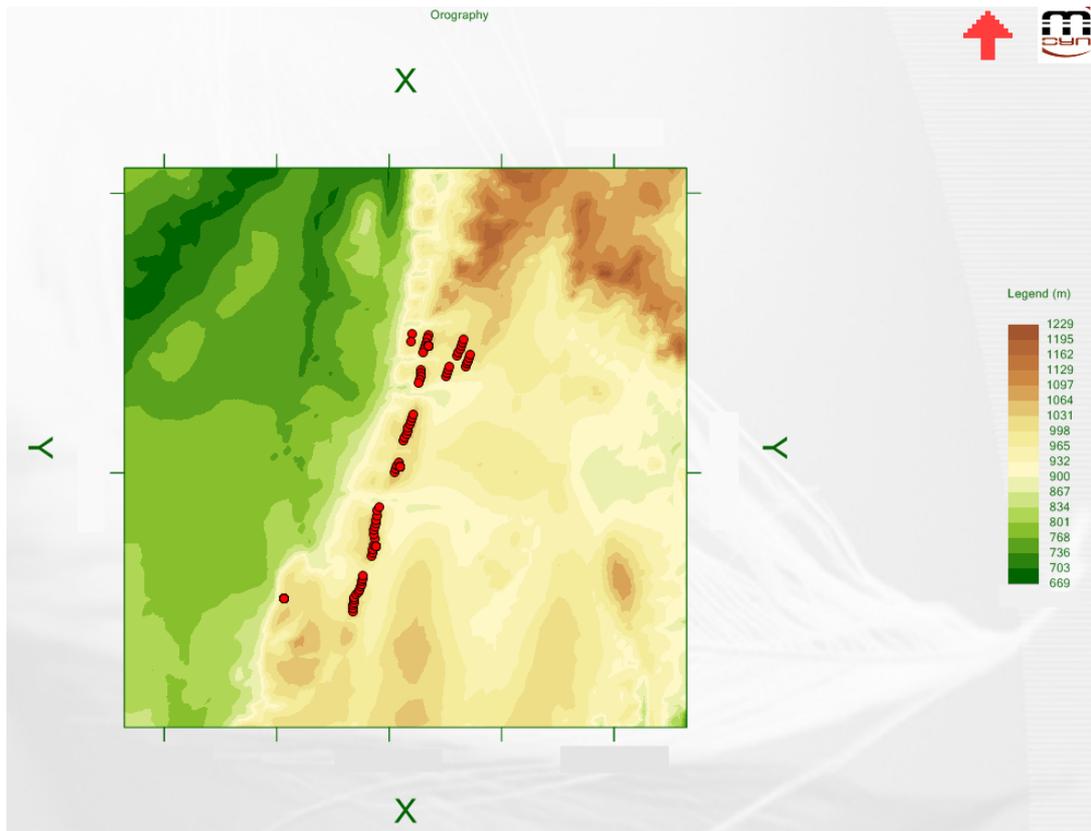


Figura 5.9 – Domínio estudado para o caso MT_01

Tabela 5.6. Resumo dos casos analisados

SITUAÇÃO	DIREÇÃO (°)	CLASSE DE ESTABILIDADE	CLASSE DE RUGOSIDADE	COEFICIENTE DE EXPANSÃO
MT_01_a	90, 100, 110, 120 e 130	2	0,05	Vertical: 1.2 Horizontal: 1.1
MT_01_b	100	0	0,05	Vertical: 1.2 Horizontal: 1.1
MT_01_c	100	4	0,05	Vertical: 1.2 Horizontal: 1.1
MT_01_d	90, 100 e 110	2	Definida pelo usuário	Vertical: 1.2 Horizontal: 1.1

A Tabela 5.7 mostra os aspectos computacionais de cada direção analisada, de acordo com sua configuração indicada na Tabela 5.6. Verifica-se que todos os casos obtiveram alto índice de convergência e que o tamanho de malha difere para cada direção analisada.

Tabela 5.7. Casos computados, tamanho de malha, tempo computacional e convergência

SITUAÇÃO	DIREÇÃO (°)	MALHA (pontos)	TEMPO COMPUTACIONAL	CONVERGÊNCIA (%)
MT_01_a	90	24.180.372	562min 2s	99.2
	100	18.457.088	444min 19s	99.4
	110	16.167.060	386min 52s	99.9
	120	18.051.290	460min 26s	99.7
	130	24.158.376	622min 39s	99.8
MT_01_b	100	18.457.088	492min 11s	98.8
MT_01_c	100	18.457.088	1055min 12s	99.7
MT_01_d	90	24.180.372	562min 2s	99.2
	100	18.457.088	444min 19s	99.4
	110	16.167.060	386min 52s	99.9

5.5.2 Caso 2: Configuração padrão e domínio reduzido

Para o segundo caso foi analisada a influência da redução do domínio a fim de excluir as curvas de nível localizadas no sul do empreendimento, as quais prejudicam a convergência do projeto (Figura 5.10). Foram avaliadas três diferentes condições de estabilidade: 0, instável; 2, neutro; e 6, estável, respectivamente (Tabela 5.8)

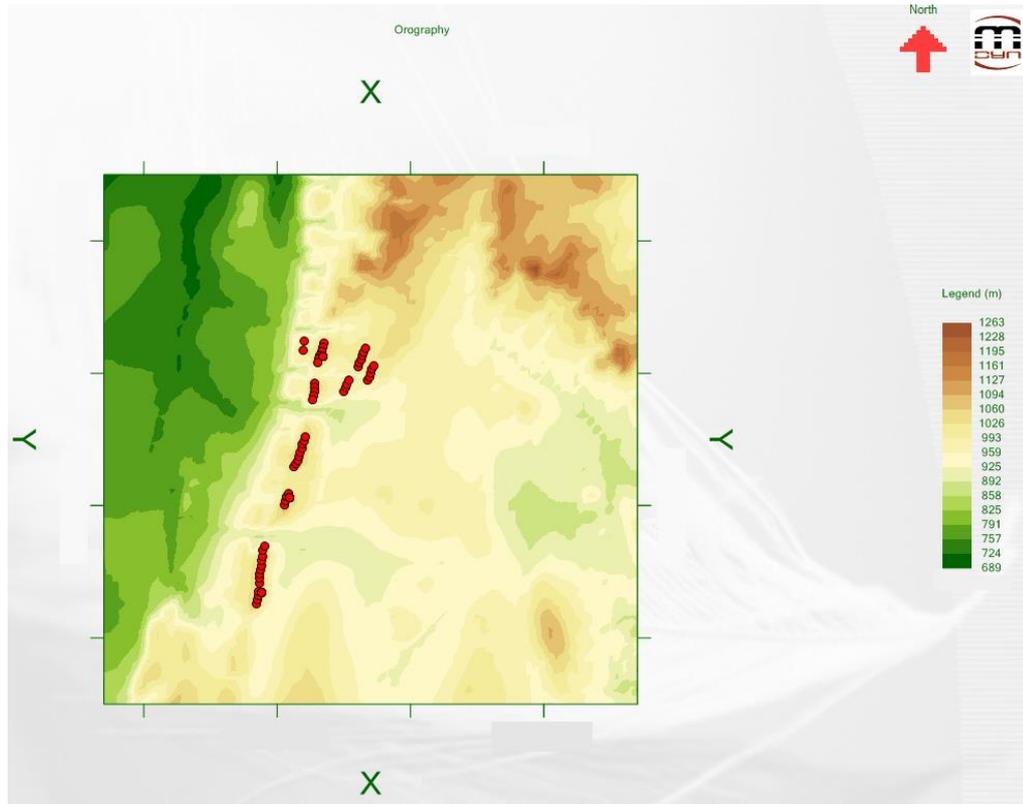


Figura 5.10 – Domínio estudado para o caso MT_02

Tabela 5.8. Resumo dos casos analisados

SITUAÇÃO	DIREÇÃO (°)	CLASSE DE ESTABILIDADE	CLASSE DE RUGOSIDADE	COEFICIENTE DE EXPANSÃO
MT_02_a	100	0	0,05	Vertical: 1.2 Horizontal: 1.1
MT_02_b	100	2	0,05	Vertical: 1.2 Horizontal: 1.1
MT_02_c	100	6	0,05	Vertical: 1.2 Horizontal: 1.1

Da mesma maneira que a tabela mostrada no caso anterior, a Tabela 5.9 mostra os resultados computacionais de cada direção analisada de acordo com sua configuração indicada na Tabela 5.8. Verifica-se que todos os casos obtiveram alto índice de convergência.

Tabela 5.9. Casos computados, tamanho de malha, tempo computacional e convergência

SITUAÇÃO	DIREÇÃO (°)	MALHA (pontos)	TEMPO COMPUTACIONAL	CONVERGÊNCIA (%)
MT_02_a	100	12.461.157	315min 33s	99.8
MT_02_b	100	12.461.157	343min 47s	99.9
MT_02_c	100	12.461.157	347min 1s	99.8

5.5.3 Caso 3: Configuração e domínio dividido, parte superior

O caso com o maior número de condições iniciais avaliadas foi o MT_03. Nele, foi estudado um domínio reduzido limitado à parte superior do terreno com diferentes classes de estabilidade, rugosidade e refinamento de malha (Tabela 5.10).

As primeiras situações avaliadas foram três diferentes condições de estabilidade: 0, instável; 2, neutro; e 6, estável, respectivamente. Com base na obtenção destes resultados foram avaliadas, baseado na condição de estabilidade 2, neutra, diferentes condições de rugosidade: 0,01, 0,3, 0,6 e 0,8, resultando nas situações 4, 5, 6 e 7. A última situação avaliada, a situação 8, avaliou o refinamento de malha no domínio, utilizando condição de rugosidade padrão e condição de estabilidade 2, neutro.

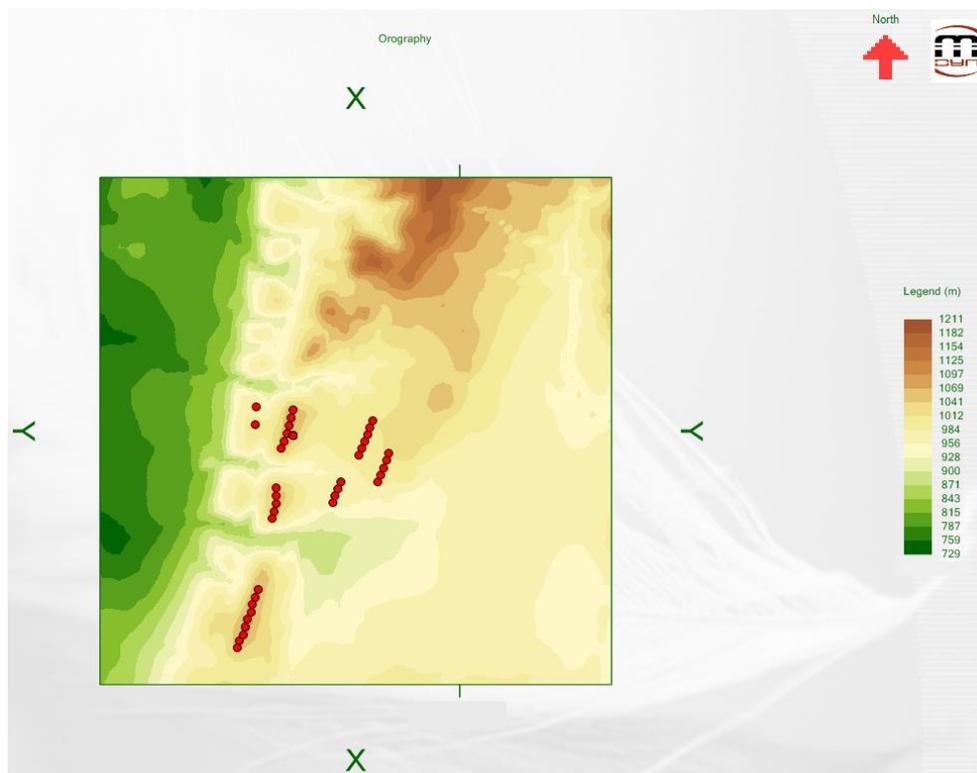


Figura 5.11 – Domínio estudado para o caso MT_03

Tabela 5.10. Resumo dos casos analisados

SITUAÇÃO	DIREÇÃO (°)	CLASSE DE ESTABILIDADE	CLASSE DE RUGOSIDADE	COEFICIENTE DE EXPANSÃO
MT_03_a	100	0	0,05	Vertical: 1.2 Horizontal: 1.1
MT_03_b	100	2	0,05	Vertical: 1.2 Horizontal: 1.1
MT_03_c	100	6	0,05	Vertical: 1.2 Horizontal: 1.1
MT_03_d	100	2	0,01	Vertical: 1.2 Horizontal: 1.1
MT_03_e	100	2	0,3	Vertical: 1.2 Horizontal: 1.1
MT_03_f	100	2	0,6	Vertical: 1.2 Horizontal: 1.1
MT_03_g	100	2	0,8	Vertical: 1.2 Horizontal: 1.1
MT_03_h	100	2	0,05	Vertical: 1.05 Horizontal: 1.05

Da mesma maneira que a tabela mostrada nos casos anteriores, Tabela 5.11 mostra os resultados computacionais de cada direção analisada de acordo com sua configuração indicada na Tabela 5.10.

Verifica-se que, praticamente, todos os casos obtiveram alto índice de convergência. Apenas no último caso, em que foi aplicado refinamento de malha, obteve-se uma redução de convergência, aceitável para a comparação realizada. Observa-se também para o último caso um incremento significativo no número de pontos de malha e no tempo computacional para um mesmo domínio em estudo. Ressalta-se que por limitação do programa, este refinamento de malha não poderia ter sido realizado em domínios computacionais maiores.

Tabela 5.11. Casos computados, tamanho de malha, tempo computacional e convergência

SITUAÇÃO	DIREÇÃO (°)	MALHA (pontos)	TEMPO COMPUTACIONAL	CONVERGÊNCIA (%)
MT_03_a	100	5.765.490	129min 56s	99.7
MT_03_b	100	5.765.490	161min 25s	99.7
MT_03_c	100	5.765.490	162min 33s	99.8
MT_03_d	100	5.765.490	127min 54s	99.8
MT_03_e	100	5.765.490	127min 48s	99.7
MT_03_f	100	5.765.490	124min 52s	99.9
MT_03_g	100	5.765.490	123min 7s	99.9
MT_03_h	100	21.965.980	505min 26s	91.1

5.6 WindSim – casos estudados

Neste item serão descritos os casos analisados por meio do programa WindSim. O objetivo da utilização deste programa é a comparação de resultados entre a simulação neutra obtida pelo Meteodyn WT, a simulação neutra do programa WindSim e as medições obtidas a partir das torres de medição. Para o desenvolvimento do estudo foram feitas alterações nas configurações do programa, a fim de verificar a influência da ativação da equação da energia através do comprimento de Monin-Obukhov, na variável de temperatura potencial do modelo, nos resultados obtidos. Os resultados desta modelagem serão exibidos no Capítulo 6 e são avaliados apenas no setor de 100° de direção do vento a fim de comparar os resultados numéricos com os valores obtidos por meio das torres de medição. A Figura 5.12 mostra o modelo digital da área de interesse inserida no programa WindSim, nela pode-se ver também a inclinação em graus referente ao terreno.

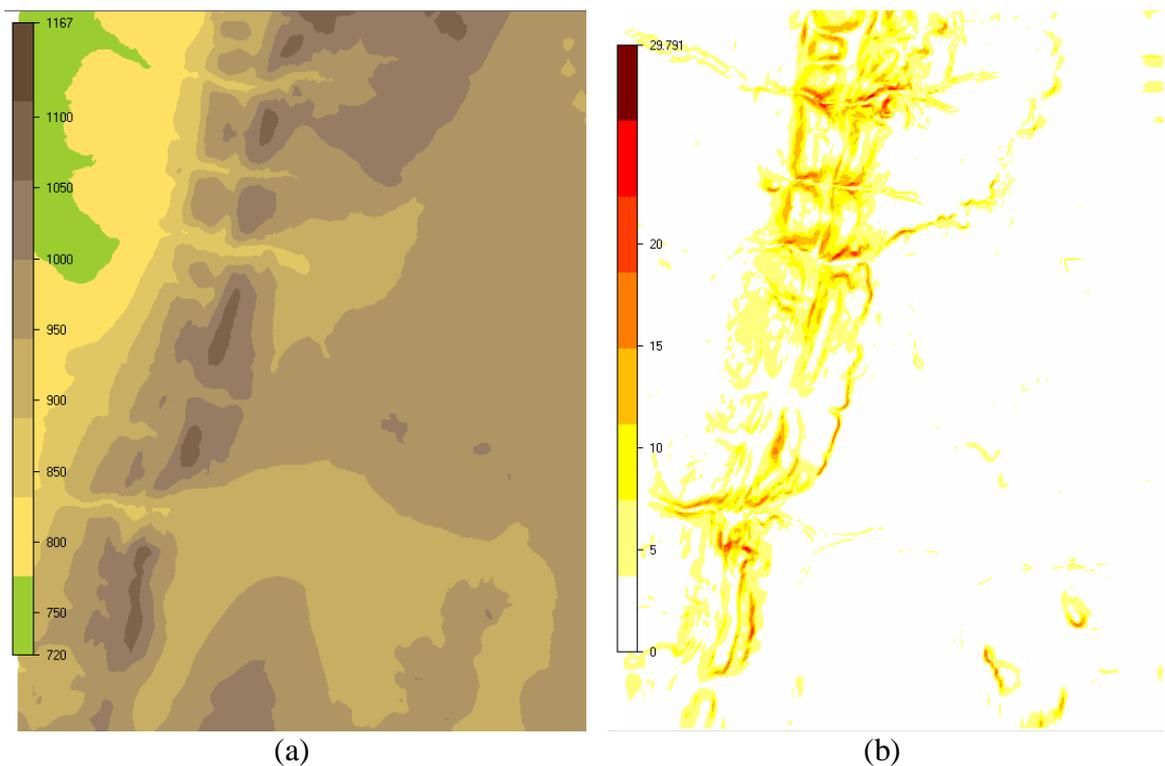


Figura 5.12. Modelo digital do terreno (a) Elevação em metros (b) Inclinação em graus

A Tabela 5.12 mostra um resumo dos casos avaliados no programa WindSim. Observa-se que para este programa foi analisado apenas um domínio de projeto. Todos os casos são analisados com a mesma configuração inicial, mudando apenas os parâmetros de

temperatura potencial, os quais inicializam o comprimento de Monin-Obukhov que define o tipo de estabilidade atmosférica para cada parâmetro.

Tabela 5.12. Resumo dos casos analisados

	Temperatura Potencial	Comprimento de Monin-Obukhov	Altura de Referência	Velocidade na altura de referência
WS_01_a	Desligado	***	***	***
WS_01_b	Monin-Obukhov	100m	400m	10m/s
WS_01_c	Monin-Obukhov	500m	500m	10m/s
WS_01_d	Monin-Obukhov	250m	400m	10m/s
WS_01_e	Monin-Obukhov	175m	400m	10m/s
WS_01_f	Monin-Obukhov	175m	400m	15m/s

A Tabela 5.13 mostra os casos computados, comparando o tipo de estabilidade térmica com o tempo computacional (Capítulo 3.2.4).

Tabela 5.13. Casos computados, direção, estabilidade e tempo computacional

SITUAÇÃO	DIREÇÃO (°)	ESTABILIDADE	TEMPO COMPUTACIONAL
WS_01_a	100	Neutra	428min 46s
WS_01_b	100	Muito Estável	617min 36s
WS_01_c	100	Pouco Estável	524min 14s
WS_01_d	100	Estável	519min 20s
WS_01_e	100	Estável	515min 53s
WS_01_f	100	Estável	568min 50s

5.7 Erro Percentual

Os valores obtidos através das torres de medição e previsão eólica através dos modelos de escoamento descritos nos capítulos anteriores serão comparados na forma de erro percentual definida na Equação 5.1.

$$\text{Erro Percentual (\%)} = \frac{\text{Parâmetro}_{\text{previsto}} - \text{Parâmetro}_{\text{medido}}}{\text{Parâmetro}_{\text{medido}}} * 100 \quad (5.1)$$

6 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados das simulações alcançados por meio de três programas comerciais, WAsP, Meteodyn WT e WindSim, e comparando-os aos dados obtidos por meio de quatro torres de medição, instaladas em campo em um complexo eólico prospectado na Chapada Diamantina, na região Nordeste do Brasil.

6.1 WAsP e Meteodyn WT

6.1.1 Caso 1: Configuração e domínio padrão

Como definimos anteriormente, o caso MT_01 é aquele que abrange todo o domínio computacional das quatro torres de medição. Os subcasos estudados dentro deste domínio abrangem mudança de estabilidade e rugosidade padrão do programa.

A primeira situação a ser analisada no caso MT_01 é a comparação entre a influência da rugosidade definida pelo usuário através de um mapa (Figura 5.2 [b]) e a utilização da rugosidade padrão do programa. Os resultados para este caso foram obtidos pela média ponderada das direções 90°, 100° e 110°. A Figura 6.1 apresenta estes resultados.

Tabela 6.1. Resultados normalizados pela torre de medição MM02

Torre de medição	MT_01_a	MT_01_d
MM01	0,98	0,98
MM02	1,00	1,00
MM03	1,01	1,01
MM04	1,01	1,00

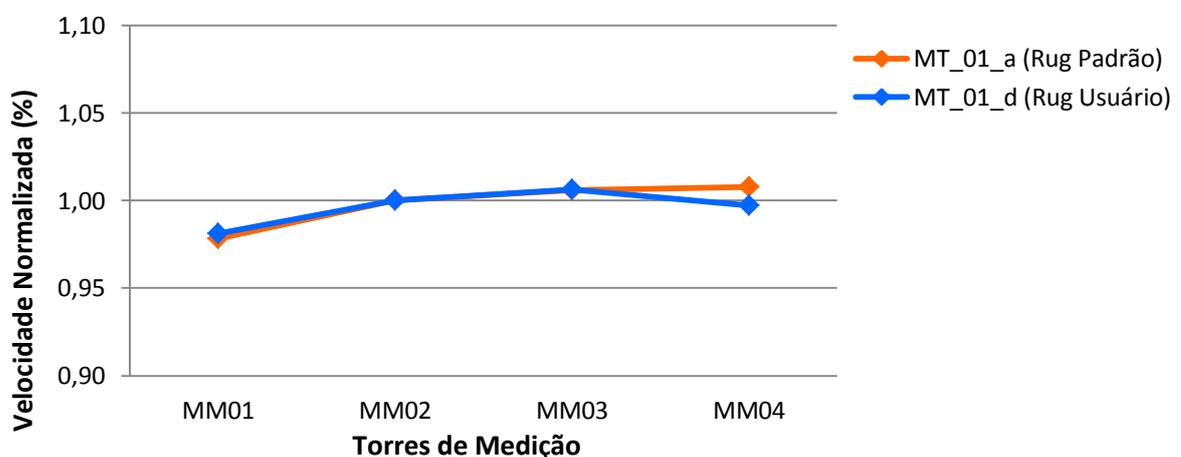


Figura 6.1 – Comparação entre as velocidades, normalizadas pela torre MM02

Observa-se que não existem mudanças significativas nos resultados (Tabela 6.1) quando é feita a diferenciação de rugosidade; por esse motivo e por possibilitar a investigação dos resultados em cima da mudança de rugosidade foi adotada a rugosidade padrão do programa, 0,05, como parâmetro para este estudo.

A Figura 6.2 mostra a comparação em imagens entre o *speed-up* e a intensidade de turbulência entre os casos MT_01_a e o MT_01_d. Graficamente, observam-se poucas diferenças entre ambas as simulações.

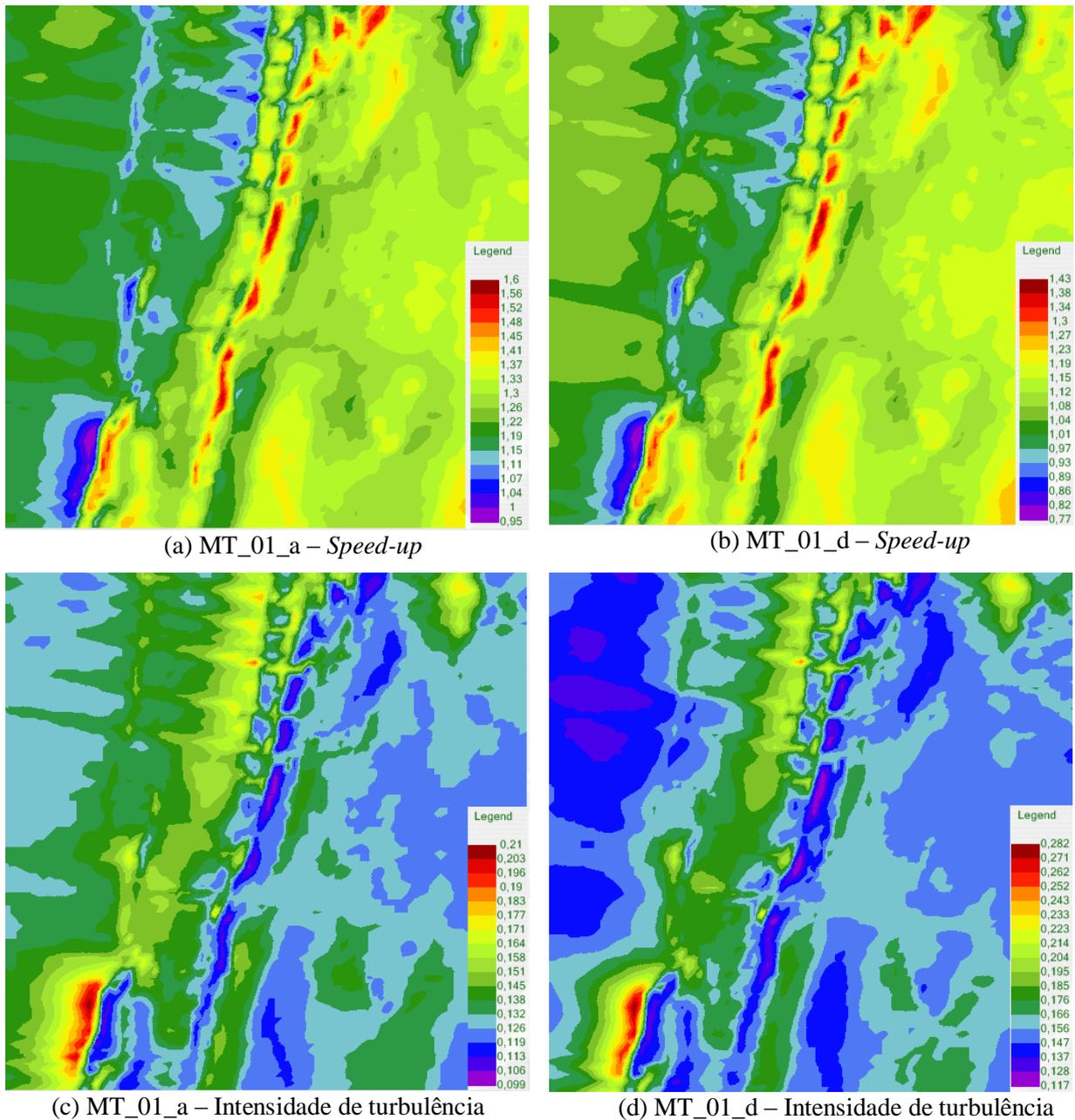


Figura 6.2 – Comparação entre o MT_01_a e o MT_01_d (a) e (b) *Speed-up* (c) e (d)

Intensidade de turbulência, para a direção de 100°

Na segunda etapa desta análise é avaliada a adequabilidade dos métodos para este estudo de caso. Para isto é utilizada a média ponderada dos resultados nas direções mais significativas: 90°, 100°, 110°, 120° e 130°.

A Tabela 6.2 compara as medições obtidas em campo, os resultados do programa WASP e os resultados do programa Meteodyn WT com estabilidade classe 2, neutra e rugosidade padrão do programa. Observa-se que, para este estudo de caso, nenhum dos métodos se ajustou aceitavelmente às medições (Figura 6.3). A Figura 6.3 mostra também que o melhor ajuste obtido foi com os dados do período do dia, que varia das onze horas da manhã até a uma hora da tarde. O intervalo de dados no período da noite varia das onze horas da noite até a uma hora da manhã.

Os erros obtidos são bem elevados e, ao contrário do atualmente considerado, para este projeto o programa WASP obteve o menor erro quando comparado às medições reais.

Tabela 6.2. Resultados normalizados pela torre de medição MM02

Torre de Medição	Medições	Dia	Noite	WASP				MT_01_a			
				Valor	Erro (%)	Erro dia (%)	Erro noite (%)	Valor	Erro (%)	Erro dia (%)	Erro noite (%)
MM01	0,89	0,95	0,87	0,97	+9,2	+2,7	+12,4	0,97	+9,3	+2,9	+12,5
MM02	1,00	1,00	1,00	1,00	0,0	0,0	0,0	1,00	0,0	0,0	0,0
MM03	1,06	1,04	1,09	1,01	-4,7	-2,7	-6,8	1,00	-5,7	-3,8	-7,7
MM04	1,06	0,96	1,15	1,04	-1,7	+8,3	-9,6	1,00	-5,4	+4,2	-13,0

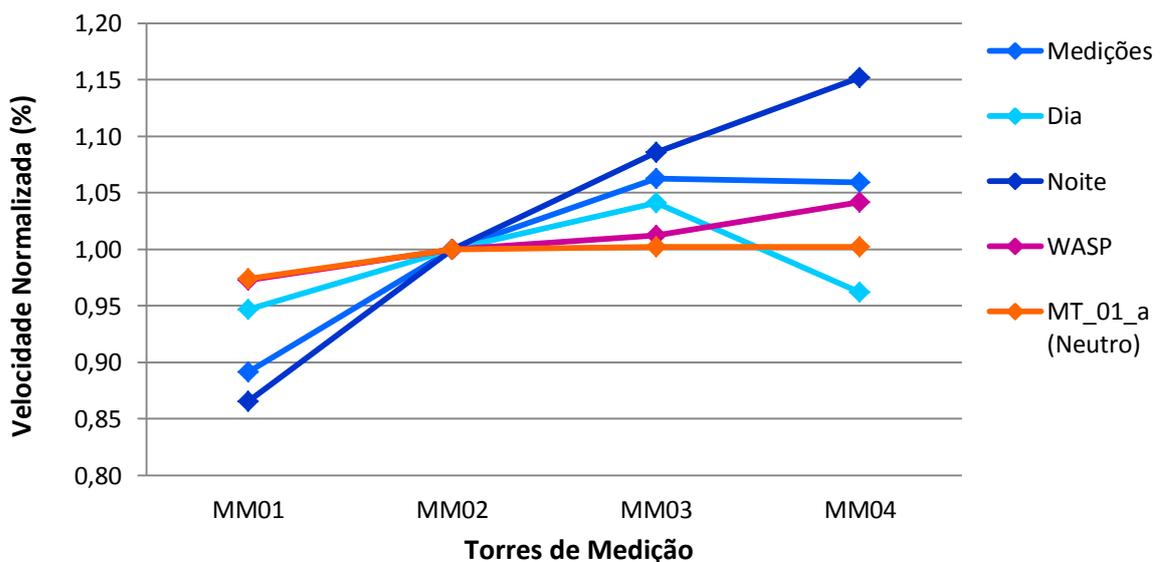


Figura 6.3 – Comparação entre as velocidades normalizadas pela torre MM02

A primeira hipótese a ser considerada após a verificação deste mau ajuste é a instabilidade atmosférica existente no local, mostrada anteriormente no Capítulo 5, item 3. Para a análise desta hipótese, foram realizados cálculos com diferentes condições de estabilidade atmosférica. Foram analisadas as situações MT_01_a, MT_01_b e MT_01_c, neutra, instável e estável respectivamente, utilizando os valores obtidos na direção de 100°.

A Tabela 6.3 mostra os resultados obtidos com a mudança de estabilidade. Verifica-se que, apesar da tentativa de comparação entre as diferentes condições de estabilidade 2, neutra; 0, instável; e 4, parcialmente estável, os resultados obtidos não mostraram mudanças significativas na previsão do recurso eólico (Figura 6.4).

Tabela 6.3. Resultados normalizados pela torre de medição MM02

Torre de Medição	Medições	WAsP		MT_01_a		MT_01_b		MT_01_c	
		Valor	Erro (%)	Valor	Erro (%)	Valor	Erro (%)	Valor	Erro (%)
MM01	0,89	0,99	+11	0,98	+10,6	0,98	+10,7	0,98	+10,6
MM02	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,0
MM03	1,07	1,02	-5,1	1,00	-6,5	1,00	-6,6	1,00	-6,5
MM04	1,14	1,06	-6,7	1,01	-10,8	1,02	-10,5	1,01	-11,1

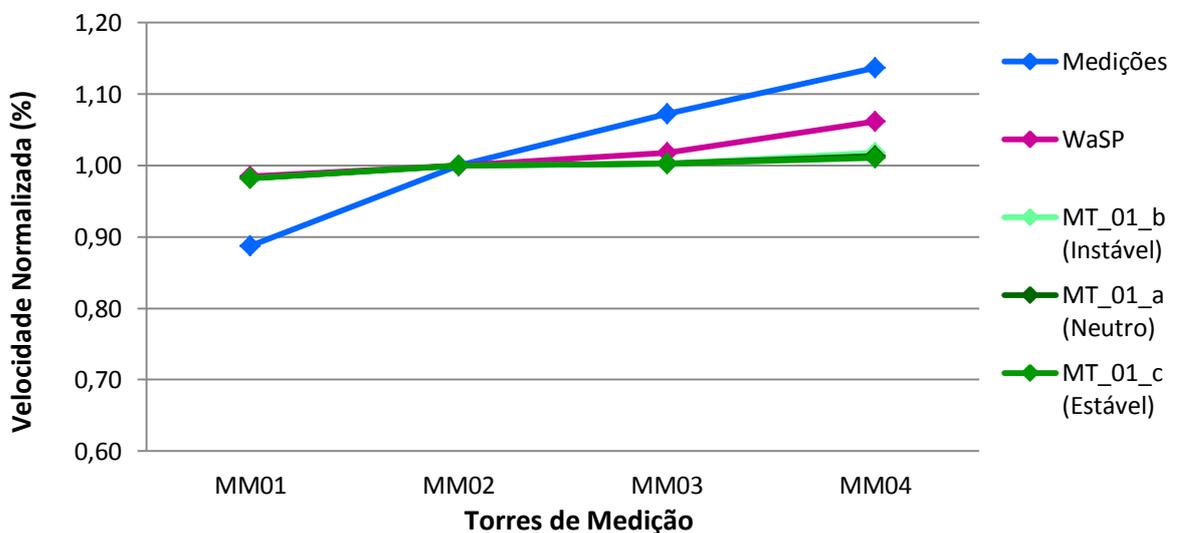


Figura 6.4 – Comparação entre as velocidades normalizadas pela torre MM02

Ressalta-se a tentativa falha de analisar a condição de estabilidade 6, estável, para o problema. Considerando que neste parâmetro não houve convergência do problema, é necessária a redução do domínio para excluir áreas com grande potencial de falha na convergência.

6.1.2 Caso 2: Configuração padrão e domínio reduzido

A fim de melhorar a aproximação dos resultados obtidos por meio dos programas indicados, iniciou-se a análise de um segundo caso com domínio reduzido, o que resultou na exclusão da torre de medição localizada mais ao sul do projeto, MM04.

Como analisado anteriormente, observando a possível existência de instabilidade atmosférica local, neste segundo caso também foram consideradas as condições de estabilidade 0, instável; 2, neutro; e 6, estável.

Na análise dos resultados obtidos para este caso (Tabela 6.4) não foi possível a identificação de redução do erro relacionando-o ao Item 6.1.1. A Figura 6.5 mostra uma análise resumida dos resultados.

Tabela 6.4. Resultados normalizados pela torre de medição MM02

Torre de medição	Medições	WAsP		MT_02_a		MT_02_b		MT_02_c	
		Valor	Erro (%)	Valor	Erro (%)	Valor	Erro (%)	Valor	Erro (%)
MM01	0,89	0,99	+11	0,99	+11,6	0,99	+11,3	0,99	+11,7
MM02	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
MM03	1,07	1,02	-5,1	1,01	-5,8	1,01	-6	1,01	-5,7

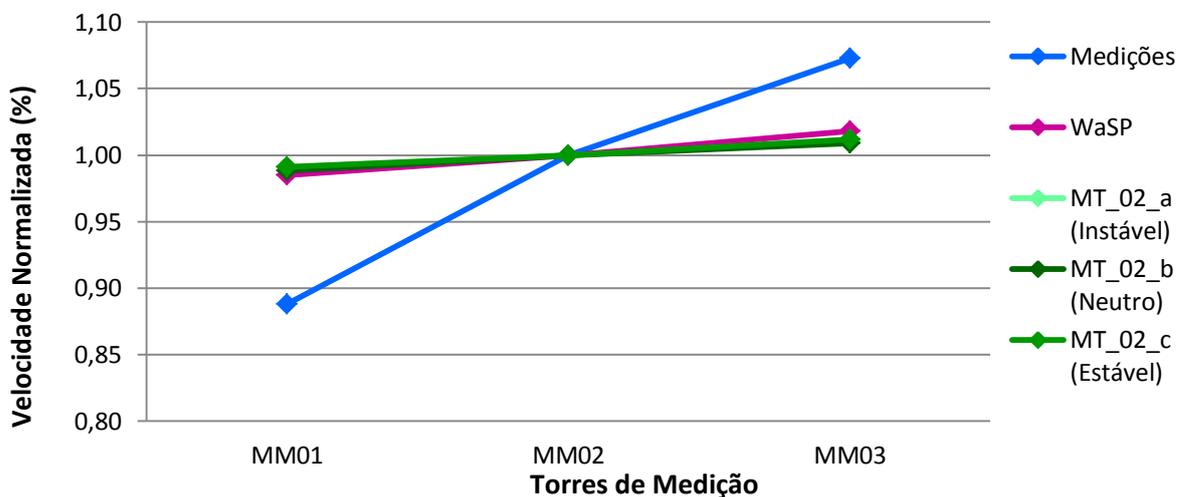


Figura 6.5 – Comparação entre as velocidades normalizadas pela torre MM02

6.1.3 Caso 3: Configuração e domínio dividido – parte superior

O terceiro caso foi desenvolvido com o intuito de observar o efeito da mudança de rugosidade local nos resultados obtidos por meio do programa Meteodyn WT. A análise de

estabilidade entre os casos MT_01, MT_02 e MT_03 foi realizada com os resultados obtidos, que não foram satisfatórios. A Figura 6.6 mostra o cálculo do gradiente vertical de velocidades em função do modelo de rugosidade do terreno. A primeira comparação a ser verificada é a compatibilidade do gradiente vertical entre o Caso MT_01_a e o Caso MT_03_b, em que a única mudança realizada se resume à redução do domínio em estudo. Para os demais casos, em que existe o incremento de rugosidade em um domínio reduzido, observa-se que, com o aumento da rugosidade o gradiente vertical simulado pelo programa aproxima-se do gradiente real medido nas torres de medição instaladas na área.

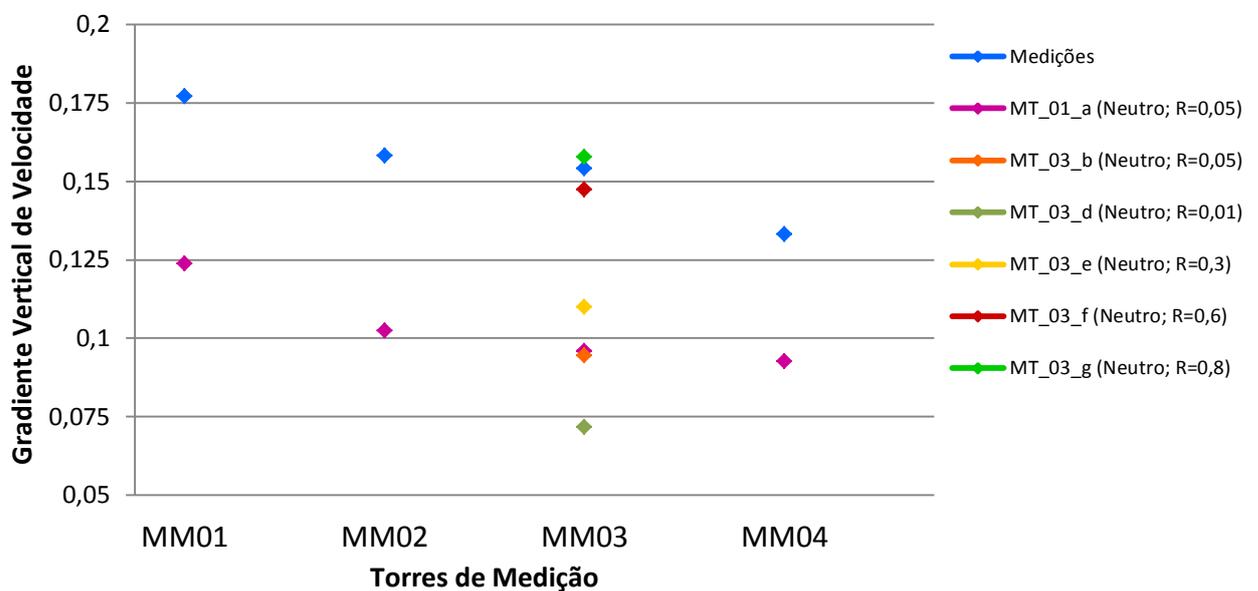


Figura 6.6 – Gradiente vertical de velocidade para cada caso em cada torre de medição

A aproximação do gradiente vertical de velocidade real e simulado também pode ser observada na Figura 6.7 na qual estão representados os resultados típicos de uma torre anemométrica instalada no complexo. Ressalta-se que a rugosidade local classificada entre 0,6 e 0,8, a qual aproximou o gradiente vertical, é muito elevada para as condições locais.

Na Figura 6.8 observa-se que, apesar do incremento na rugosidade superficial do local aproximar os gradientes verticais de velocidade real e simulado, o mesmo incremento não é visto entre condições reais de velocidade do vento e simulada. A mudança de rugosidade produz um pequeno efeito na relação de velocidades do local e, portanto, os resultados obtidos não são sincronizados. A Figura 6.8 também mostra o resultado obtido com o refinamento de malha do projeto. Observa-se uma leve melhora na relação de velocidades locais, o que não torna o método ajustado às medições reais.

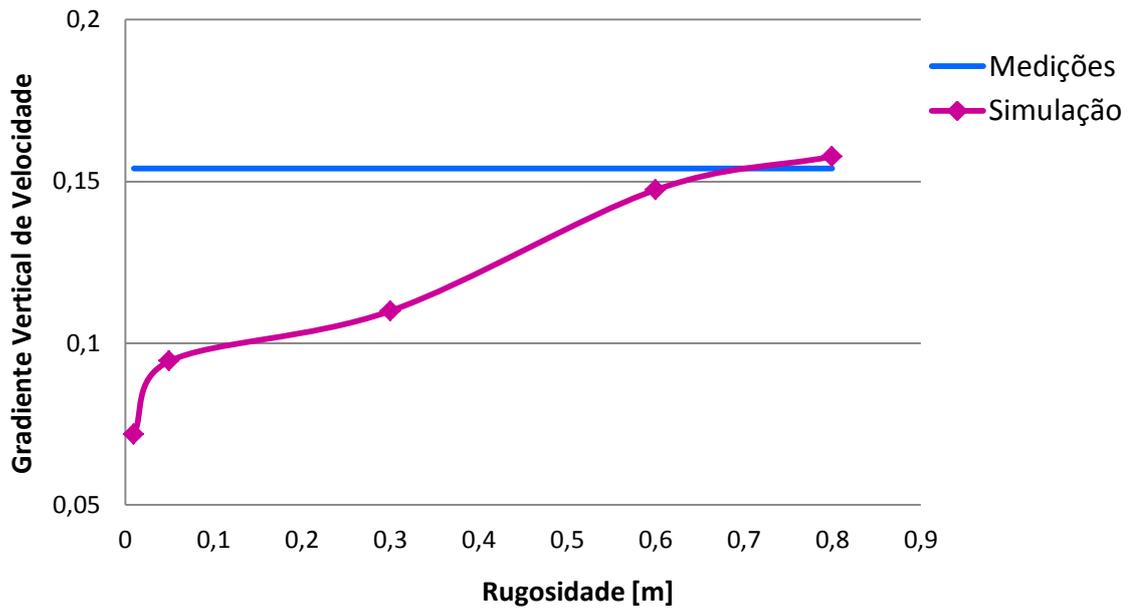


Figura 6.7 – Gradiente vertical de velocidade *versus* rugosidade

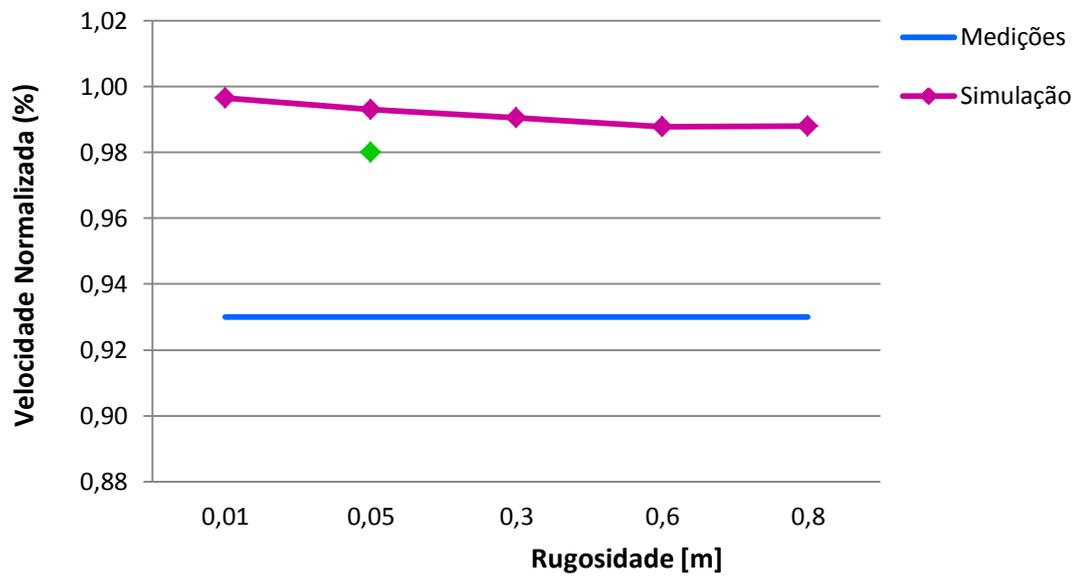


Figura 6.8 – Velocidade normalizada *versus* rugosidade

6.2 WaSP, Meteodyn WT e WindSim

Para a comparação dos resultados obtidos com os programas WaSP e Meteodyn WT foi adicionado um novo programa comercial ao trabalho, o WindSim. O programa executou seus cálculos dentro de um domínio computacional que abrangia as torres MM01, MM02 e MM03. A torre MM04 teve que ser retirada por limite computacional do computador que estava sendo utilizado.

A primeira comparação executada foi os resultados para o caso neutro de todos os programas em investigação, WaSP, Meteodyn WT e WindSim, com os valores reais obtidos nas três torres de medição do local.

A Tabela 6.5 mostra os resultados obtidos com a comparação analisada. Observa-se que com o programa WindSim obteve-se uma pequena melhora nos resultados, mas não suficiente para tornar o erro aceitável. A Figura 6.9 mostra uma análise resumida dos resultados.

Tabela 6.5. Resultados normalizados pela torre de medição MM02

Torre de Medição	Medições	WAsP		MT_01_a		WS_01_a	
		Valor	Erro (%)	Valor	Erro (%)	Valor	Erro (%)
MM01	0,89	0,99	+11,3	0,98	+10,6	0,96	+7,9
MM02	1,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
MM03	1,07	1,02	-5	1,00	-6,5	1,03	-3,7

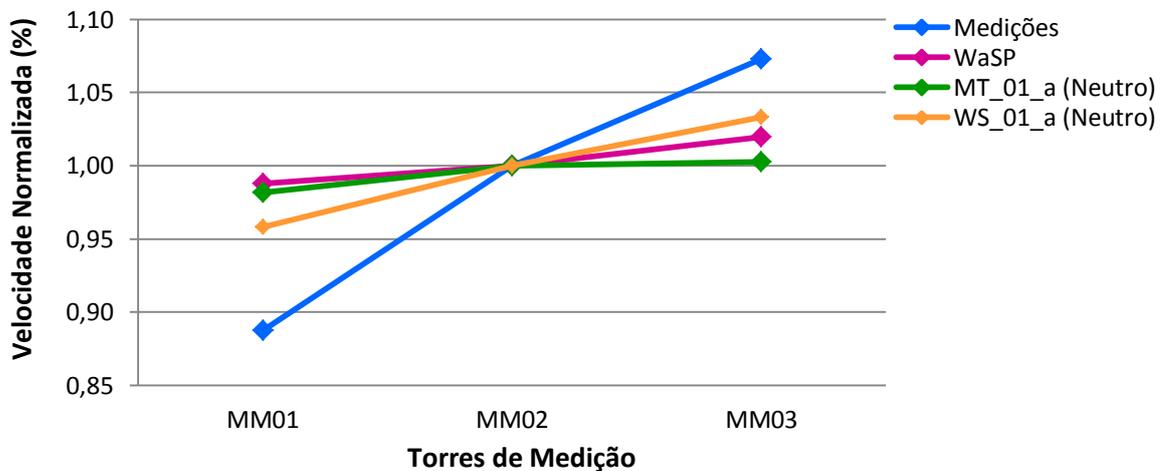


Figura 6.9. Comparação entre as velocidades normalizadas pela torre MM02

Após a falta de sucesso na obtenção de resultados em atmosfera neutra, casos anteriores, verificou-se que o programa WindSim permite ao usuário ativar uma equação de temperatura potencial através do comprimento de Monin-Obukhov, e, a partir da variação do comprimento, testes de altura de referencia e velocidade de entrada distintas, chegou-se aos dados mostrados na Tabela 6.6. Observa-se na Figura 6.10 que a variação do comprimento de Monin-Obukhov influencia drasticamente no resultado obtido, levando o erro percentual a até 28% acima do real quando comparamos os resultados aos valores obtidos nas torres de medição.

Tabela 6.6. Resultados normalizados pela torre de medição MM02

Torre de Medição	WS_01_a	WS_01_b	WS_01_c	WS_01_d	WS_01_e	WS_01_f
	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
MM01	0.96	0.91	0.93	0.91	0.91	0.92
MM02	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
MM03	1.03	1.38	1.05	1.15	1.26	1.26

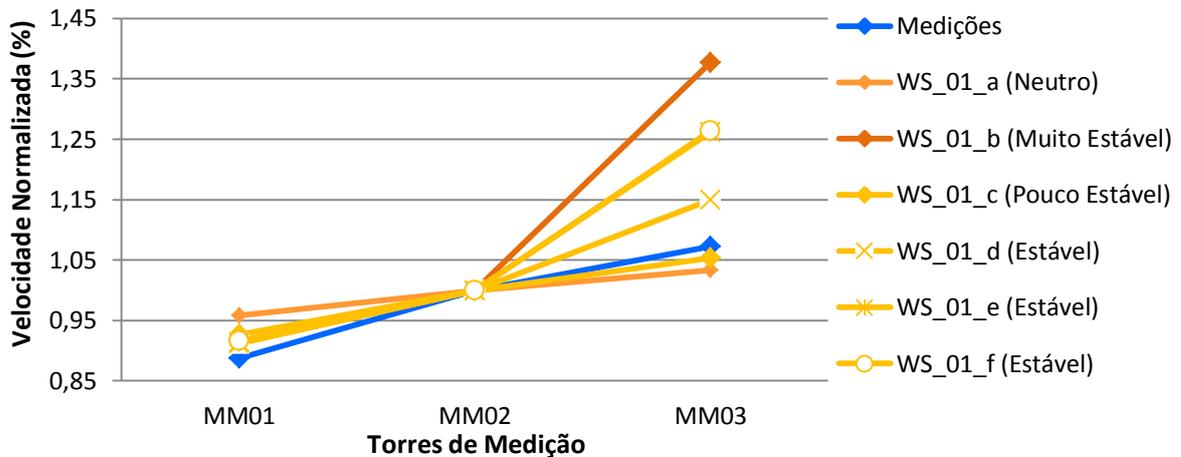


Figura 6.10. Comparação entre as velocidades normalizadas pela torre MM02

A Tabela 6.7 compara os resultados obtidos através dos programas citados neste trabalho e o melhor resultado do programa WindSim, levando em consideração o comprimento de Monin-Obukhov. Observa-se que a ativação do caso denominado como pouco estável aprimora os resultados obtidos com os cálculos em atmosfera neutra. Assim ressalta-se a importância da análise da estabilidade térmica local.

A Figura 6.11 mostra graficamente os resultados apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7. Resultados normalizados pela torre de medição MM02

Torre de Medição	Medições	WAsP		MT_01_a		WS_01_a		WS_01_c	
		Valor	Erro (%)	Valor	Erro (%)	Valor	Erro (%)	Valor	Erro (%)
MM01	0,89	0,99	+11,3	0,98	+10,6	0,96	+7,9	0,93	+4,4
MM02	1,00	1,00	0,0	1,00	0,0	1,00	0,0	1,00	0,0
MM03	1,07	1,02	-5	1,00	-6,53	1,03	-3,7	1,05	-1,8

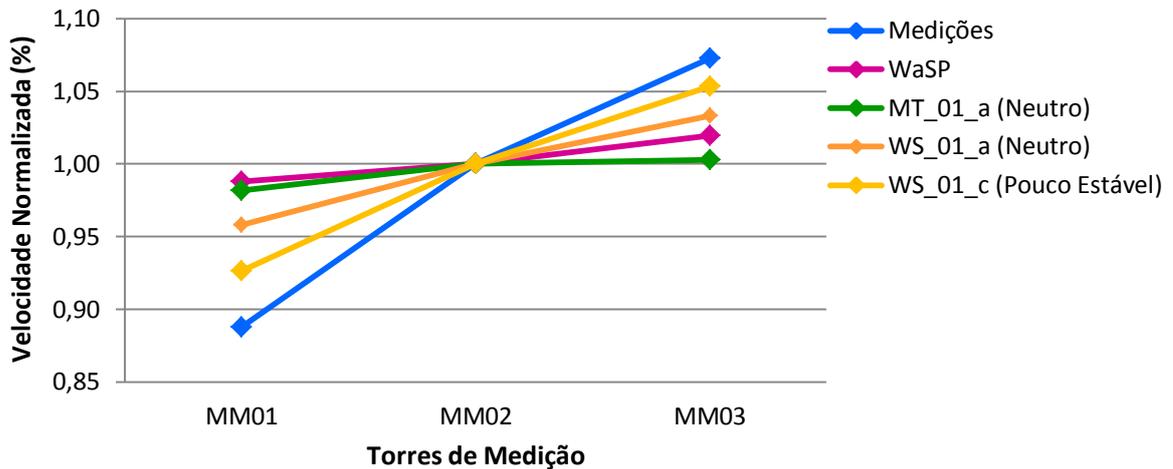


Figura 6.11. Comparação entre as velocidades normalizadas pela torre MM02

A Figura 6.12 mostra graficamente a diferença de velocidades médias obtidas através do programa WindSim caso neutro e o caso pouco estável.

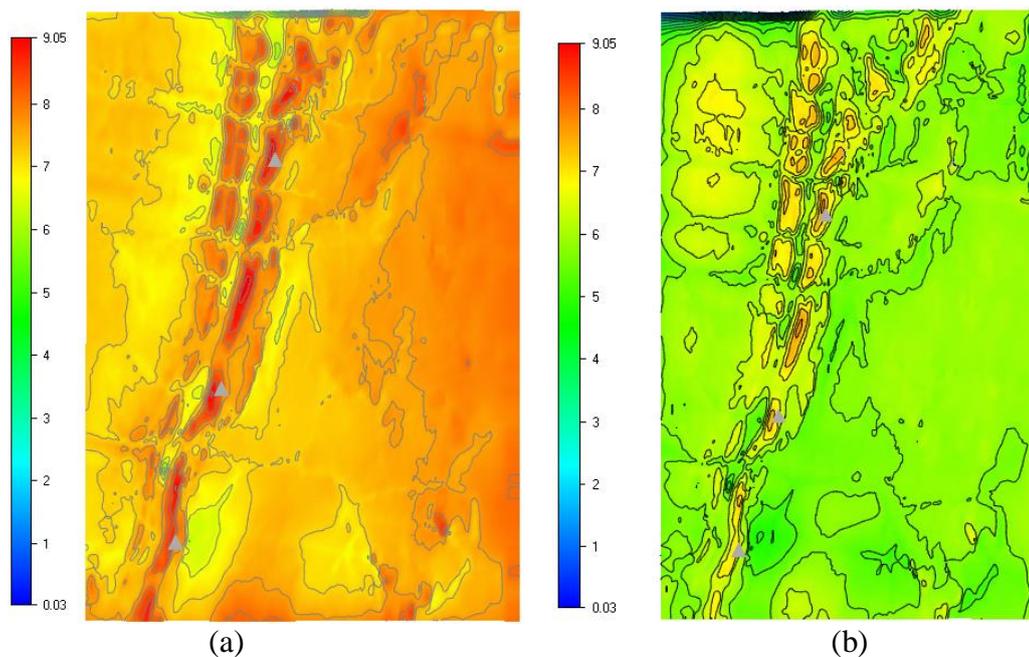


Figura 6.12. Comparação de velocidade média entre os casos (a) WS_01_a (Neutro) e (b) WS_01_c (Pouco Estável)

7 CONCLUSÃO

A presente dissertação apresenta um estudo do potencial eólico em um terreno complexo, comparando os resultados alcançados pela simulação empregando três programas comerciais, WAsP, Meteodyn WT e WindSim, e dados reais obtidos por meio de quatro torres de medição instaladas em campo em um complexo eólico prospectado na Chapada Diamantina, região Nordeste do Brasil.

Os resultados extraídos com a utilização de quatro torres de medição instaladas no domínio do complexo eólico sugerem que os efeitos de estabilidade térmica têm influência significativa sobre a velocidade média do vento (Figura 5.6). Embora a combinação de condições de estabilidade atmosférica (instáveis, neutros e estáveis) varie a cada projeto, a instabilidade atmosférica devido ao aquecimento solar da superfície e a estabilidade noturna devido ao resfriamento radiativo, é comum.

Dada a ampla gama de condições de estabilidade existente e seus efeitos sobre o gradiente vertical de velocidade e a velocidade do vento, é importante desenvolver modelos de escoamento do ar que possam prevêê-los.

O trabalho avaliou a adequação dos métodos analisados utilizando a média ponderada dos resultados nas direções mais significativas, 90°, 100°, 110°, 120° e 130°. Os resultados mostraram que, para o caso neutro deste estudo de caso, o programa WAsP obteve melhor adequação às condições locais do que o programa Meteodyn. Adicionalmente, o programa WindSim teve o melhor resultado quando comparado aos demais, mas ainda considera-se o erro de aproximadamente 8% elevado. A Figura 7.1 mostra o erro normalizado obtido entre os programas e as medições anemométricas locais.

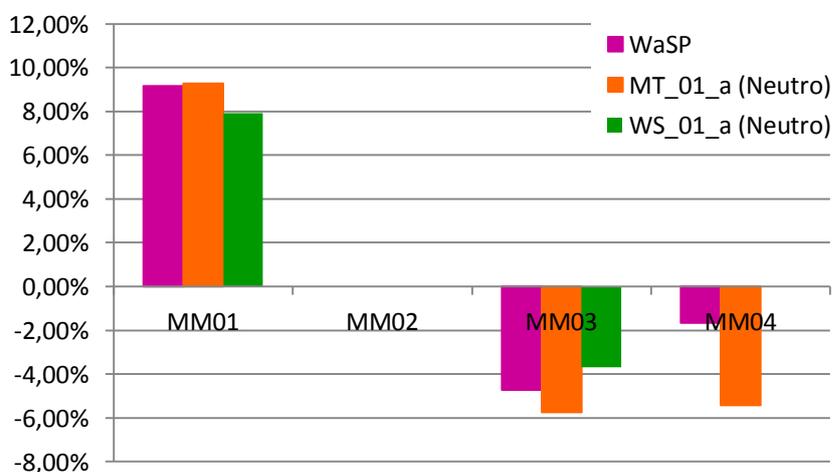


Figura 7.1 – Erro normalizado dos métodos analisados, WAsP, Meteodyn WT e WindSim

Após a verificação do mau ajuste dos métodos considerados, verificou-se a hipótese da instabilidade atmosférica constatada por meio dos dados anemométricos. Para a análise desta hipótese foram realizados, por meio dos programas Meteodyn WT e WindSim, cálculos com diferentes condições de estabilidade atmosférica. Observa-se que a mudança de estabilidade no programa Meteodyn não tem grande influência nos resultados. Já o Programa WindSim, por possibilitar a inicialização da equação da energia através da equação de comprimento de Monin-Obukhov, teve o maior índice de sucesso, tornando o maior erro abaixo de 5%. Os erros normalizados obtidos com a mudança de estabilidade do programa Meteodyn WT, comparados com as definições padrão do programa WASP são mostrados na Figura 7.2.

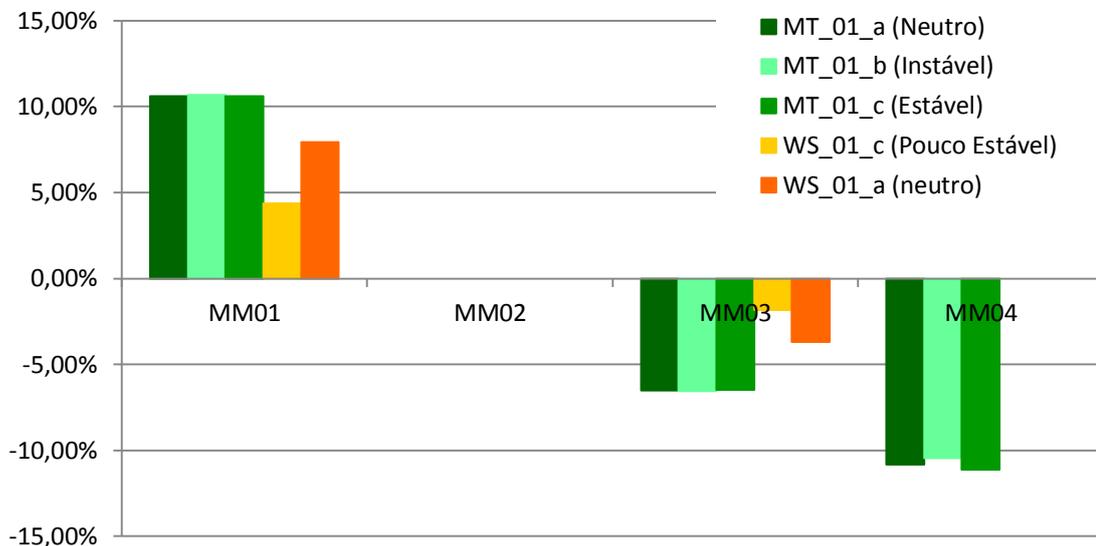


Figura 7.2 – Erro normalizado dos métodos analisados, WASP e Meteodyn, considerando condições de estabilidade atmosférica

A fim de melhorar a aproximação dos resultados obtidos por meio do programa Meteodyn, analisaram-se diferentes situações com domínio reduzido, mudança de rugosidade local e refinamento de malha.

Com a mudança da rugosidade local, observou-se melhora considerável do gradiente vertical de velocidade, aproximando-o do real, mas esta mudança não impactou diretamente na velocidade do vento, prevista pelo programa (Figura 6.7) e (Figura 6.8)

Conclui-se que, apesar de todas as mudanças nas condições iniciais do programa Meteodyn WT, nenhuma contribuiu de forma significativa para o aprimoramento dos resultados observados. A inclusão do programa WindSim no caso analisado foi de suma

importância para a verificação dos resultados obtidos e para reforçar a hipótese da estabilidade atmosférica.

Para este estudo de caso a utilização de programas mais sofisticados de previsão do recurso eólico em condição de estabilidade neutra, como o Meteodyn WT e WindSim, não diminuiu consideravelmente os erros analisados no projeto quando comparados ao programa WaSP. Para o caso de estratificação estável, o programa WindSim nos possibilita mudanças de variáveis, como altura do domínio, que são fixas no programa Meteodyn e também a ativação da equação da energia através da equação de comprimento Monin-Obukhov o que implicou em uma melhora significativa nos resultados obtidos e em um maior tempo computacional. Portanto, cabe ao usuário decidir se o ganho em precisão obtida por meio dos métodos é compensador diante do custo adicional em tempo computacional.

Como sugestão para futuros trabalhos fica a proposta, com o programador, de modificar parâmetros de modelagem do programa Meteodyn WT, como a altura total do domínio, a fim de criar um “bloqueio” nas condições de estabilidade e melhorar a previsão. Outra sugestão seria substituir a condição de contorno superior de pressão atmosférica para simetria. Para o programa WindSim, sugere-se a ampliação da avaliação da estabilidade térmica e seus conceitos. E para uma melhor previsão da estabilidade atmosférica, sugere-se aplicar este estudo de caso em programas de mesoescala.

Deve-se considerar também nas sugestões de futuros trabalhos a inclusão de estudos empregando programas CFD de propósito geral, como Fluent e CFX, onde o usuário tem maior autonomia na definição dos parâmetros de simulação e opções diversas de modelagem de turbulência. Como apresentado em [De Freitas Filho, 2012] a melhor aproximação dos resultados em um terreno complexo é indicado pelo modelo de turbulência $k - \omega$ SST, através da comparação dos resultados em túnel de vento. Ressalta-se também a possibilidade de aplicar a modelagem de turbulência LES.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEólica. **Boletim Mensal de Dados do Setor Eólico, dezembro de 2013**. Disponível em: (<http://www.portalabeeolica.org.br/>). Acesso em: 02/02/2014.

ABEEólica. **Nosso setor**. Disponível em: (<http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/nosso-setor.html>). Acesso em: 17/10/2013.

American M. S. **Meteorology Glossary - Monin-Obukhov length**. Disponível em: (<http://glossary.ametsoc.org/>). Acesso em: 26/02/2014.

ANEEL. **Matriz de Energia Elétrica**. Disponível em: (<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/operacaocapacidadebrasil.asp>). Acesso em: 02/02/2014.

Barrios, A.; Zubiaur, R.; Cerdón, R. **Checking The Capabilities Of Commercial Software For Numerical Site Calibration**. EWEC, 2007.

Barrios, A.; Zubiaur, R.; Cerdón, R. **Advanced Numerical Site Calibration Using Commercial Software**. EWEC, 2008.

Beaucage, P. **Wind Flow Modeling Performance**. AWSTruepower, 2012.

Beaucage, P.; Brower, M. C.; Tensen, J. **Evaluation of four numerical wind flow models for wind resource mapping**. EWEA, 2013.

Berge, E.; Gravdahl, A. R.; Schelling, J.; Tallhaug, L.; Undheim, O. **Wind in complex terrain. A comparison of WAsP and two CFD-models**. EWEC, 2006.

Bowen A. J.; Mortensen, N. G. **Exploring the limits of WAsP the Wind Atlas Analysis and Application Program**. EWEC, 1996.

Custódio, R. S. **Energia Eólica**. Synergia, Rio de Janeiro. 2013.

De Freitas Filho, D. G. R. **Análise da Aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional para Avaliação do Potencial Eólico em Terrenos Complexos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil. 2012.

Delaunay, D. **Wind Resource Assessment with Meteodyn WT**. Global Wind Energy Congress, 2006.

Diniz, A. S. **O Atual Modelo do Setor Elétrico Brasileiro**. 2005. Disponível em: (<http://www.copel.com/>). Acesso em: 14/10/2013.

Dorweiler, R. P. **Aplicação de modelagem de turbulência na camada limite atmosférica para verificar efeitos locais de topografia**. Curitiba. 2007.

Ferry, M. **New features of the MIGAL solver**. Proc. Of the Phoenics Users Int. Conf., Moscow, 2002.

Fox, R. W.; McDonald, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. LTC, Rio de Janeiro, 2001.

Freire, A. P. S.; Menut, P. P. M.; Su, J. **Turbulência**. ABCM, Rio de Janeiro, 2002.

Hurley, P. J. **An evaluation of several turbulence schemes for the prediction of mean and turbulent fields in complex terrain**. Boundary-Layer Meteorology 83: p.43–73, 1997.

Jackson, P. S.; Hunt, J. C. R. **Turbulent Wind Flow over a Low Hill**. Quart J. R. Met. Soc., pp 929-955. 1975.

Loredo-Souza, A. M.; Schettini, E. B. C.; Paluch, M. J. Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento. In: Möller, S. V.; Silvestrini, J. H. **Turbulência Vol. 4**. Rio de Janeiro, p. 137-163, 2004.

Melo, E. A. **Perspectiva de Futuro da Energia Eólica**. Disponível em: (<http://www.portalabeeolica.org.br/>). Acesso em: 21/10/2013.

Melo, E. **Tempos de discutir a Matriz Energética Nacional?**. Disponível em: (<http://www.portalabeeolica.org.br/>). Acesso em: 14/10/2013.

Meteodyn WT. **Meteodyn WT Help Facility and On-line Documentation**. Acesso em: 15/12/2013.

Möller, S. V.; Silvestrini, J. H. **Turbulência Vol. 4**. ABCM, Rio de Janeiro, 2004.

Pereira, R.; Guedes, R.; Santos, C. S. **Comparing WAsP and CFD wind resource estimates for the “regular” user**. EWEC, 2010a.

Pereira, R.; Guedes, R.; Santos, S. **Reduction of uncertainty in resource assessment through wind flow model “ensemble”**. EWEC, 2010b.

Petry, A. P. **Análise Numérica de escoamentos turbulentos tridimensionais empregando o método de elementos finitos e simulação de grandes escalas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil. 2002

Piomelli, U. **Large-Eddy Simulation: Achievements and Challenges**. Progress in Aerospace Sciences, 35: 335-362, 1999.

Rezende, A. L. T. **Análise Numérica da Bolha de Separação do escoamento turbulento sobre placa plana fina inclinada**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.

Rohatgi, J. S. **Wind characteristics: An analysis for the generation of wind power**. Canyon: Alternative Energy Institute, West Texas A&M University, 1994.

Schlichting, D. H. **Boundary-Layer Theory**. McGraw-Hill, New York, 1978.

Silva, N. F.; Rosa, L. P.; Araújo, M. R. The utilization of wind energy in the Brazilian electric sector's expansion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 3, p. 289-309, Junho 2005. ISSN 1364-0321.

Stangroom, P. **CFD Modelling of Wind Flow Over Terrain**. Nottingham, UK. 2004.

Stull, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Kluwer Academic Press, Dordrecht, The Netherlands, 670p, 1988.

Sveinbjornsson, S. **Analysis of WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) in complex topographical conditions using measured production from a large scale wind farm**. University of Washington. 2013.

Tristan, C.; Jian, W.; Fahssis, K. **Validation of Meteodyn WT on a Hebei province wind farm project (China)**. EWEC, 2009.

Troen I, Lundtang E. P. **El atlas Eólico Europeo**. Roskilde: Risø National Laboratory, 260p, 1990.

Van der Hoven, I.,; **Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range Form 0.0007 to 900 Cycles Per Hour**. Journal of Meteorology, Vol. 14, No. 2. 1957.

VanLuvanee, D. R.; Rogers, T.; Randall, G.; Williamson, A.; Miller, T. **Comparison of WAsP, CFD, NWP and Analytical Methods for Estimating Site Wide Wind Speeds**. EWEC, 2009.

Villar Alé, J. A.; Pereira A. D. L. **Taller de energia eólica**. Guatemala. 2002.

Wallbank, T. **WindSim Validation Study, CFD validation in complex terrain**. 2008. Acesso em: 13/03/2014.

WAsP. **WAsP 10 Help Facility and On-line Documentation**. Acesso em: 15/12/2013.

Wenzel, G. **Impact of Atmospheric Stability on Wind Energy Predictions**. Brazil Windpower. 2013.

White, F. M. **Viscous Fluid FLOW**. McGraw-Hill, New York, 1974.

Wilcox, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. DCW Industries, Anaheim, CA - USA, 1998.

Xavier, C. M. **Análise de modelos submalha em elementos finitos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil, 2008.