



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

**ESTUDO DA SENSIBILIDADE DA ESTIMATIVA DE VENTO NO MODELO WASP<sup>®</sup>**  
**RELATIVA À RUGOSIDADE SUPERFICIAL**

**RELBERT VIEIRA SILVA**

**Recife**

**2013**

**RELBERT VIEIRA SILVA**

**ESTUDO DA SENSIBILIDADE DA ESTIMATIVA DE VENTO NO MODELO WAsP<sup>®</sup>  
RELATIVA À RUGOSIDADE SUPERFICIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Alex Maurício Araújo,  
D.Sc.

**Recife**

**2013**

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586e	Silva, Relbert Vieira. Estudo da sensibilidade da estimativa de vento no modelo WASP relativa à rugosidade superficial / Relbert Vieira Silva. - Recife: O Autor, 2013. 112 folhas, il., gráfs., tabs.  Orientador: Prof. DSc. Alex Maurício Araújo. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013. Inclui Referências.  1. Engenharia Mecânica. 2. Rugosidade superficial. 3. Sensibilidade. 4. Energia eólica. I. Araújo, Alex Maurício. (Orientador). II. Título.  UFPE  621 CDD (22. ed.) BCTG/2013-232
-------	---

“ESTUDO DA SENSIBILIDADE DA ESTIMATIVA DE VENTO NO MODELO  
WAsP<sup>®</sup> RELATIVA À RUGOSIDADE SUPERFICIAL”

RELBERT VIEIRA SILVA

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

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

---

Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO  
ORIENTADOR/PRESIDENTE

---

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ  
VICE-COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO (UFPE)

---

Prof. Dr. PEDRO ANDRÉ CARVALHO ROSAS (UFPE)

---

Prof. Dr. RENATO JOSÉ DE SOBRAL CINTRA (UFPE)

Dedico este trabalho aos meus pais, Arnaldo Silva e Rute Silva, por sempre terem me incentivado a galgar novos degraus na carreira acadêmica, a meus irmãos e amigos que sempre me apoiaram e me incentivaram ao longo do caminho que me trouxe até aqui.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Prof. Alex Araújo pelo apoio, confiança e dedicação.

A todos que compõem a empresa Vestas Energia Eólica, em especial a Warwick Heaney e Kenneth Braun que me prestaram todo o suporte solicitado e contribuíram com as análises presentes no trabalho assim como permitiram o acesso a várias ferramentas usadas para este estudo.

Agradeço também aos amigos da Eólica Tecnologia: Everaldo Feitosa, Gustavo Leite, Camila Freitas e Eduardo Moura pelas importantes discussões que muito enriqueceram meu cabedal de conhecimentos em eólica em todas as suas áreas. A todos os familiares e colegas da universidade, em especial a Oyama Douglas e Rafael Espíndola, entre outros que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

*"Deus é o dono de tudo. Devo a Ele a oportunidade que tive de chegar aonde cheguei. Muitas pessoas têm essa capacidade, mas não têm essa oportunidade. Ele a deu para mim, não sei por quê. Sei que não posso desperdiçá-la."*

Ayrton Senna

*Esta página foi intencionalmente deixada em branco.*

# RESUMO

Para o estudo de viabilidade de uma central geradora eólica é necessário calcular a produção anual de energia esperada. O modelo computacional WAsP<sup>®</sup> (*Wind Atlas Analysis Application Program*) é usado para gerar dados para a elaboração de atlas eólicos, estimar o potencial de uma região e calcular a produção de energia. Um dos parâmetros de entrada do modelo é a rugosidade superficial ou comprimento de rugosidade  $z_0$ , que é usado para caracterizar a cobertura superficial do solo. A literatura indica que o parâmetro comprimento de rugosidade pode ser um valor subjetivo, uma vez que é estimado com base em vários critérios subjetivos. Neste trabalho, vários conceitos físicos importantes para o entendimento do processo de modelagem foram abordados e discutidos. A metodologia WAsP<sup>®</sup> e o modelo de mudança de rugosidade são apresentados de forma simplificada. A sensibilidade do modelo WAsP<sup>®</sup> ao parâmetro rugosidade superficial foi avaliada ao simular vários cenários. O grau de precisão necessário para a definição da rugosidade, os erros nas estimativas de vento na extrapolação vertical e horizontal e o impacto na intensidade de turbulência de uma área foram as principais análises realizadas. Os resultados mostram que a adoção de premissas inadequadas na definição do comprimento de rugosidade superficial pode levar a avaliação do recurso eólico a resultados significativamente discrepantes que poderiam ser cruciais para o sucesso de um empreendimento eólico em termos de rentabilidade desejada.

Palavras-chave: Rugosidade superficial. Sensibilidade. Energia eólica.

# ABSTRACT

To assess the feasibility of a wind farm it is necessary to calculate the annual expected energy production. The computational model WAsP<sup>®</sup> (*Wind Atlas Analysis Application Program*) is used to generate wind atlas data, estimate wind power potential, and calculate wind farm production. Surface roughness parameter or roughness length  $z_0$  is used as an input into the model and is used for characterizing surface coverage. The literature indicates that the roughness length parameter can be a subjective value that is estimated based on various subjective criteria. In this project, many physics concepts which are important for the understanding of the modeling process were addressed and discussed. The WAsP<sup>®</sup> methodology and the roughness change model are presented in a simplified form. The sensitivity of the WAsP<sup>®</sup> model to the surface roughness parameter was evaluated by simulating various scenarios. The precision for defining the roughness length, errors in the estimations of horizontal and vertical wind extrapolation and the impact on the turbulence intensity estimated for a specific area are the main analyzes performed. The results show that the adoption of inadequate assumptions when defining surface roughness length can lead the wind resource assessment to significantly discrepant results that could be crucial to the success of a wind farm project in terms of desired return.

Keywords: Surface roughness. Sensitivity. Wind energy.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da capacidade instalada em energia eólica no Brasil.....	19
Figura 2 – Sistema de circulação atmosférica global: modelo de duas células.....	25
Figura 3 – Sistema de circulação atmosférica global: modelo de seis células .....	26
Figura 4 – Brisas marítima (esquerda) e terrestre (direita).....	28
Figura 5 – Partes em que a troposfera está dividida .....	28
Figura 6 – Evolução diária da camada limite sobre uma região de alta pressão.....	29
Figura 7 – Fenômeno de convecção térmica atmosférica.....	31
Figura 8 – Espiral de Ekman do vento no hemisfério norte.....	32
Figura 9 – Perfil de velocidade ( $u_z$ ) do vento sobre superfície não vegetada.....	35
Figura 10 – Diagrama esquemático de forças em uma parcela de ar na atmosfera .....	39
Figura 11 – Diagrama esquemático de uma atmosfera estável .....	41
Figura 12 – Diagrama esquemático para um caso de inversão térmica.....	42
Figura 13 – Diagrama esquemático para atmosfera neutra .....	43
Figura 14 – Diagrama esquemático para uma atmosfera instável .....	44
Figura 15 – Aquecimento e resfriamento da superfície terrestre.....	45
Figura 16 – Deslocamento vertical do ar em diferentes condições atmosféricas .....	46
Figura 17 – Deslocamento vertical do ar em atmosfera instável.....	47
Figura 18 – Indicadores visuais de estabilidade atmosférica .....	48
Figura 19 – Indicadores visuais de instabilidade atmosférica .....	49
Figura 20 – Exemplo de terreno com rugosidade classe 0 ( $z_0=0,0002$ m).....	52
Figura 21 – Exemplo de terreno com rugosidade classe 1 ( $z_0=0,03$ m).....	52
Figura 22 – Exemplo de terreno com rugosidade classe 2 ( $z_0=0,10$ m).....	53
Figura 23 – Exemplo de terreno com rugosidade classe 3 ( $z_0=0,40$ m).....	53
Figura 24 – Análise de rugosidade do terreno por setor de direção.....	56
Figura 25 – Exemplo de mapa de rugosidade do terreno .....	57
Figura 26 – Velocidades médias de vento medidas a cada 1 hora .....	59
Figura 27 – Zona de turbulência após um obstáculo.....	60
Figura 28 – Metodologia WAsP® .....	63
Figura 29 – Exemplo de Atlas Eólico convertido em arquivo de texto.....	64

Figura 30 – Situação idealizada do fluxo de vento após mudança brusca na rugosidade superficial. ....	66
Figura 31 – Rosa de rugosidades .....	70
Figura 32 – Tabela de rugosidades.....	70
Figura 33 – Mapa de rugosidade em região litorânea do Rio Grande do Norte .....	72
Figura 34 – Rosa de rugosidade indicando os setores considerados no cálculo dos parâmetros .....	73
Figura 35 – Mapa de rugosidade após a remoção dos polígonos para verificação da rosa de rugosidade.....	74
Figura 36 – Rosa de rugosidade com o setor 2-ENE em destaque .....	76
Figura 37 – Exemplo de condições superficiais associadas a um comprimento de rugosidade $z_0 = 0,0003$ m .....	84
Figura 38 – Exemplo de condições superficiais associadas a um comprimento de rugosidade $z_0 = 0,03$ m .....	84
Figura 39 – Exemplo de condições superficiais associadas a um comprimento de rugosidade $z_0 = 0,1$ m .....	85
Figura 40 – Exemplo de condições superficiais associadas a um comprimento de rugosidade $z_0 = 0,2$ m .....	85
Figura 41 – Condições climáticas assumidas para a Torre de Medição 1 e para a Torre de Medição 2. ....	86
Figura 42 – Cenário hipotético para a Simulação 1.....	86
Figura 43 – Cenário hipotético para a Simulação 2.....	87
Figura 44 – Cenário hipotético para a Simulação 3.....	89
Figura 45 – Influência da rugosidade e estabilidade térmica no perfil vertical da velocidade de vento. ....	91
Figura 46 – Mapa de rugosidade com rugosidade geral $z_0 = 0,1$ m .....	92
Figura 47 – Mapa de rugosidade com rugosidade geral $z_0 = 0,03$ m .....	93
Figura 48 – Perfil vertical da velocidade do vento para mapa com rugosidade geral .....	94
Figura 49 – Perfil vertical da velocidade do vento para mapa com rugosidade geral .....	95
Figura 50 – Carregamento do vento em uma estrutura de turbina eólica .....	98
Figura 51 – Mapas de rugosidade com distintos comprimentos de rugosidade para a área seca (vermelha). ....	99

Figura 52 – Rosa dos ventos para Simulação 4.3.....	101
Figura 53 – Mapa topográfico com a posição das turbinas e torre anemométrica ..	101
Figura 54 – Mapa de intensidade de turbulência na altura do cubo da turbina para os setores 0° - 60°.....	103
Figura 55 – Mapa de intensidade de turbulência na altura do cubo da turbina para os setores 90° - 150°.....	104
Figura 56 – Mapa de intensidade de turbulência na altura do cubo da turbina para os setores 180° - 240°.....	105
Figura 57 – Mapa de intensidade de turbulência na altura do cubo da turbina para os setores 270° - 330°.....	106

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução do preço médio da energia eólica no Brasil.....	20
Tabela 2 – Resultados de geração média dos parques eólicos em operação no nordeste do Brasil .....	20
Tabela 3 – Valores aproximados para o expoente de potência em alguns terrenos típicos.....	37
Tabela 4 – Rugosidade média ponderada pela área, $Z_{0\_med}$ .....	55
Tabela 5 – Valores típicos de comprimento de rugosidade - $Z_0$ .....	56
Tabela 7 – Comprimentos de rugosidade do mapa da Figura 39.....	73
Tabela 8 – Rosa de rugosidade para o mapa original.....	74
Tabela 9 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 0-N.....	75
Tabela 10 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 1-NNE .....	75
Tabela 11 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 2-ENE .....	77
Tabela 12 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 3-E .....	77
Tabela 13 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 4-ESE .....	78
Tabela 14 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 5-SSE .....	78
Tabela 15 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 6-S .....	79
Tabela 16 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 7-SSW .....	80
Tabela 17 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 8-WSW .....	80
Tabela 18 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 9-W .....	81
Tabela 19 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 10-WNW .....	81
Tabela 20 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 10-WNW .....	82
Tabela 21 – Comprimentos de rugosidade considerados .....	83
Tabela 22 – Resultados para a Simulação 1.....	87
Tabela 23 – Resultados para a Simulação 2.....	87
Tabela 24 – Raio de cobertura de uma torre de medição .....	88
Tabela 25 – Resultados para a Simulação 3.....	90
Tabela 26 – Parâmetros básicos para a classe de aerogeradores (IEC61400-1).....	97
Tabela 27 – Sumário dos dados de vento medidos. ....	100
Tabela 28 – Condições climáticas para a Simulação 4.3. ....	100

# NOMENCLATURA

u	velocidade média do vento [m/s];
z	altura [m];
$z_0$	comprimento de rugosidade do solo [m];
$\tau$	tensão de cisalhamento na superfície do solo [Pa];
$\rho$	massa específica do ar [kg/m <sup>3</sup> ];
$U^*$	velocidade de fricção [m/s];
K	constante de Von Kármán ( $K=0,4$ ) [adimensional];
B	constante que expressa a relação da velocidade do vento com o logaritmo da altura [adimensional];
h	altura acima do solo [m];
$\alpha$	expoente de potência no local [adimensional];
$\sigma$	desvio padrão da velocidade do vento [m/s];
A	fator de escala da distribuição de Weibull [m/s];
k	fator de forma de Weibull [adimensional];
$h'$	altura do elemento de rugosidade [m];
S	área da seção transversal, na direção do vento, do elemento de rugosidade [m <sup>2</sup> ];
$A'$	área horizontal média dos elementos de rugosidade uniformemente distribuídos [m <sup>2</sup> ];
l	intensidade de turbulência [%];
x	distância à jusante do ponto de observação até a mudança de rugosidades [m];
$z'$	máxima rugosidade entre $z_{01}$ e $z_{02}$ [m];
Cor	fator de correção usado no modelo de mudança de rugosidade no fator de escala de Weibull;

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo e organização da dissertação .....</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>24</b>
<b>2.1</b>	<b>Circulação atmosférica .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2</b>	<b>Camada limite atmosférica .....</b>	<b>29</b>
2.2.1	Estrutura da camada limite atmosférica.....	30
2.2.1.1	<i>A subcamada laminar .....</i>	<i>30</i>
2.2.1.2	<i>A camada limite superficial .....</i>	<i>30</i>
2.2.1.3	<i>A camada de Ekman .....</i>	<i>32</i>
2.2.2	Modelagem atmosférica .....	33
2.2.3	Perfil vertical da velocidade do vento na camada limite superficial em condições de estabilidade neutra .....	34
2.2.4	Estabilidade atmosférica.....	38
2.2.4.1	<i>Atmosfera Estável.....</i>	<i>40</i>
2.2.4.2	<i>Atmosfera Neutra.....</i>	<i>42</i>
2.2.4.3	<i>Atmosfera Instável.....</i>	<i>43</i>
2.2.4.4	<i>Fatores que causam variação nas condições de estabilidade atmosférica ..</i>	<i>44</i>
2.2.4.5	<i>Movimentações verticais de ar na atmosfera .....</i>	<i>46</i>
2.2.4.6	<i>Indicadores visuais de estabilidade atmosférica.....</i>	<i>47</i>
<b>2.3</b>	<b>Rugosidade do solo .....</b>	<b>50</b>
2.3.1	Determinação do comprimento de rugosidade .....	50
2.3.1.1	<i>Estimativa do comprimento de rugosidade a partir de medições em duas alturas.....</i>	<i>50</i>
2.3.1.2	<i>Estimativa do comprimento de rugosidade a partir de tabelas e imagens comparativas .....</i>	<i>51</i>
<b>2.4</b>	<b>Turbulência .....</b>	<b>57</b>
2.4.1	Intensidade de turbulência.....	58
<b>3</b>	<b>MODELO WASP® .....</b>	<b>61</b>
<b>3.1</b>	<b>Metodologia WAsP® .....</b>	<b>61</b>
<b>3.2</b>	<b>Modelo de mudança de rugosidade.....</b>	<b>65</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E SIMULAÇÕES.....</b>	<b>69</b>
<b>4.1</b>	<b>Conversão de mapas de rugosidade em rosas de rugosidade .....</b>	<b>69</b>

4.1.1	Rosa de rugosidades.....	71
4.1.2	Mapa de rugosidades .....	71
<b>4.2</b>	<b>Análise de sensibilidade do modelo WAsP® à rugosidade superficial..</b>	<b>83</b>
4.2.1	Extrapolação Horizontal.....	83
4.2.2	Extrapolação Vertical.....	90
<b>4.3</b>	<b>Sensibilidade do modelo de carga em turbinas eólicas à rugosidade superficial.....</b>	<b>96</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>108</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>110</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Desde a instituição do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA) em 2004, a energia eólica vem experimentando um processo de expansão acelerado no Brasil. O PROINFA foi responsável pela contratação de 1.422 MW, e desde então o governo tem incentivado o crescimento da fonte através do mecanismo de leilão em que o governo assina contratos garantindo a compra da energia dos parques durante 20 anos que é o período esperado de vida útil de um parque eólico.

O primeiro leilão do governo com a participação de eólica ocorreu em 2009 e foi orientado às fontes com menores impactos ambientais. Apenas neste leilão 1.806 MW foram contratados. Desde então, a eólica tem obtido parcela significativa nos leilões de energia de reserva – LER e leilões de fontes alternativas – LFA, conforme pode ser visto na Figura 1.

Os leilões de energia foram instituídos no Brasil como um meio de contratação de energia em um ambiente regulado pelo governo federal. Nestes leilões, desenvolvedores de projetos de geração disputam a venda de lotes de energia à Eletrobrás que define sua necessidade de compra a partir da demanda informada pelas empresas distribuidoras de energia. As distribuidoras, por sua vez, compram a energia da Eletrobrás a fim de garantir o abastecimento de suas demandas. Tradicionalmente, os leilões de energia são realizados por fontes específicas de geração. Cada fonte tem seu próprio leilão como é o caso das usinas hidroelétricas, das térmicas e energias renováveis.

Desde o início das contratações, cerca de 7 GW em eólica já foram arrematados. De acordo com o Plano Decenal de Energia a expansão em capacidade instalada de centrais eólicas no Brasil superará 15,5 GW até 2021 (BRASIL, 2012). Isso corresponde a uma mudança de 1,2% para 8,5% na participação de eólica na matriz energética nacional.

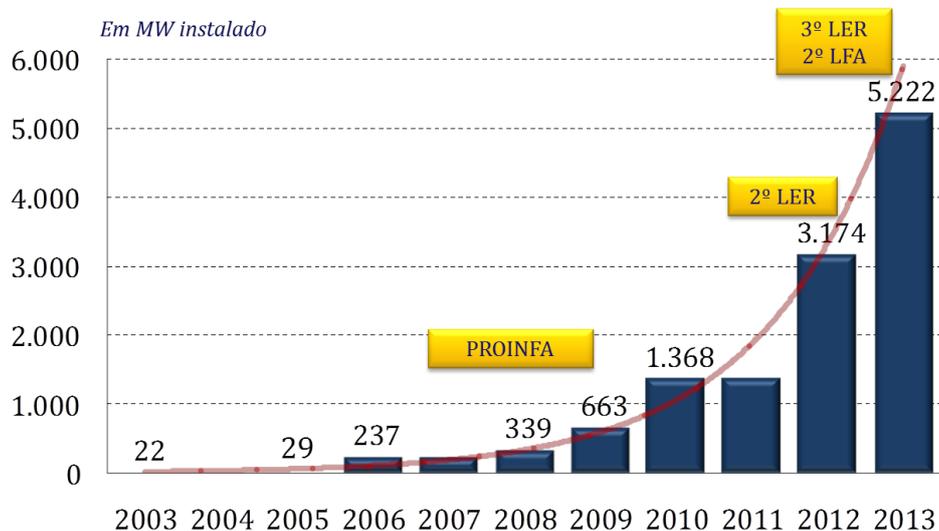
O crescimento exponencial da eólica no Brasil se deve, principalmente, à queda nos preços e ao aumento do fator de capacidade dos projetos conforme pode ser visto na Tabela 1.

Com a entrada em operação dos primeiros parques contratados, um novo fato tem chamado a atenção, principalmente, dos órgãos públicos que regulam o

fornecimento de energia no país e dos empreendedores de projetos eólicos. O resultado da produção dos parques tem se mostrado abaixo daquilo que havia sido predito na fase de projeto. O fator de capacidade considerado nos projetos brasileiros é substancialmente mais elevado do que a experiência internacional. O fator de capacidade<sup>1</sup> médio observado nos dez países de maior capacidade de geração eólica é de apenas 21%. Ou seja, metade do fator médio considerado em projetos no Brasil (LOSEKANN, 2012).

Os dados de geração observados nos parques eólicos brasileiros, de acordo com o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), sugerem que a produção de energia anual esperada tenha sido superestimada. A Tabela 2 apresenta os resultados apresentados na fase de projeto e a geração média observada para vários parques eólicos na região nordeste. Os dados mostram que o fator de capacidade médio estimado para os parques é de 43,7%, porém, em 2011 o fator de capacidade observado foi de 31,5%. Na região sul os valores estimados estão próximos dos valores observados.

**Figura 1 – Evolução da capacidade instalada em energia eólica no Brasil**



Fonte: (FARIAS, 2010)

<sup>1</sup> O fator de capacidade é a proporção entre a produção efetiva do parque eólico em um período de tempo e a capacidade total máxima de produção neste mesmo período.

Tabela 1 – Evolução do preço médio da energia eólica no Brasil

Mecanismo de Contratação	Capacidade Contratada [MW]	Fator de Capacidade Médio [%]	R\$/MWh
PROINFA	1.422	37	270,32
LER 2009	1.806	43	148,40
LER 2010	528	51	122,69
LFA 2010	1.520	43	134,13
A-3 2011	1.068	45	99,48
LER 2011	861	50	99,54

Fonte: (LOSEKANN, 2012).

Tabela 2 – Resultados de geração média dos parques eólicos em operação no nordeste do Brasil

USINAS REGIÃO NORDESTE	GERAÇÃO MÉDIA (MW)		FATOR DE CAPACIDADE VERIFICADO (%)		FATOR DE CAPACIDADE ESTIMADO (%)	POTÊNCIA NOMINAL (MW)	CONFIGURAÇÃO	INÍCIO DE OPERAÇÃO COMERCIAL
	2011	04/11 - 03/12	2011	04/11 - 03/12				
EOL RIO DO FOGO	15,04	16,96	30,51	34,4	34	49,3	61 AEROGERADO RES DE 800 kW E 1 AEROGERADOR DE 500kW	15/07/2006
EOL PRAIA FORMOSA	23,90	29,6	22,89	28,4	39	104,4	50 AEROGERADO RES DE 2,088 MW	26/09/2009
EOL ICARAIZINHO	20,98	24,21	38,43	44,3	43	56,6	26 AEROGERADO RES DE 2,1 MW	14/10/2009
EOL CANOA QUEBRADA	18,39	21,73	32,26	38,1	43,5	57	28 AEROGERADO RES (22 DE 2,1 MW E 6 DE 1,8 MW)	26/01/2010
EOL BONS VENTOS	15,15	18,26	30,29	36,5	43,84	50	24 AEROGERADO RES (22 DE 2,1 MW E 2 DE 1,8 MW)	11/02/2010
EOL ENACEL	9,29	11,21	29,50	35,6	43,54	31,5	15 AEROGERADO RES DE 2.1 MW	18/03/2010
EOL VOLTA DO RIO	12,34	15,53	29,39	37	47	42	28 AEROGERADO RES DE 1,5 MW	03/09/2010
EOL PRAIA DO MORGADO	7,35	8,95	25,54	31	50	28,8	19 AEROGERADO RES DE 1,580 MW	26/05/2010
EOL ALEGRIA I	10,35	13,44	20,29	26,3	32	51	60 AEROGERADO RES DE 850 kW	30/12/2010

USINAS REGIÃO NORDESTE	GERAÇÃO MÉDIA (MW)		FATOR DE CAPACIDADE VERIFICADO (%)		FATOR DE CAPACIDA DE ESTIMADO (%)	POTÊNCIA NOMINAL (MW)	CONFIGURAÇÃO	INÍCIO DE OPERAÇÃO COMERCIAL
	2011	04/11 - 03/12	2011	04/11 - 03/12				
EOL M SECO 3	10,28	9,77	39,54	37,6	48.8	26	13 AEROGERADO RES DE 2,0 MW	26/08/2011
EOL M SECO 2	11,08	10,21	42,60	39,3	46.2	26	13 AEROGERADO RES DE 2,0 MW	24/09/2011
EOL M SECO 1	10,25	9,48	39,44	36,5	47.3	26	13 AEROGERADO RES DE 2,0 MW	30/09/2011
EOL M SECO 5	7,50	7,85	28,85	30,2	50.4	26	13 AEROGERADO RES DE 2,0 MW	01/11/2011

Fonte: (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS, 2012).

Recentemente, o setor eólico tem recebido críticas com relação à sua geração abaixo do esperado e contratado. A razão disso é o fato de que à medida que a energia eólica passe a ter uma participação mais relevante na matriz nacional, é fundamental que o governo possa contar com a geração contratada a fim de que o país não sofra com a falta de capacidade de geração como já foi experimentado em situações passadas como a conhecida “Crise do Apagão” ocorrida entre os anos de 2001 e 2002. Com o objetivo de mitigar esse risco, a medida adotada pelo governo para os próximos leilões, tendo início com o Leilão de Energia de Reserva 2013 (LER-2013), consiste em que os projetos passarão a ser contratados com base na garantia física P90 que é o valor esperado de produção para o projeto com a probabilidade de 90% de que será superado. Isso significa que, a partir dessa medida, as incertezas decorrentes da qualidade técnica do estudo de potencial eólico da área serão consideradas no cálculo de produção do projeto.

A indústria eólica brasileira é relativamente nova e está se desenvolvendo em ritmo acelerado. Diante desse cenário, tem se percebido a falta de uma base acadêmica e técnica local adequada para dar o devido suporte aos processos de análise e desenvolvimento de novos projetos.

A avaliação mais importante a ser realizada no desenvolvimento de novos projetos é a determinação do potencial eólico de uma área. Este é um assunto que já foi vastamente estudado e existem metodologias bem fundamentadas para este

fim, porém, existem nuances na avaliação que muitas vezes não são bem controladas ou conhecidas e se refletem como incertezas na avaliação do recurso eólico. Um dos parâmetros de entrada que incorpora incerteza ao estudo é a definição da rugosidade superficial de uma região que é o principal parâmetro avaliado ao longo desse trabalho. Estas incertezas podem ser acentuadas devido ao fato de que os modelos computacionais utilizados no processo de estudo do projeto foram elaborados e validados em condições climáticas características das médias latitudes do hemisfério norte, que possui dinâmica atmosférica e biomas bem diferentes dos apresentados no nordeste do Brasil, por exemplo. O modelo computacional para determinação do fluxo eólico em uma região mais utilizado mundialmente é o WAsP<sup>®</sup> e por isso será a ferramenta de análise do trabalho em questão.

## 1.1 Objetivo e organização da dissertação

Este trabalho tem por foco a análise de sensibilidade e validação do modelo de rugosidade superficial do terreno no cálculo de estimativa de produção de energia de um projeto eólico. Além disso, o trabalho se propõe a apresentar o estado-da-arte no que diz respeito à determinação do potencial eólico de uma área, recomendar boas práticas de uso do modelo e determinar as incertezas inerentes à etapa de definição do modelo de rugosidade superficial de uma área, assim como avaliar o impacto causado pelo aumento das incertezas nesse processo de modelagem no que tange ao aspecto de rentabilidade desejada do projeto eólico.

Esta monografia está subdividida em cinco capítulos. No Capítulo dois são apresentados os conceitos físicos fundamentais necessários para o bom entendimento dos parâmetros que estão envolvidos no processo de avaliação do recurso eólico. O Capítulo três traz uma visão geral a respeito da principal metodologia para estimativa precisa do potencial eólico de uma área. Neste capítulo, ainda são apresentados os principais modelos matemáticos utilizados para descrever as mudanças de rugosidade. No quarto Capítulo desta monografia, estão descritos cinco estudos de caso realizados com a intenção de verificar a influência da variação da rugosidade em diferentes aspectos da avaliação do recurso eólico. Finalmente, no último capítulo são relatadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta as principais características dos regimes de vento em diversas escalas de tempo e espaço assim como alguns conceitos fundamentais para a compreensão das metodologias de avaliação do recurso eólico.

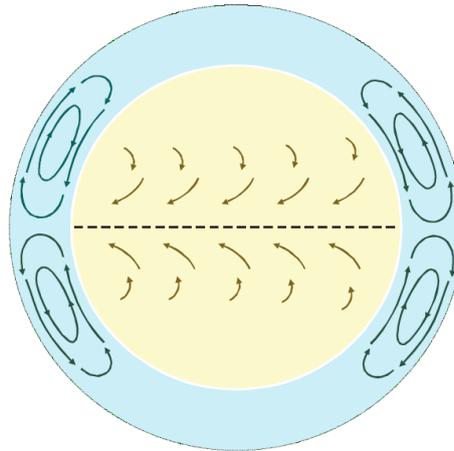
### 2.1 Circulação atmosférica

O vento é o evento meteorológico responsável por transportar a energia a ser utilizada nas turbinas eólicas. Para a execução da avaliação da produção de energia de uma central eólica, o conhecimento dos parâmetros eólicos, ou seja, das características do vento é de fundamental importância.

O vento é um fenômeno térmico, pode ser definido como atmosfera em movimento e origina-se devido à variação de temperaturas ao longo do globo terrestre associada à rotação planetária. Portanto, o sol é a fonte de energia primária deste processo. A quantidade de energia fornecida diariamente pelo sol à superfície terrestre, depois da reflexão sobre a atmosfera e antes de várias transformações térmicas e químicas, as quais transformam a entrada de energia solar de alta qualidade em calor de baixa qualidade está em torno de 100.000 TWh (JACKSON, 1992).

Por se tratar de um fenômeno térmico que tem no sol sua fonte primária de energia, considera-se o vento uma fonte renovável de energia. A energia eólica é, portanto, um aproveitamento da energia disponível na circulação das massas de ar. Existem vários modelos que explicam as movimentações das massas de ar no planeta em várias escalas.

**Figura 2 – Sistema de circulação atmosférica global: modelo de duas células**



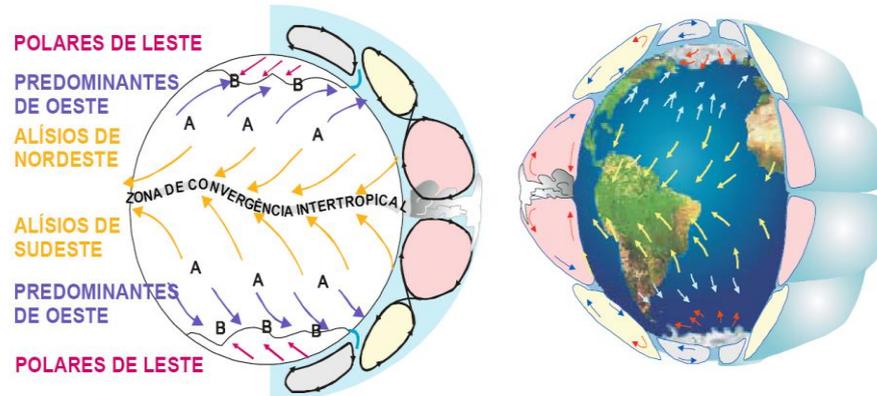
**Fonte: (VAREJÃO-SILVA, 2006).**

A circulação atmosférica é fenômeno determinante para o clima de uma região. Padrões de circulação gerados na atmosfera redistribuem calor, umidade e quantidade de movimento por todo o globo (VAREJÃO-SILVA, 2006).

O ar quente é menos denso que o ar frio e esta diferença faz com que as massas de ar tentem se equilibrar ao convergirem para uma temperatura única, gerando assim o seu movimento. O ciclo pode ser explicado da seguinte forma: o ar é aquecido nas regiões intertropicais, enquanto o ar dos polos está numa temperatura inferior, esta condição é suficiente para que haja movimentações de massas de ar e conseqüentemente a ocorrência de vento. Este modelo foi proposto por C. G. Rossby em 1941 e é conhecido como modelo de duas células. Uma representação esquemática pode ser vista na Figura 2.

Em um modelo mais representativo o movimento é mais complexo que o apresentado anteriormente. Durante o deslocamento da massa de ar quente que parte dos trópicos, antes que a mesma alcance um terço do caminho até os polos, uma boa parte da massa de ar já está suficientemente fria para causar um deslocamento reverso em direção à região central do globo. Este fenômeno se repete em outras regiões até que se complete o percurso total. Este mecanismo pode ser mais bem descrito pelo modelo de seis células apresentado na Figura 3.

**Figura 3 – Sistema de circulação atmosférica global: modelo de seis células**



**Fonte: (VAREJÃO-SILVA, 2006).**

Na Figura 3 é possível verificar que os ventos alísios de sudeste são a força motriz mais relevante, em escala global, para a geração eólica na região Nordeste do Brasil. Os ventos alísios de nordeste, procedentes do Hemisfério Norte, com os de sudeste, oriundos do Hemisfério Sul, convergem em superfície e formam a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A posição média da ZCIT é em torno de 5°N, o que é justificado por haver no Hemisfério Norte uma maior área continental e, portanto, maior transferência de calor para a atmosfera (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Além do vento gerado pela circulação de massas de ar em escalas globais (também chamado de circulações primárias ou circulação geral), há ainda as circulações secundárias e terciárias que influenciam fortemente as características eólicas em uma região específica.

As circulações secundárias, ou em mesoescala, de vento são causadas pelo aquecimento ou resfriamento da atmosfera inferior por diversos motivos. São exemplos de circulações secundárias: furacões, monções e ciclones extratropicais. Como exemplo, pode-se citar um importante ciclone extratropical permanentemente ativo na América do Sul, situado sobre o Chaco, cujo centro situa-se na posição média anual 29°S e 66°W, gerado por uma zona de baixa pressão. Esta zona de baixa pressão é causada pelo bloqueio da circulação geral da atmosfera imposto pelos Andes, e é acentuada pelo intenso aquecimento das planícies de baixa altitude da região. A combinação desse ciclone extratropical com o anticiclone tropical sul, zona de alta pressão sobre o Atlântico Sul, associada à circulação geral, já vista, resulta numa importante circulação de ar entre o anticiclone e o ciclone. Esse

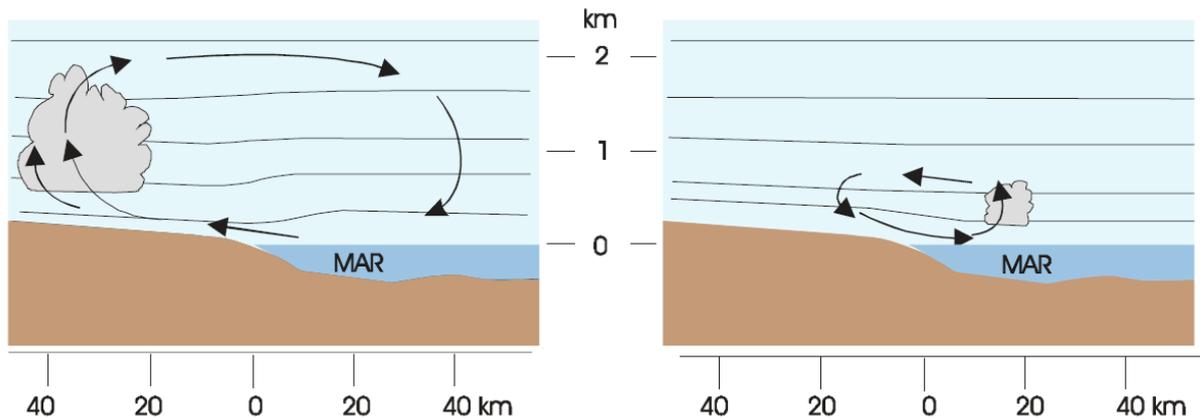
deslocamento de ar no Atlântico (alta pressão) para o Chaco (baixa pressão) forma o vento predominante no interior do Uruguai e do extremo Sul do Brasil, que sopra do sudeste e leste, sendo conhecido na região como vento Aragano (SILVA, 2006).

As circulações terciárias de vento, ou ventos regionais ocorrem em pequena escala, porém, tem uma grande importância na caracterização de ventos locais em uma área a ser avaliada com relação ao seu potencial eólico. Alguns exemplos de circulações terciárias são:

- a) Brisas marítima e terrestre;
- b) Ventos em vales e montanhas;
- c) Temporais;
- d) Tornados.

As brisas marítima e terrestre ocorrem em regiões costeiras devido à variação desigual de temperatura da área continental e oceânica. Como no Brasil, e especialmente na região Nordeste, a maior parte dos projetos eólicos se dá nesta região litorânea; este efeito é muito importante e deve ser bem compreendido. A Figura 4 ilustra a brisa marítima e terrestre. Durante o dia, o ar próximo à superfície terrestre absorve mais calor e se torna menos denso que o ar sobre a água, gerando assim um gradiente de pressão que impulsiona o deslocamento do ar no sentido água-terra. Durante a noite ocorre o inverso; a temperatura da terra se esfria rapidamente enquanto a água perde calor mais lentamente. Desta forma, a água se encontra mais aquecida que a terra e o gradiente de pressão se inverte, invertendo o sentido de deslocamento do ar. As brisas marítimas também podem ocorrer nas costas de grandes lagos. Em algumas regiões, é possível que o efeito de outras circulações se sobrepuje a este efeito tornando-o imperceptível ou mesmo inibindo-o.

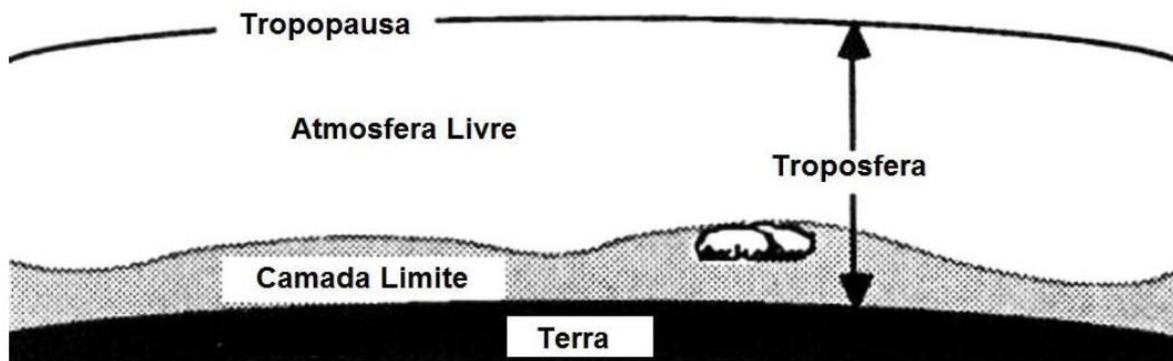
**Figura 4 – Brisas marítima (esquerda) e terrestre (direita)**



Secção vertical da atmosfera próximo à costa ilustrando o efeito de brisa em escala espacial causado pela formação de gradiente térmico. As linhas horizontais representam isóbaras esquemáticas e as setas traduzem a direção do vento. Fonte: (VAREJÃO-SILVA, 2006).

A principal região a ser estudada para fins de cálculos da produção de energia em centrais eólicas se constitui do primeiro quilômetro da atmosfera, principalmente os primeiros cem metros acima da superfície. Esta região é chamada de “camada limite atmosférica” e está representada na Figura 5. As características desta camada são abordadas na Seção 2.2.1.

**Figura 5 – Partes em que a troposfera está dividida**



Fonte: (Adaptada de Stull, 2000).

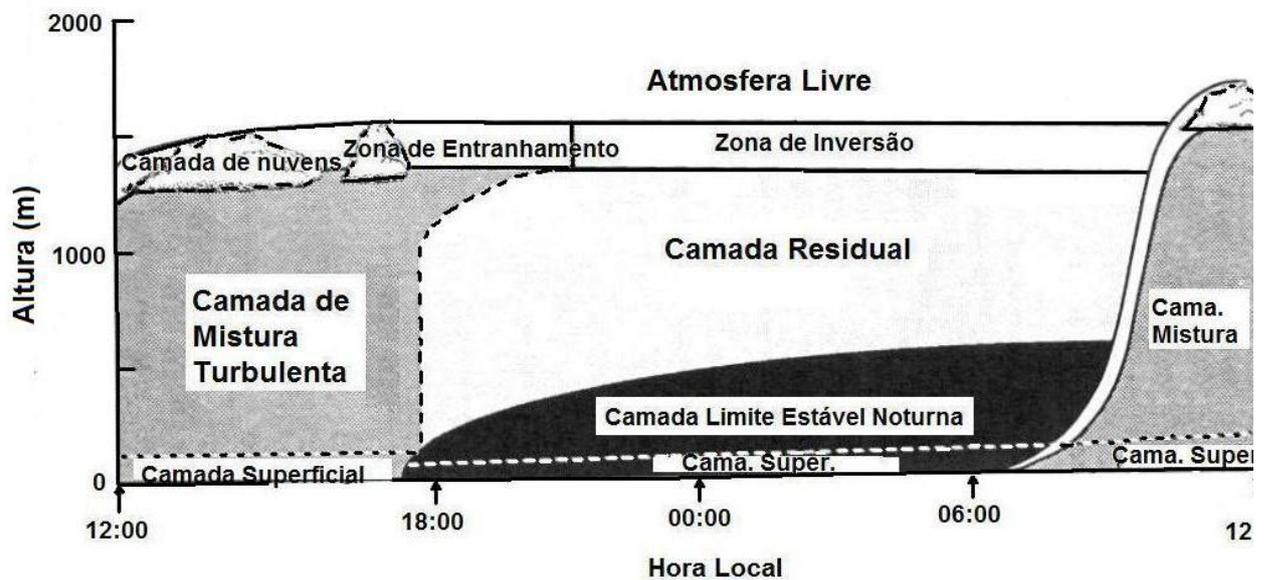
## 2.2 Camada limite atmosférica

O ciclo diário de aquecimento do planeta com o nascer e o pôr-do-sol é a fonte geradora de um ciclo diário de fluxo de calor sensível e latente entre a terra e o ar. De acordo com a interação que a superfície terrestre provoca no movimento do ar, pode-se dividir a troposfera em duas regiões (STULL, 2000):

- a camada limite planetária, justaposta à superfície terrestre, cuja rugosidade<sup>2</sup> natural afeta profundamente o escoamento do ar;
- e a atmosfera livre, mais acima, em que se admite que o escoamento não sofre a influência direta da presença da superfície (escoamento sem atrito).

A espessura da camada limite planetária vai depender, dentre outros fatores, do grau de aspereza da superfície e da própria velocidade do ar que sobre ela escoava.

Figura 6 – Evolução diária da camada limite sobre uma região de alta pressão



Fonte: (Adaptada de Stull, 2000).

<sup>2</sup> Característica do solo que define a intensidade com que o mesmo interfere na velocidade de vento. Esta característica está relacionada com tipo de cobertura (vegetação, areia entre outros) do solo e será amplamente discutida neste trabalho.

Visando facilitar o estudo dos diversos efeitos envolvidos, a camada-limite planetária é normalmente dividida em três subcamadas: a subcamada laminar, a camada limite superficial e a camada de Ekman (VAREJÃO-SILVA, 2006).

## **2.2.1 Estrutura da camada limite atmosférica**

### **2.2.1.1 A subcamada laminar**

Camada com, no máximo, poucos milímetros de espessura, onde o escoamento é lento e tipicamente laminar. Basicamente irrelevante para os estudos de energia eólica.

### **2.2.1.2 A camada limite superficial**

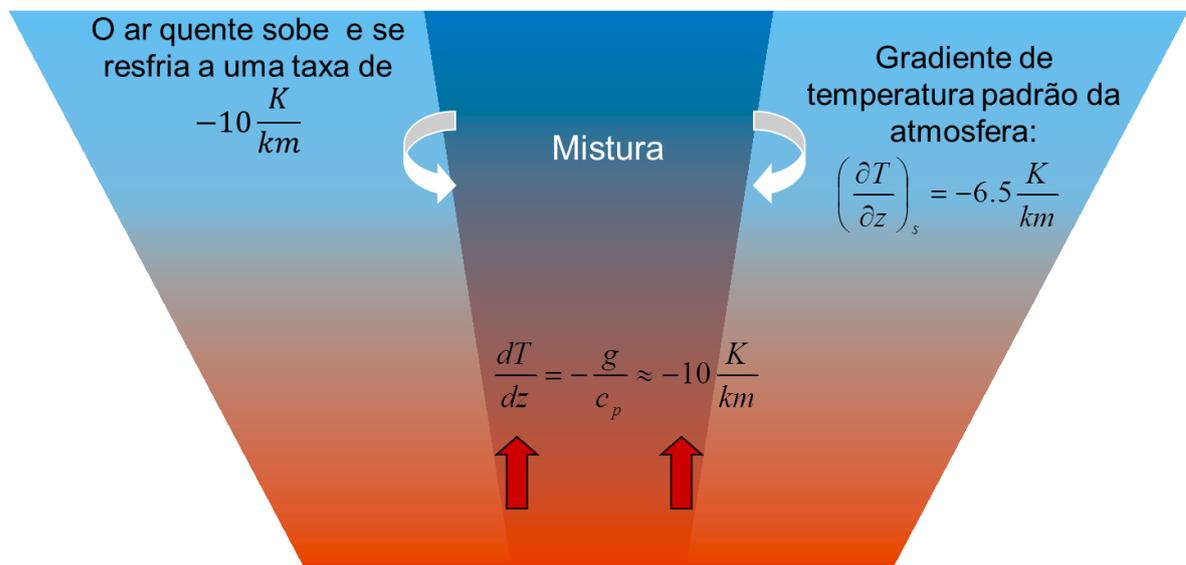
A espessura desta camada não excede aos 150 metros. O vento nesta região é a variável atmosférica mais importante nos estudos de energia eólica. Durante os últimos cem anos, várias pesquisas contribuíram para o melhor conhecimento dos processos que ocorrem nessa camada o que acabou sendo bastante útil para o melhor desenvolvimento da tecnologia de geração de energia através do vento. Nessa camada as componentes da velocidade do ar, em cada nível, apresentam intensas variações em todas as escalas temporais (segundos, minutos, etc.) e espaciais (cm, m, etc.). Tais variações estão relacionadas à presença de vórtices que caracterizam o estado turbulento do ar (BURTON, 2001).

A turbulência atmosférica é muito eficiente em difundir vapor d'água, calor, poluentes etc. e resulta da ação combinada de duas contribuições: da agitação mecânica do ar e da convecção. A agitação mecânica advém do atrito do ar com a superfície, aumenta com a velocidade do vento e é normalmente referida como turbulência mecânica. A convecção é consequência do aquecimento do ar em contato com a superfície originando fluxos verticais ascendentes (quentes) e subsidentes (frios) conforme mostrado na Figura 7. Esse fenômeno é bastante

importante para determinar o fluxo de vento em uma região e será abordado com mais detalhes na Seção 2.2.4.

A turbulência mecânica é predominante nas proximidades da superfície enquanto que, à medida que a altura aumenta, a convecção se torna a principal causa de turbulência. Na camada limite superficial, portanto, a “estrutura do vento” é condicionada pelas características da superfície e pelo gradiente vertical de temperatura do ar (VAREJÃO-SILVA, 2006).

**Figura 7 – Fenômeno de convecção térmica atmosférica**



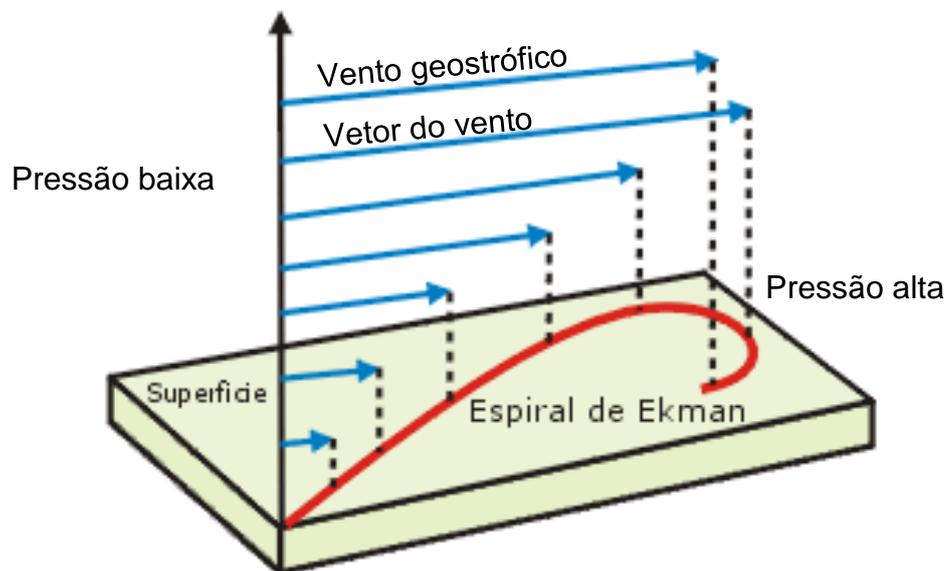
Fonte: O autor

### 2.2.1.3 A camada de Ekman

Situada logo acima da camada limite superficial encontra-se a camada de Ekman. Serve como interface entre a porção inferior (turbulenta) e a atmosfera livre (BLACKADAR e TENNEKES, 1968). Sobre o oceano, seu limite superior, quase sempre, oscila entre 500 e 1000 metros de altura. Sobre o continente, em situações de vento muito forte e dependendo da topografia, pode alcançar 3000 metros.

Nesta camada a influencia da superfície é menor e não se podem desprezar as influências da aceleração de Coriolis (exceto próximo à linha do Equador) do gradiente de pressão e tampouco da convecção. O vento aumenta de velocidade com a altura e muda gradualmente de direção, formando uma estrutura que é comumente conhecida como espiral de Ekman conforme apresentado na Figura 8 (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Figura 8 – Espiral de Ekman do vento no hemisfério norte



Fonte: Adaptado de (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, 2005).

### 2.2.2 Modelagem atmosférica

O estado da atmosfera é bem descrito por sete variáveis: pressão, temperatura, massa específica, umidade, duas componentes horizontais de velocidade e uma componente vertical de velocidade; todas as variáveis são função do tempo e do espaço. O comportamento dessas sete variáveis é governado por sete equações: a equação de estado, a primeira lei da termodinâmica, três componentes da segunda lei de Newton e as equações de continuidade para a massa e vapor d'água. Estas equações são relações matemáticas entre cada variável atmosférica e seus respectivos derivativos no tempo e espaço. A solução dessas equações pode ser feita numericamente após assumir condições de contorno que simplifiquem o modelo.

A atmosfera contém escalas de movimentações variando da ordem de 1 milímetro a milhares de quilômetros. O ideal seria que os modelos matemáticos fossem construídos com resolução espacial e temporal de 1 milímetro e frações de segundos, respectivamente. Obviamente, isto não é possível na prática e por isso os modelos são construídos baseados na escala predominante em que ocorrem os fenômenos de interesse estudados. Assim, por exemplo, existem modelos para circulações locais como as brisas marítimas, para estudar as variações climáticas no Brasil ou no planeta como um todo. Dependendo do sistema que está sendo modelado, as equações podem ser simplificadas. Para estudos de energia eólica, o ponto de partida é o modelo mais simples de movimentação atmosférica: vento constante em uma grande planície sob o céu nublado ou, em outras palavras, um fluxo de vento em regime permanente sob uma superfície plana de rugosidade uniforme com estratificação neutra. Neste caso, o único parâmetro a ser estudado é a variação do vento com a altura. Adotando algumas aproximações físicas válidas para simplificar o modelo em questão, é possível obter o perfil logarítmico do vento, que é determinado por apenas três variáveis: a altura do solo, o comprimento de rugosidade e a velocidade de fricção. O comprimento de rugosidade parametriza a rugosidade do solo e a velocidade de fricção parametriza as forças friccionais entre o ar em movimento e o solo (PETERSEN, MORTENSEN, *et al.*, 1998).

A partir deste primeiro modelo simplificado em um plano infinito, o próximo passo é considerar o movimento de rotação da terra. Muito distante do solo, a

atmosfera não pode sentir os efeitos da fricção e o fluxo está em equilíbrio com as forças de pressão e a força de Coriolis<sup>3</sup>. O vento resultante deste balanço é chamado de vento geostrófico. Quanto mais próximo da superfície, o vento tem sua velocidade reduzida até atingir velocidade nula na altura do comprimento de rugosidade. Ao mesmo tempo, a direção do vento sofre uma mudança no sentido anti-horário no hemisfério norte e no sentido horário no hemisfério sul (PETERSEN, MORTENSEN, *et al.*, 1998).

### **2.2.3 Perfil vertical da velocidade do vento na camada limite superficial em condições de estabilidade neutra**

Para os estudos de energia eólica, é fundamental conhecer o melhor possível como ocorre a difusão de propriedades físicas do ar (especificamente de massa, calor e quantidade de movimento) na camada limite superficial. Sendo assim, é necessário estabelecer perfis de velocidade do vento, isto é: conhecer a variação da velocidade do vento com a altura.

É evidente que a dispersão de massa (poluentes, vapor d'água etc.) ou de calor na atmosfera, por exemplo, será tanto mais rápida quanto maior a turbulência do ar que se encontra em contato com a fonte dessas propriedades. O conceito de turbulência está muito associado ao de eficiência de mistura e troca de energia. Isto indica que, quanto maior for o gradiente vertical de velocidade do ar, mais intensa será a turbulência.

A construção de curvas da velocidade média do vento (referente a um intervalo de tempo pequeno) em função da altura leva à obtenção de perfis semelhantes ao da Figura 9. A análise dessas curvas indica que a velocidade média do vento ( $u$ ) aumenta com a altura ( $z$ ) rapidamente junto à superfície e mais lentamente à medida que  $z$  cresce. Isso significa que o gradiente vertical da velocidade média do vento ( $\partial u/\partial z$ ) diminui com a altura. Ao tomar o logaritmo da

---

<sup>3</sup> A Força de Coriolis é uma força virtual causada pela rotação da terra. Ela age perpendicularmente à direção do vento, assim, se não existe vento também não existe a força de Coriolis. Esta força apenas age alterando a direção do vento, não afetando a intensidade com que o mesmo sopra.

altura, a representação do gradiente é uma reta cuja declividade é dada por  $\partial u / \partial (\ln z)$ . Essa razão é uma constante (específica de cada perfil) com dimensões de velocidade (VAREJÃO-SILVA, 2006).

$$\partial u / \partial (\ln z) = B \quad [2.1]$$

Integrando-se a equação 2.1, obtém-se:

$$u = B \ln(z/z_0) \quad [2.2]$$

O parâmetro  $z_0$  é denominado de comprimento de rugosidade. É um parâmetro sempre positivo e representa a altura abaixo da qual a velocidade do vento é nula. Geometricamente, exprime a ordenada do ponto de interseção entre a reta  $\partial u / \partial (\ln z)$  e o eixo vertical ( $y = \ln z$ ), conforme pode ser observado na Figura 9. Fisicamente, o parâmetro  $z_0$  possui, em geral, uma ordem de magnitude menor que a da altura real da rugosidade da superfície.

O perfil do vento sugere a existência de uma força de arrasto atuando entre o ar e a superfície. Essa relação causa uma tensão, aqui denominada tensão de cisalhamento na superfície do solo. Como o ar é um fluido, é mais fácil exprimir essa tensão em função da massa específica do ar conforme a Equação 2.3 (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Figura 9 – Perfil de velocidade ( $u$ ) do vento sobre superfície não vegetada

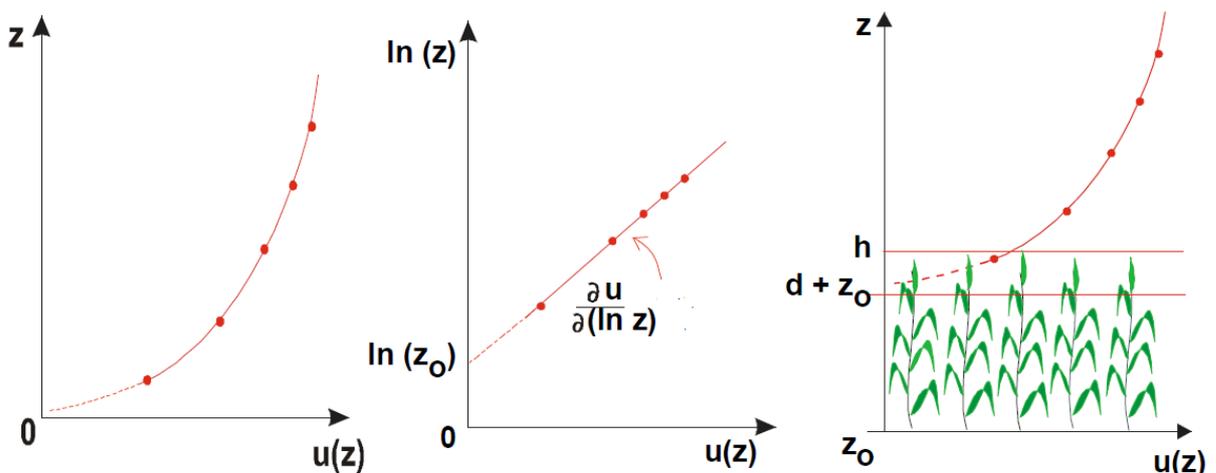


Gráfico com escala vertical linear à esquerda e logarítmica no centro. À direita o perfil com vegetação de altura  $h$ . Fonte: (VAREJÃO-SILVA, 2006)

$$\tau = \rho U^*{}^2 \quad [2.3]$$

onde:

- $\tau$  = tensão de cisalhamento na superfície do solo [Pa];  
 $\rho$  = massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>];  
 $U^*$  = velocidade de fricção [m/s]

A velocidade de fricção é um conceito pouco intuitivo, mas está relacionado com a rapidez com que se processa a transferência de quantidade de movimento para a superfície. Como consequência,  $U^*$  também é uma grandeza profundamente relacionada à eficiência com que se processa a difusão vertical turbulenta de propriedades físicas (calor, vapor d'água, poluentes etc.) geradas na interface superfície-atmosfera. Em resumo, quanto maior a transferência de quantidade de movimento da atmosfera para a superfície, maior a transferência vertical turbulenta de calor e massa. Valores típicos para a velocidade de fricção variam desde  $U^* = 0$  durante os períodos de ventos baixos, até  $U^* = 1$  m/s durante ventos fortes. Condições de vento moderado estão associadas a uma velocidade de fricção em torno de  $U^* = 0,5$  m/s (STULL, 2000).

Descrever matematicamente o perfil vertical da velocidade do vento não é simples devido ao fato de ser necessário incorporar a interação turbulenta no modelo. Sendo assim, a adoção de algumas hipóteses restritivas são necessárias a fim de permitir a elaboração de modelos capazes de gerar alguma informação útil. Dentre as muitas hipóteses normalmente assumidas, admite-se que a velocidade de fricção é proporcional à constante (B) que aparece na Equação 2.2

$$U^* = B/K \quad [2.4]$$

O fator de proporcionalidade  $K = 0,4$  é obtido através de experimentos em túneis de vento e na atmosfera e se chama constante de von Kármán (BURTON, 2001). Essa hipótese, porém, só é rigorosamente válida quando a atmosfera se encontra em equilíbrio neutro (VAREJÃO-SILVA, 2006). Em tais circunstâncias, o perfil vertical de velocidade é dado por:

$$u = (U^*/K) \ln(z/z_0) \quad [2.5]$$

O modelo matemático da variação da velocidade do vento com a altura dentro da camada limite atmosférica também pode ser realizado através de um perfil exponencial, conhecido por lei da potência, como expresso na Equação 2.6 (AWS, 1997):

$$v_2 = v_1 \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad [2.6]$$

onde:

- $h_1$  = altura acima do solo 1 [m];
- $h_2$  = altura acima do solo 2 [m];
- $v_1$  = velocidade do vento no ponto 1 [m/s];
- $v_2$  = velocidade do vento no ponto 2 [m/s];
- $\alpha$  = expoente de potência no local [adimensional].

O expoente  $\alpha$  é diferente do comprimento de rugosidade  $z_0$  e varia de 0,06 para locais lisos, como o mar, até 0,6 para locais com alta rugosidade, como cidades. Este método foi desenvolvido por Hellman (1915) e, mesmo se tratando de uma aproximação, é vastamente usado para análises preliminares por apresentar uma precisão satisfatória para este tipo de avaliação (BURTON, 2001). A Tabela 3 mostra exemplos de terrenos e seus respectivos expoentes de potência usados na lei da potência.

**Tabela 3 – Valores aproximados para o expoente de potência em alguns terrenos típicos**

Terreno	$\alpha$
Subúrbios	0,32
Plantações	0,19
Campos	0,13
Áreas com neve	0,1

Fonte: (ROHATGI e NELSON, 1994)

#### 2.2.4 Estabilidade atmosférica

Para compreender melhor algumas hipóteses assumidas para o desenvolvimento dos modelos computacionais atmosféricos e suas limitações, é importante introduzir nesta altura o conceito de estabilidade atmosférica. Sua relevância está no fato de que é um dos parâmetros de entrada para a modelagem do fluxo eólico de uma região. Será feita uma abordagem superficial e com foco na compreensão física dos fenômenos para não estender muito o texto e facilitar a compreensão.

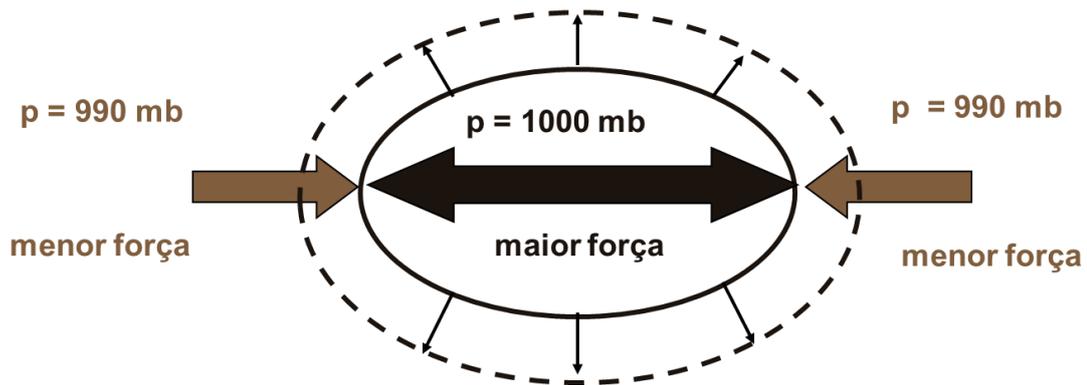
Estabilidade atmosférica está associada com a tendência das parcelas de ar se deslocar verticalmente. Quando a temperatura da parcela de ar é maior que a temperatura do ambiente ao seu redor, ela irá subir, e quando a temperatura da parcela de ar é menor que a temperatura do ambiente ao seu redor, ela irá afundar na atmosfera.

O Gradiente Vertical de Temperatura Ambiente (GVTA) é a taxa com que a temperatura medida do ar no ambiente fora da parcela de ar decresce com a altura. Balões com instrumentos de medição (*radiossondas*) são lançados diariamente ao redor do mundo para medir a temperatura em diferentes níveis acima da superfície terrestre a fim de determinar o GVTA (PIERCE COLLEGE, 1999).

Na natureza, existe uma grande variabilidade na taxa com que a temperatura varia com a altitude, mas considerando a Atmosfera Padrão Internacional o gradiente considerado é de  $0,66^{\circ}/100$  m (note-se que este gradiente raramente ocorre na natureza, o que explica a necessidade de lançar balões diariamente para coletar medições reais) (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2002).

Outro conceito importante é o de Gradiente Adiabático Seco (GAS). Os meteorologistas assumem que uma parcela de ar insaturado (isto é: ar sem nuvens) muda de temperatura em um processo adiabático (em que não há transferência de calor saindo ou entrando no sistema) à medida que essa parcela se desloca verticalmente na atmosfera. O GAS é a taxa com que uma parcela de ar se resfria à medida que essa sobe.

Figura 10 – Diagrama esquemático de forças em uma parcela de ar na atmosfera



A linha tracejada indica as condições sentidas pela parcela de ar após a mesma haver se deslocado para um nível mais alto (de menor pressão).

Fonte: O autor.

É óbvio que a pressão reduz com a altura tendo em vista que essa variável é dependente da massa de ar que está sobre determinado ponto de referencia. O ar resfria enquanto sobe porque, temporariamente, essa parcela de ar possui uma pressão maior que as suas moléculas vizinhas. Isso significa que uma força maior é exercida da parcela de ar que se deslocou em comparação com a força exercida pelo ar ambiente, assim, a parcela se expande. A Figura 10 exemplifica o processo.

A fim de que a parcela de ar possa se expandir ela precisa deslocar (empurrar) as moléculas vizinhas. Assim, as moléculas dentro dessa parcela precisam gastar parte de sua energia interna para realizar esse trabalho. Sendo que a temperatura é função da energia interna, quando a energia interna diminui, então a temperatura diminui. Assim, a parcela de ar se expande e resfria. Esse processo é chamado de resfriamento adiabático.

A energia transferida nesse processo é considerada insignificante do ponto de vista da atmosfera. De fato a energia interna da parcela de ar comprimiu e aqueceu a atmosfera em algum nível, mas nós não notamos devido a essa variação ser tão pequena. Por isso o processo é chamado de processo adiabático, mesmo existindo transferência de energia do sistema.

Usando a primeira lei da termodinâmica e algumas aproximações, é simples provar matematicamente que o GAS é aproximadamente igual a  $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ . Isso significa que uma parcela de ar insaturado, se deslocando verticalmente em um processo adiabático seco (que é o caso quando estamos falando de deslocamento vertical forçado) se resfriará em  $1^{\circ}\text{C}$  a cada 100 metros que a mesma subir. Da

mesma forma, uma parcela de ar que esteja afundando na atmosfera em um processo adiabático seco irá aquecer em  $1^{\circ}\text{C}$  a cada 100 metros que a mesma descer (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2002).

As nuvens são formadas quando o ar sobe na atmosfera e é resfriado até atingir a saturação. Assim, estabilidade do ar determina a probabilidade de formação de nuvens, assim como o tipo de nuvem que irá se formar.

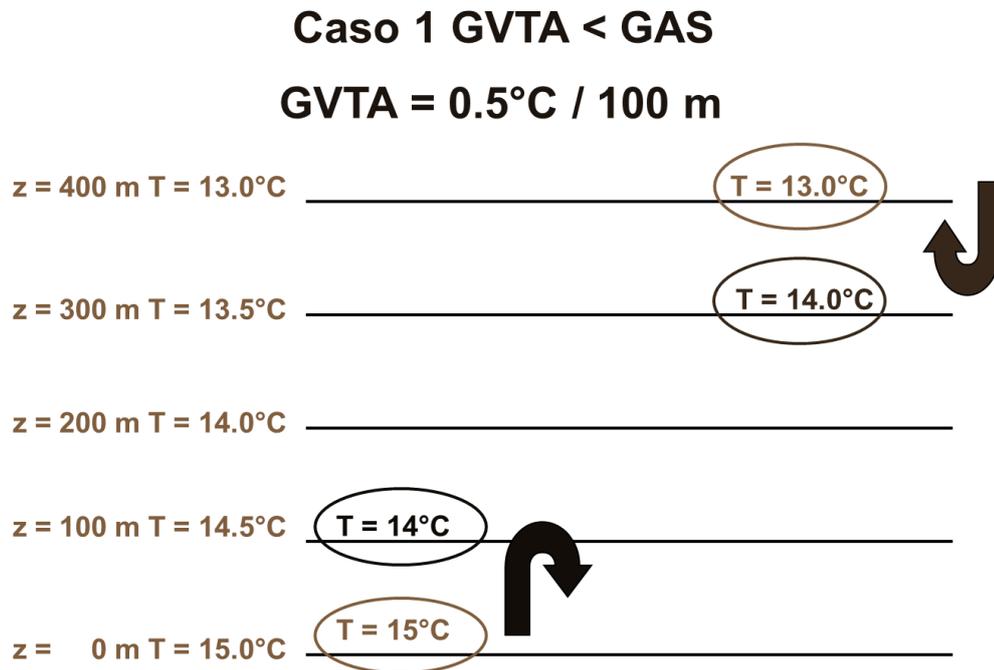
A fim de determinar e classificar a estabilidade atmosférica o GVTA é comparado com o GAS conforme será detalhado na próxima seção.

#### **2.2.4.1 Atmosfera Estável**

Qualquer atmosfera onde o GVTA seja menor que o GAS, é considerada uma atmosfera estável. A Figura 11 exemplifica o fenômeno. Considerando um  $\text{GVTA} = 0,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , quando uma parcela de ar for forçada a subir na atmosfera em 100 metros ela resfriará em  $1^{\circ}\text{C}$ . Nesse instante a temperatura das moléculas vizinhas é maior e, portanto, a massa específica é menor fazendo com que a parcela de ar volte a afundar até atingir uma situação de equilíbrio. Comportamento similar ocorre se a parcela é forçada a descer na atmosfera. Ao descer 100 metros a mesma aquece em  $1^{\circ}\text{C}$  e, portanto, está momentaneamente mais quente que sua vizinhança. Assim, essa parcela de ar tenderá a voltar a sua posição inicial a fim de atingir o equilíbrio.

Essa situação é chamada de estável porque o ar não possui tendência a se deslocar verticalmente. Parcelas de ar em uma atmosfera estável tendem a retornar à sua posição inicial. Existe pouca mistura vertical quando o ar é estável, assim a qualidade do ar tende a ser pior em condições de estabilidade atmosférica. A atmosfera é estável mais frequentemente no período da noite quando o resfriamento da superfície da terra diminui o GVTA.

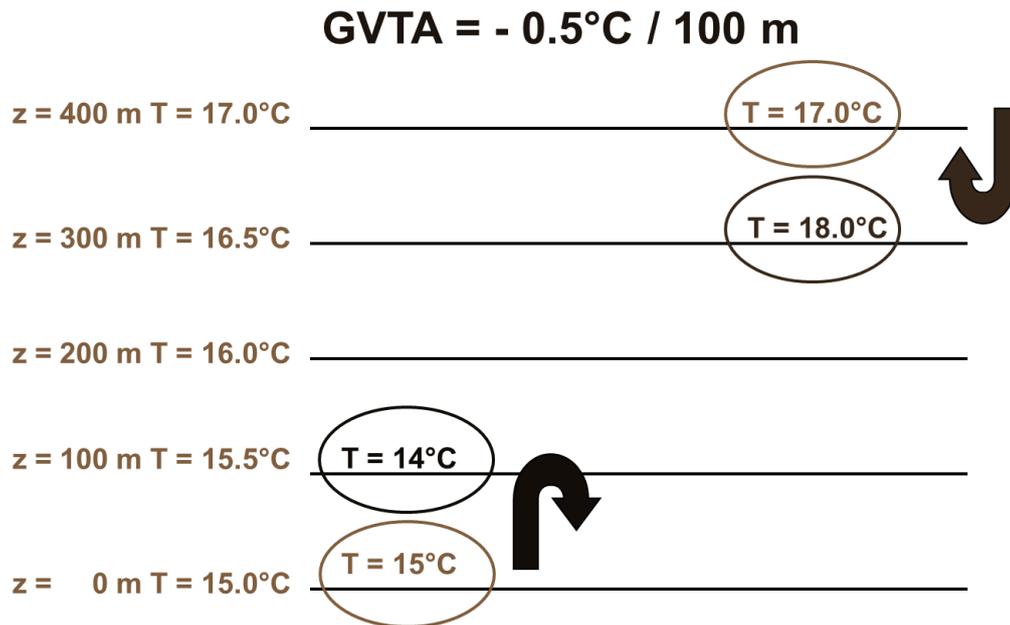
Figura 11 – Diagrama esquemático de uma atmosfera estável



Fonte: O autor.

Quando a temperatura do ar ambiente aumenta com a altura, que é o oposto do padrão normalmente observado na troposfera, ocorre um fenômeno denominado de inversão térmica. Esse fenômeno é um caso de atmosfera extremamente estável. Um diagrama esquemático pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 – Diagrama esquemático para um caso de inversão térmica



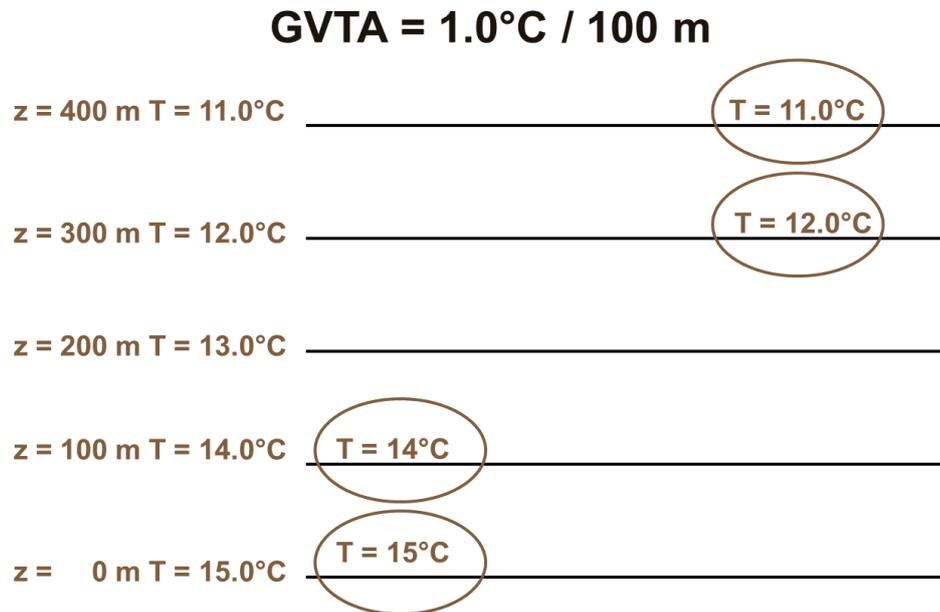
Fonte: O autor.

#### 2.2.4.2 Atmosfera Neutra

Essa condição atmosférica é denominada de neutra porque não causará movimentações de ar verticalmente de forma espontânea. Apenas diante de forças externas o ar será deslocado verticalmente nessas condições.

A atmosfera é neutra quando o GVTA do ar insaturado é igual ao GAS. Essa condição normalmente ocorre nas primeiras horas da manhã e ao anoitecer. A Figura 13 apresenta um diagrama exemplificando o fenômeno.

Figura 13 – Diagrama esquemático para atmosfera neutra



Fonte: O autor.

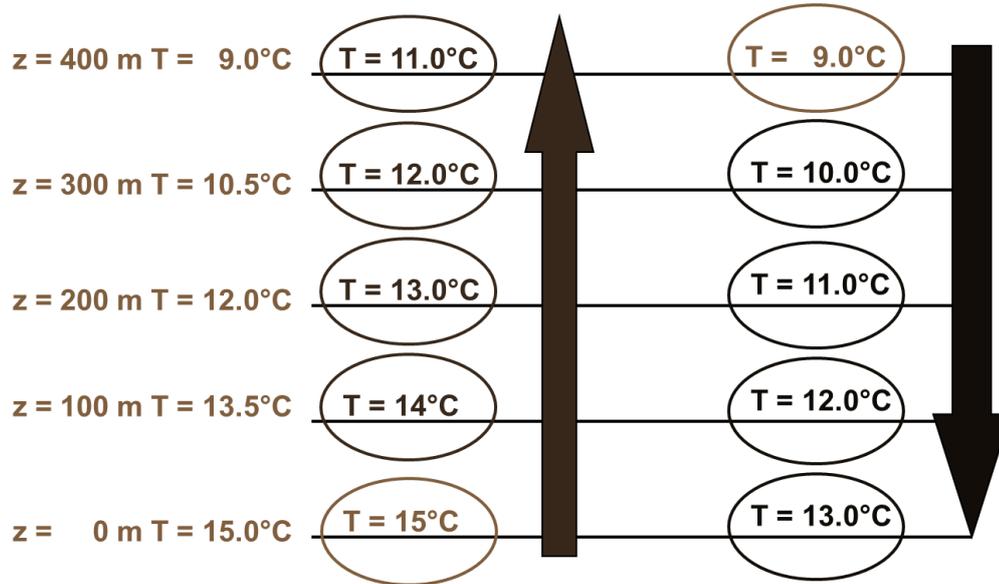
### 2.2.4.3 Atmosfera Instável

Essa situação é chamada de instável porque quando o ar é deslocado verticalmente, ele tende a continuar se movendo na mesma direção. O ar insaturado é instável quando o GVTA é maior que o GAS. Nessas condições existe muita mistura mecânica devido a todos os movimentos verticais que ocorrem com as parcelas de ar subindo e descendo.

Condições de instabilidade atmosférica são atingidas, normalmente, durante a tarde quando a radiação solar é absorvida pela superfície da terra e o GVTA aumenta.

A qualidade do ar é, geralmente, melhor quando o ar é instável devido à maior mistura e dispersão dos gases que ocorre nessas condições. A Figura 14 apresenta um diagrama ilustrando o fenômeno.

Figura 14 – Diagrama esquemático para uma atmosfera instável



Fonte: O autor.

Podemos resumir as distintas condições de estabilidade atmosférica como se segue (UTAH STATE UNIVERSITY, 2008):

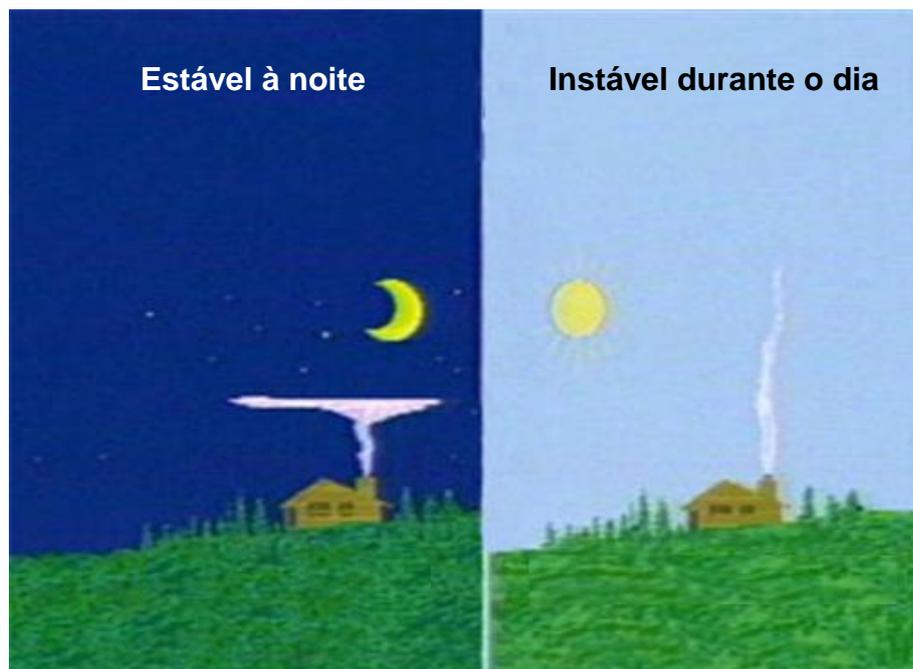
- Muito estável: a temperatura aumenta com o aumento da altitude. Este é um gradiente de temperatura positivo e caracteriza a condição de inversão térmica.
- Estável: o gradiente vertical de temperatura ambiente (GVTA) é menor que o gradiente adiabático seco (GAS), porém, a temperatura decresce com a altitude.
- Neutra: o GVTA coincide com o GAS. Nesse caso a cada 100 metros de incremento na altura, a temperatura irá reduzir em 1°C.
- Instável: o GVTA é maior que o GAS. Uma atmosfera onde o a temperatura do ar decresce 1,1°C a cada 100 metros já é considerada instável.

#### 2.2.4.4 Fatores que causam variação nas condições de estabilidade atmosférica

O fator mais importante para a variação nas condições de estabilidade atmosférica é o aquecimento e resfriamento da superfície terrestre.

À medida que anoitece, a terra vai perdendo sua principal fonte de calor por radiação e passa a resfriar. Como consequência, ar em contato com o solo também resfria. Esse processo continua durante a noite aumentando essa camada de ar fria. Noites com céu nublado tornam a formação da camada fria mais lenta. Em tais condições, parcelas de ar que sejam forçadas a subir, como fumaça, irão estacionar assim que elas alcançarem a camada de ar mais quente conforme está ilustrado na Figura 15. As condições começarão a se reverter após o nascer do sol. A energia radiativa que atinge a terra aquece o solo que passa a aquecer o ar em contato por condução e convecção. A camada inferior estável aquece até que não esteja mais fria que a camada de ar superior, assim, o GVTA se aproxima do GAS. Normalmente, o processo está totalmente revertido por volta do meio-dia e as condições de instabilidade continuam a se desenvolver ao longo do período de insolação.

**Figura 15 – Aquecimento e resfriamento da superfície terrestre**



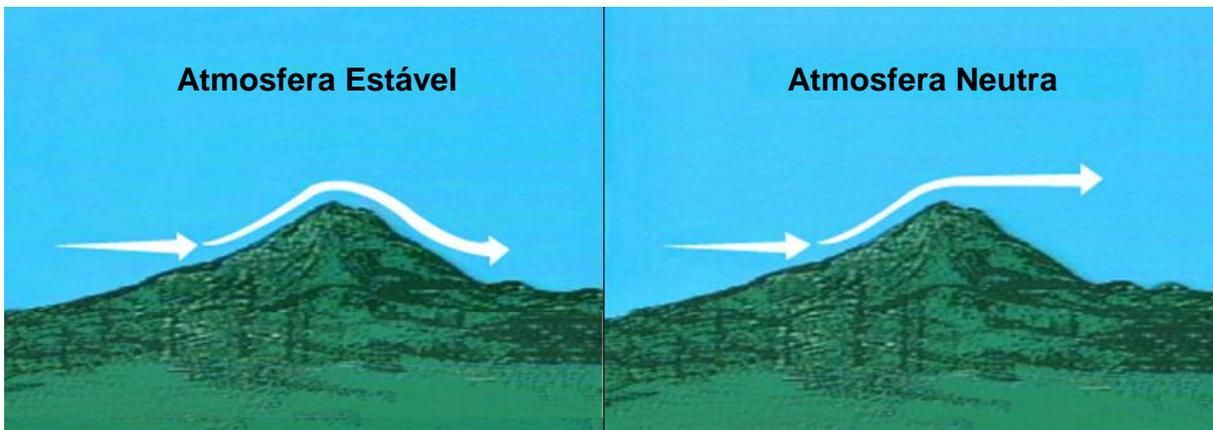
Fonte: (Adaptada de Utah State University, 2008).

### 2.2.4.5 Movimentações verticais de ar na atmosfera

Conforme já foi mencionado, em uma atmosfera estável uma parcela que é forçada verticalmente encontra uma força resistindo a esse movimento. Assim, se uma parcela de ar que se move horizontalmente é forçada verticalmente, como ao passar por uma montanha, essa parcela tenderá a voltar ao seu nível original. Se a atmosfera é neutra, uma parcela de ar que sofre um deslocamento vertical passará a ter a mesma massa específica das partículas ao redor, assim, não tenderá nem a descer ou mesmo a continuar subindo. Esse fenômeno está ilustrado na Figura 16.

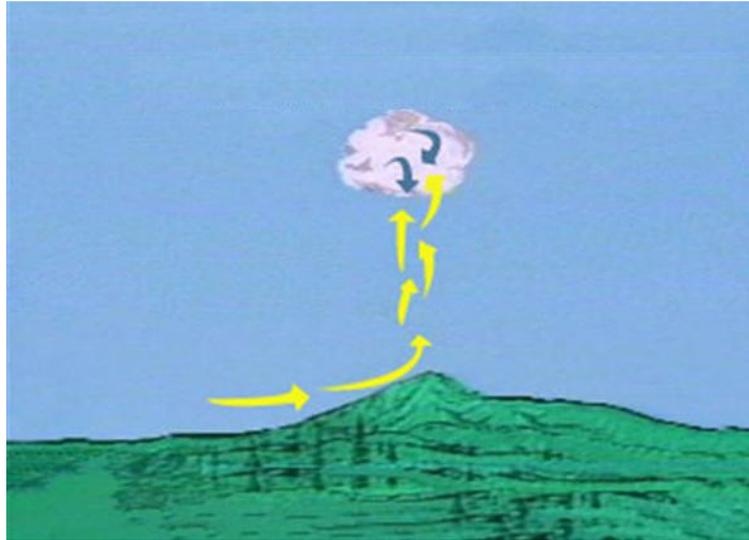
Se a atmosfera é instável, qualquer parcela de ar que é forçada verticalmente tenderá a continuar se deslocando até atingir um nível em que sua temperatura se iguale ao das partículas ao seu redor. À medida que a parcela de ar sobe ela se resfria aumentando sua umidade relativa. Caso essa partícula se resfrie o suficiente para atingir a saturação, ela atingirá o ponto de orvalho que é a condição necessária para a formação de nuvens. A Figura 17 ilustra esse fenômeno.

Figura 16 – Deslocamento vertical do ar em diferentes condições atmosféricas



Fonte: (Adaptada de Utah State University, 2008).

**Figura 17 – Deslocamento vertical do ar em atmosfera instável**



Fonte: (Adaptada de Utah State University, 2008).

#### **2.2.4.6 Indicadores visuais de estabilidade atmosférica**

Determinar numericamente as condições de estabilidade atmosférica requer medição de temperatura em vários níveis. O custo para instrumentar uma torre para esse fim pode ser relativamente alto. No entanto, em muitos casos é possível descrever qualitativamente as condições de estabilidade baseando-se em indicadores visuais como os que serão descritos aqui. A Figura 18 apresenta alguns indicadores visuais de estabilidade atmosférica.

**Figura 18 – Indicadores visuais de estabilidade atmosférica**



**(a)**



**(b)**



**(c)**



**(d)**

**(a) Nuvem Estratiforme, (b) Coluna de fumaça não sobe com facilidade, (c) Neblina e (d) Nevoeiro.**

**Fonte: (UTAH STATE UNIVERSITY, 2008).**

É importante frisar que em muitos casos a visibilidade limitada ou mesmo o fato de coexistirem condições de estabilidade e instabilidade atmosférica em regiões próximas podem confundir o observador levando-o a uma conclusão errônea. Assim, a presença dos indicadores aqui mencionados não deve ser considerada como determinante das condições de estabilidade apesar de quase sempre serem eficazes para uma verificação qualitativa. A Figura 19 apresenta alguns indicadores visuais de instabilidade atmosférica.

**Figura 19 – Indicadores visuais de instabilidade atmosférica**



**(a)**



**(b)**



**(c)**



**(d)**

**(a) Coluna de fumaça sobe facilmente, (b) Nuvens cumuliformes, (c) Boa visibilidade e (d) Redemoinhos de poeira. Fonte: (UTAH STATE UNIVERSITY, 2008).**

Em geral, condições de estabilidade favorecem ventos mais uniformes e constantes enquanto que condições de instabilidade promovem ventos com maior incidência de rajadas.

## **2.3 Rugosidade do solo**

A rugosidade do terreno é uma forma quantitativa de expressar a influência da superfície do terreno e dos obstáculos presentes neste, na diminuição da velocidade de vento, alterando o seu comportamento em função da altura. É importante ressaltar que nem todos os elementos topográficos contribuem para a rugosidade. Vegetações e construções são exemplos de elementos de rugosidade, enquanto que longos morros lisos, por exemplo, não são, porque não provocam aumento da turbulência. A rugosidade de uma determinada superfície é definida pelo tamanho e distribuição dos elementos de rugosidades que a mesma contém. O parâmetro utilizado para mensurar essa rugosidade é o comprimento de rugosidade ( $z_0$ ), que por definição é a altura em que a velocidade média do vento é nula, considerando que o perfil do vento tem uma variação logarítmica com a altitude (WASP, 2007).

### **2.3.1 Determinação do comprimento de rugosidade**

#### **2.3.1.1 Estimativa do comprimento de rugosidade a partir de medições em duas alturas**

Em condições de estratificação neutra da atmosfera é possível determinar o comprimento de rugosidade superficial através de medições de velocidade do vento em duas alturas. Para aplicar este método, recomenda-se que apenas velocidades do vento superiores a 6 m/s sejam consideradas na análise a fim de garantir uma boa mistura mecânica. Além disso, na direção em que o vento sopra não deve existir grandes obstáculos ou mudanças significativas de rugosidade, caso contrário não será possível modelar um perfil vertical uniforme.

Sejam  $u_1$  a velocidade do vento na altura  $z_1$  e  $u_2$  a velocidade do vento na altura  $z_2$ , aplicando estas condições no perfil logarítmico do vento dado na Equação 2.5 obtemos:

$$u_1 \ln(z_2) - u_1 \ln(z_0) = u_2 \ln(z_1) - u_2 \ln(z_0) \quad [2.7]$$

do que resulta em:

$$\ln(z_0) = \frac{u_1 \ln(z_2) - u_2 \ln(z_1)}{u_1 - u_2} \quad [2.8]$$

Em (LETTAU, 1969) pode ser encontrada uma relação empírica entre os elementos de rugosidade e o comprimento de rugosidade que foi bastante aplicado em estudos de energia eólica. Assim, o comprimento de rugosidade é estimado pela equação 2.21:

$$z_0 = \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{h'S}{A'}\right) \quad [2.9]$$

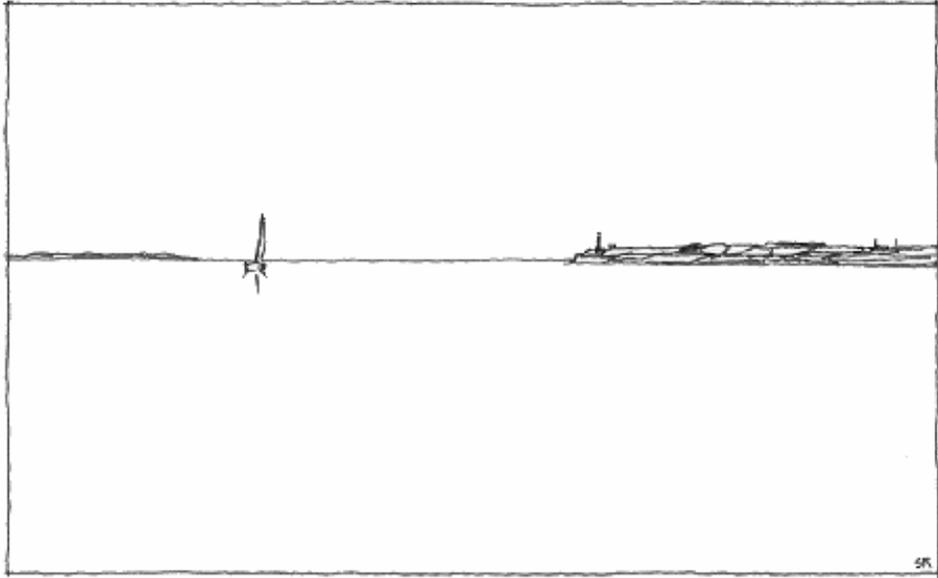
onde:

- h' = altura do elemento de rugosidade [m];
- S = seção transversal, na direção do vento, do elemento de rugosidade [m<sup>2</sup>];
- A' = área horizontal média dos elementos de rugosidade uniformemente distribuídos [m<sup>2</sup>];

### **2.3.1.2 Estimativa do comprimento de rugosidade a partir de tabelas e imagens comparativas**

Em uma avaliação prática, normalmente é lançado mão do uso de tabelas que relacionam o tipo de terreno com sua rugosidade característica. Troen e Pettersen (1989) fizeram uma classificação das superfícies quanto à rugosidade, propondo quatro classes. As Figuras 15 a 18 apresentam os tipos de áreas de acordo com essa classificação.

**Figura 20 – Exemplo de terreno com rugosidade classe 0 ( $z_0=0,0002$  m)**



**Caracteriza superfícies cobertas por água como o oceano, lagos e rios.**

**Fonte: (WASP, 2007).**

**Figura 21 – Exemplo de terreno com rugosidade classe 1 ( $z_0=0,03$  m)**



**Caracterizado por conter áreas abertas com poucos obstáculos ao vento. O terreno deve ser plano ou levemente ondulado. Árvores e arbustos isolados podem ser encontrados na área. Fonte: (WASP, 2007).**

**Figura 22 – Exemplo de terreno com rugosidade classe 2 ( $z_0=0,10$  m)**



**Caracteriza áreas de fazenda com obstáculos distando pelo menos 1000 m entre si e poucas construções espalhadas. Podem existir muitas árvores e casas.**

**Fonte: (WASP, 2007).**

**Figura 23 – Exemplo de terreno com rugosidade classe 3 ( $z_0=0,40$  m)**



**Caracteriza áreas urbanas, florestas e fazendas com muitos obstáculos.**

**Fonte: (WASP, 2007).**

Para determinar a rugosidade de uma área é recomendada uma visita técnica de inspeção do terreno com o objetivo de avaliar os diferentes tipos de cobertura superficial e sua área de ocorrência. Uma análise de imagens de satélite pode ser bastante útil para uma avaliação preliminar e planejamento da visita técnica.

Existem, atualmente, estudos sendo realizados com o intuito de automatizar a classificação da cobertura superficial através de técnicas de sensoriamento remoto, em que, imagens da superfície terrestre são tratadas e processadas a fim de permitir extrair informações relevantes da região. Dentre as tecnologias que estão sendo utilizadas, o radar de abertura sintética polarimétrica (PolSAR) possui uma posição destacada (FRERY, NASCIMENTO e CINTRA, 2011).

É possível encontrar na internet, bancos de dados contendo comprimento de rugosidade ou a classe de rugosidade para quase todo o globo terrestre, estimados com base em imagens de satélite. Como exemplo, pode-se citar o *Modis Vegetation Continuous Field* (DIMICELI, CARROLL, *et al.*, 2011) e o *Global Land Cover Characterization* (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2008). Alguns estudos já têm sido feitos com o intuito de validar o uso desses dados em algumas regiões (RAMLI, ALI, *et al.*, 2009).

É importante mencionar que grandes desvios podem ser encontrados em tais bancos de dados e, por isso, essa informação deve ser vista como preliminar sendo recomendável uma revisão do mapa de rugosidade após visita ao local e obtenção de relatório fotográfico (EMD INTERNATIONAL A/S, 2010).

Há pelo menos duas formas de incluir a informação de rugosidade nos cálculos de energia. A primeira delas é a determinação da rugosidade média por setor. Neste tipo de modelagem da rugosidade, um ponto central é definido no terreno e, a partir deste, determina-se a rugosidade média em cada setor. Como pode haver rugosidades distintas em um mesmo setor, uma rugosidade média é determinada a partir da composição de rugosidades intermediárias tendo por base a Tabela 4. Assim, o resultado final deste processo é a obtenção das rugosidades médias do terreno vistas em qualquer direção a partir desse ponto central (WASP, 2007). A Figura 24 ilustra este tipo de análise.

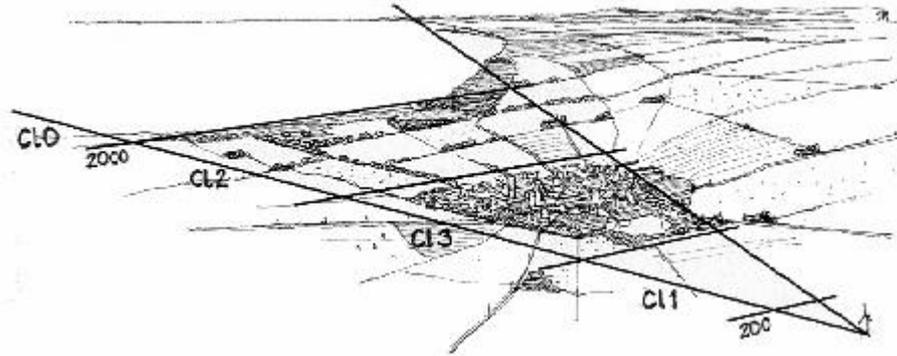
Tabela 4 – Rugosidade média ponderada pela área,  $z_{0\_med}$ 

Classe: $z_0$ [m]	0 0,0002	1 0,03	2 0,1	3 0,4	$z_{0\_med}$ [m]
	3	1			0,001
	3		1		0,002
	3			1	0,003
	2	2			0,004
	2	1	1		0,006
	2	1		1	0,01
	2		2		0,009
	2		1	1	0,015
	2			2	0,025
	1	3			0,011
	1	2	1		0,017
	1	2		1	0,027
	1	1	2		0,024
	1	1	1	1	0,038
	1	1		2	0,059
	1		3		0,033
	1		2	1	0,052
	1		1	2	0,079
	1			3	0,117
		3	1		0,042
		3		1	0,064
		2	2		0,056
		2	1	1	0,086
		2		2	0,127
		1	3		0,077
		1	2	1	0,113
		1	1	2	0,163
		1		3	0,232
			3	1	0,146
			2	2	0,209
			1	3	0,292

A área de cada setor é dividida em quatro partes e cada parte é classificada com um valor de rugosidade de acordo com a metodologia estabelecida por Troen e Pettersen (1989). A rugosidade média resultante é função do número de áreas com determinada rugosidade em uma área.

Fonte: (TROEN e PETERSEN, 1989)

**Figura 24 – Análise de rugosidade do terreno por setor de direção**



Fonte: (WASP, 2007).

A metodologia mais comum para incluir a informação de rugosidade é através de mapas de rugosidade onde são criadas poligonais delimitando os diferentes tipos de cobertura e, posteriormente, definindo os comprimentos de rugosidade interna e externamente a essas poligonais. A Tabela 5 apresenta valores de  $z_0$  para diferentes tipos de rugosidade do terreno.

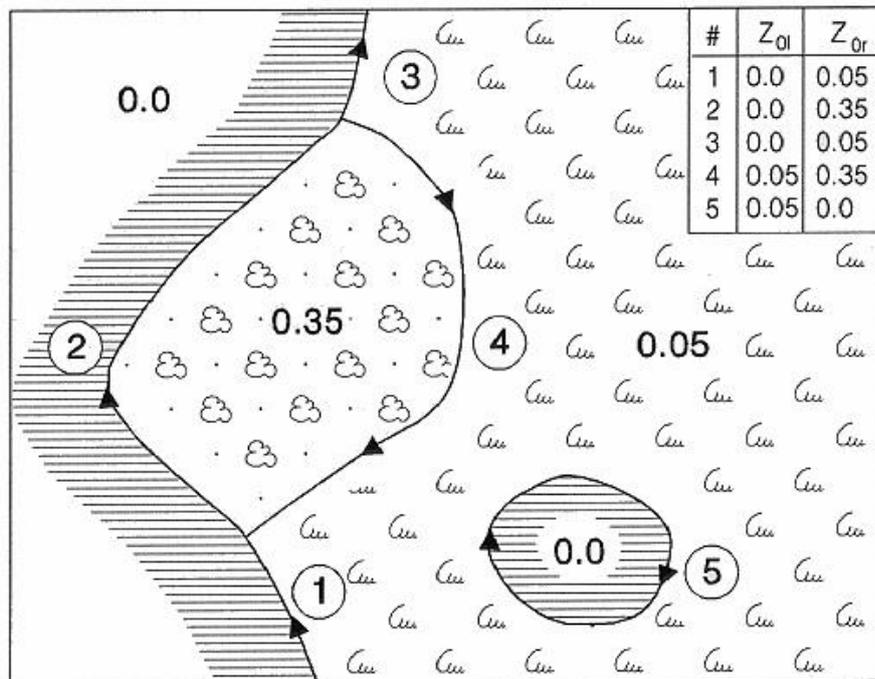
Uma determinada área pode possuir vários tipos de cobertura superficial. Essa característica é muito importante e deve ser observada na escolha de um local para medição e instalação da estação de medição dos dados de vento, pois o posicionamento da mesma em regiões de transição de rugosidades ou mesmo em áreas de alta rugosidade pode gerar resultados difíceis de avaliar ou manipular. A Figura 25 apresenta um exemplo de mapa de rugosidades.

**Tabela 5 – Valores típicos de comprimento de rugosidade -  $z_0$**

Tipo de cobertura do solo	Valor aproximado de $z_0$ [m]
Cidades	1,0
Florestas	0,8
Pequenas cidades, subúrbios	0,5
Área arborizada	0,3
Zona rural com muitas árvores e casas	0,2
Zona rural com plantações	0,1
Zona rural sem plantações	0,05
Zona rural com poucas árvores e casas isoladas	0,03
Pista de aeroporto	0,01
Gramma aparada	0,008
Solo nu	0,005
Superfície coberta por neve	0,001
Superfície coberta por areia	0,0003
Superfície coberta por água (lagos, mar aberto, etc.)	0,0001

Fonte: Adaptado de (WASP, 2007).

Figura 25 – Exemplo de mapa de rugosidade do terreno



O mapa é composto por cinco linhas delimitando as áreas com diferentes rugosidades. A tabela indicada relaciona as rugosidades à esquerda ( $z_{0l}$ ) e à direita ( $z_{0r}$ ) de cada linha. Fonte: (WASP, 2007).

Deve-se notar que o comprimento de rugosidade definido para fins de cálculo do Atlas Eólico deve ser considerado como um parâmetro climatológico, pois a rugosidade de uma área muda sazonalmente. A existência de neve ou mesmo a perda de folhas de determinada vegetação podem influenciar significativamente a rugosidade superficial e por consequência a estimativa de produção. Por isso, um estudo de produção de energia de uma turbina eólica deve ser feito com base na climatologia predominante local a fim de mitigar essa incerteza no cálculo.

## 2.4 Turbulência

O conhecimento da turbulência do vento é importante porque ela causa variações na potência de saída, além de carregamento na estrutura física da turbina. A turbulência é provocada pelos obstáculos, pela orografia e pela rugosidade do terreno em seu entorno.

### 2.4.1 Intensidade de turbulência

A medida mais básica para turbulência é a de intensidade de turbulência. Esta é definida como sendo a razão entre o desvio padrão da velocidade de vento e sua média. Para fins de estudos gerais em energia eólica, estes valores são obtidos em um período de 10 minutos a partir de medições com amostragem de pelo menos 1 Hz (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2002). A intensidade de turbulência é definida por:

$$I = \frac{\sigma}{u} \quad [2.10]$$

onde:

- I = intensidade de turbulência;
- $\sigma$  = desvio padrão da velocidade do vento [m/s];

O desvio padrão pode ser expresso como:

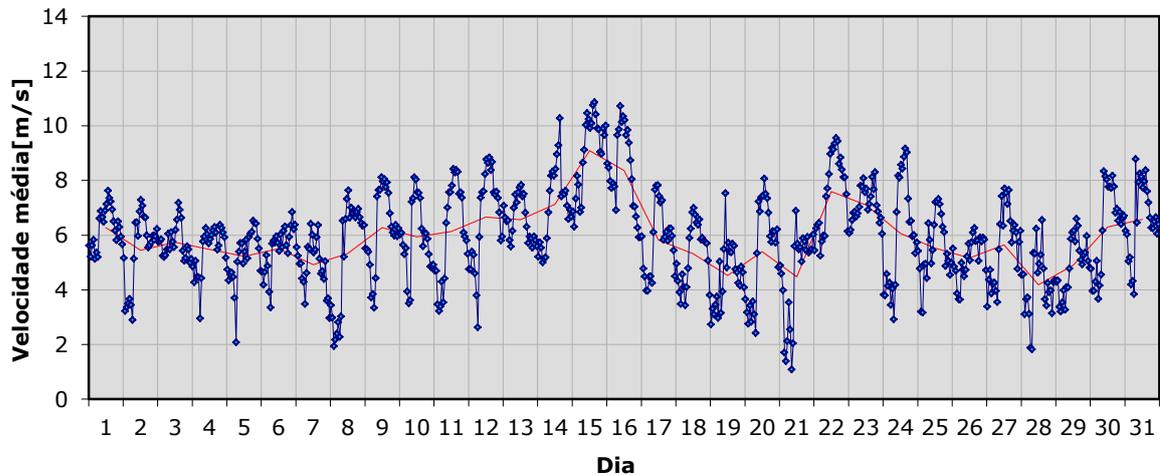
$$\sigma = \left[ \left( \frac{1}{N_a - 1} \right) \sum_{i=1}^{N_a} (u_i - u)^2 \right]^{0,5} \quad [2.11]$$

onde:

- $N_a$  = número de amostras da medição;
- $u_i$  = velocidade de vento instantânea [m/s];

Um exemplo de representação da velocidade média pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 – Velocidades médias de vento medidas a cada 1 hora



Fonte: O autor.

A intensidade de turbulência pode ser usada para caracterizar a turbulência atmosférica. Ela decresce com o aumento da altura e está relacionada à rugosidade e topografia do terreno (ROHATGI e NELSON, 1994).

Os obstáculos existentes no terreno ou na sua proximidade afetam o comportamento do vento. Dependendo de suas características geométricas, podem até mesmo produzir uma esteira que afeta consideravelmente as características do vento após passar por este obstáculo. Eles funcionam como quebra-ventos, reduzindo muito a velocidade do vento nas áreas localizadas atrás, em relação à direção do vento. Portanto, deve-se incluir o efeito destes elementos nos cálculos de avaliação de uma área. A presença de obstáculos em frente aos locais onde serão instaladas as turbinas eólicas deve ser cuidadosamente evitada, pois o vento ao passar por tais obstáculos é afetado e se torna mais turbulento. Os obstáculos podem provocar a turbulência no vento durante um longo espaço atrás dos mesmos. Na Figura 27 está representada a região de turbulência.

O efeito do obstáculo no escoamento do ar é função da geometria do mesmo, da porosidade, da distância desde o obstáculo e do número de Reynolds<sup>4</sup>, que depende da velocidade do vento. A distorção do fluxo pode ser pequena ou grande, podendo afetar o vento tanto atrás do obstáculo, como na sua frente. A influência

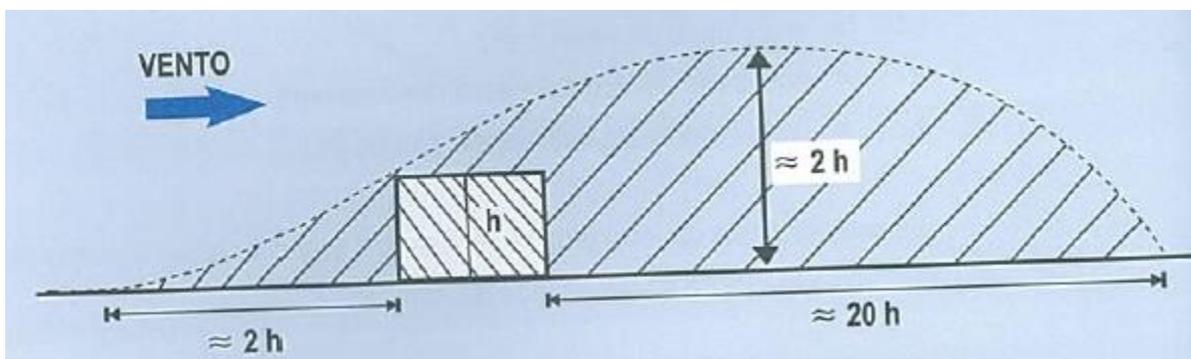
---

<sup>4</sup> O número de Reynolds é o parâmetro adimensional que relaciona as forças inerciais e as forças viscosas da vazão de um fluido incompressível, na ausência de campo gravitacional (PARKER, 1987).

real do obstáculo no comportamento do vento no local em estudo é complexa e de difícil caracterização, pois depende de diversas variáveis tais como: velocidade do vento, direção do vento, dimensões e porosidade do obstáculo. Normalmente, para consideração dos cálculos a análise é mais qualitativa do que quantitativa. Por exemplo, um bosque pode ser tratado como obstáculo; basta que o mesmo seja denso e com árvores altas (WASP, 2007). Uma estimativa comumente adotada para dimensionar a influência de obstáculos no fluxo eólico está descrita na Figura 27.

Quando o obstáculo está muito distante das turbinas eólicas, de forma que a região de turbulência não as alcance, aquele deve ser considerado rugosidade. Um dos locais mais cotados para a implantação de uma central eólica é o topo de morros e colinas por apresentarem maior velocidade do vento devido à altura, além de ser menos influenciado pela rugosidade do chão das áreas anteriores ao morro. Quando o terreno é inclinado, como em dunas e alguns morros, há um incremento da velocidade do vento devido ao estreitamento da região por onde o vento passa. Esse acréscimo pode facilmente superar 10% da velocidade original. O ideal é que o terreno possua uma inclinação suave, sem degraus e sem grandes irregularidades. Ângulos até  $16^\circ$  são considerados bons; entretanto, grandes inclinações, como ângulos superiores a  $27^\circ$  devem ser evitados, pois o efeito é o deslocamento do fluxo no topo provocado pela turbulência (MERONEY, 1991). Morros isolados podem não apresentar aceleração no topo, porque o fluxo de ar tende a contorná-lo (CUSTÓDIO, 2009).

**Figura 27 – Zona de turbulência após um obstáculo**



Fonte: (CUSTÓDIO, 2009).

### 3 MODELO WASP®

O WASP® (Wind Atlas Analysis Application Program) é um modelo computacional que estima a velocidade do vento em um determinado volume baseando-se em uma medição pontual. É importante frisar que este é o modelo computacional mais utilizado mundialmente para a determinação do atlas eólico de uma região. O WASP® foi o principal modelo utilizado nas simulações apresentadas neste trabalho.

Este modelo é composto por diversos submodelos que tratam os parâmetros de entrada fornecidos individualmente a fim de determinar os fatores de correção necessários, conforme será descrito com maior detalhe nas próximas seções. Os principais submodelos são:

- Submodelo de estabilidade atmosférica;
- Submodelo de mudança orográfica;
- Submodelo de mudança de rugosidade;
- Submodelo de obstáculos;
- Submodelo estatístico.

Cada submodelo pode ser estudado individualmente e, para fins deste trabalho, optou-se por realizar uma descrição geral da metodologia WASP® e detalhar o submodelo de mudança de rugosidade. Informações detalhadas sobre cada um dos submodelos podem ser encontradas no *European Wind Atlas* elaborado por (TROEN e PETERSEN, 1989).

#### 3.1 Metodologia WASP®

Na Figura 28, é apresentado um diagrama que descreve a metodologia utilizada pelo WASP® para a obtenção do atlas eólico. De uma forma simplificada, o que o programa faz é, primeiramente, transformar a série histórica de dados de vento medidos na estação anemométrica em 12 histogramas, um para cada setor de direção com intervalos de 30°, contendo a frequência de ocorrência de cada intervalo de velocidade. Em seguida, são calculados fatores de correção para cada

direção do vento a partir dos modelos de rugosidade, obstáculos e orografia do terreno. Cada intervalo de velocidade e direção do vento medido é transformado, a partir dos fatores de correção calculados, em um vento “limpo”, removendo a influência de obstáculos, rugosidade ou orografia no vento medido. Através da rugosidade superficial efetiva para cada direção e do uso da lei de arrasto geostrófico<sup>5</sup>, este vento é extrapolado, obtendo-se o vento geostrófico para a região.

Os dados passam por uma correção de estabilidade do fluxo incidente, obtendo-se finalmente o atlas eólico para a região, que é uma tabela com as principais informações do vento para alturas e rugosidades padrão. A saída do modelo neste nível do processo consiste em uma tabela com os parâmetros de Weibull para 5 alturas (10, 25, 50, 100 e 200 metros) e 4 comprimentos de rugosidade (0; 0,03; 0,10 e 0,4 metros) representando quatro classes de rugosidade<sup>6</sup>. O arquivo de saída pode ser lido com um processador de texto comum e possui extensão “\*.lib”, porém, o arquivo nesse formato está sem formatação e não pode ser lido diretamente. Usando um “script” disponibilizado pelo próprio WAsP<sup>®</sup> é possível converter esse arquivo em um formato legível e diretamente interpretável. Um exemplo da informação contida em um arquivo de climatologia regional é dado na Figura 29.

Igualmente importante para o modelo, é o processo de recriar as condições de vento locais a partir das condições de vento regionais. A metodologia padrão para estimar as condições de vento em um ponto dentro do volume da camada limite superficial consiste em corrigir as condições de vento regional (atlas eólico) considerando os efeitos locais de topografia, rugosidade e obstáculos. Essa correção é feita baseada em interpolações dos dados tabelados para alturas e rugosidades padrão. Após a determinação do atlas eólico para a região onde se encontra a central eólica, é possível calcular os principais parâmetros do vento (velocidade média, fatores de forma e escala de Weibull, etc.) incidente em cada aerogerador (WASP, 2007).

---

<sup>5</sup> Lei que estabelece a relação entre o vento geostrófico e a velocidade de fricção assumindo que a camada limite atmosférica é estacionária, homogênea, adiabática e barotrópica.

<sup>6</sup> Valores de alturas e rugosidades aqui descritos são o padrão para o WaSP<sup>®</sup>. Essas alturas podem e devem ser alteradas de acordo com as necessidades do estudo.

Figura 28 – Metodologia WAsP®



Fonte: Adaptado de (TROEN & PETERSEN, 1989).

**Figura 29 – Exemplo de Atlas Eólico convertido em arquivo de texto**

Wind atlas: Sprogøe 1985-94, 70 m a.g.l. 12 sectors.

Roughness Class 0 (0.0002 m)													
z	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	Total
10	6.18	6.22	5.96	6.56	8.04	7.46	7.59	7.63	7.96	8.21	7.57	6.73	7.45
	1.78	1.90	1.93	2.03	2.60	2.30	2.08	2.28	2.28	2.26	2.16	1.90	2.13
25	6.77	6.82	6.53	7.18	8.79	8.16	8.31	8.35	8.71	8.99	8.29	7.37	8.16
	1.83	1.96	1.99	2.09	2.68	2.37	2.15	2.35	2.36	2.33	2.22	1.96	2.20
50	7.28	7.33	7.02	7.71	9.43	8.76	8.92	8.97	9.35	9.64	8.90	7.93	8.76
	1.88	2.01	2.04	2.14	2.75	2.43	2.20	2.42	2.42	2.39	2.29	2.01	2.26
100	7.89	7.94	7.60	8.36	10.24	9.51	9.67	9.73	10.15	10.45	9.64	8.59	9.50
	1.82	1.95	1.98	2.08	2.67	2.35	2.13	2.34	2.34	2.32	2.21	1.94	2.19
200	8.69	8.76	8.39	9.23	11.34	10.51	10.69	10.76	11.22	11.53	10.65	9.47	10.49
	1.73	1.85	1.87	1.96	2.52	2.23	2.02	2.21	2.22	2.20	2.10	1.84	2.08
Freq	5.4	4.5	4.1	5.5	8.3	7.9	7.7	11.2	13.5	14.5	11.5	6.0	
Roughness Class 1 (0.0300 m)													
z	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	Total
10	4.29	4.36	4.26	4.76	5.54	5.20	5.39	5.35	5.57	5.70	5.14	4.55	5.19
	1.52	1.62	1.65	1.80	2.12	1.87	1.80	1.92	1.91	1.89	1.77	1.58	1.81
25	5.17	5.24	5.12	5.72	6.63	6.24	6.46	6.41	6.67	6.83	6.17	5.48	6.22
	1.64	1.75	1.77	1.94	2.28	2.02	1.95	2.08	2.06	2.03	1.92	1.70	1.94
50	6.02	6.10	5.95	6.62	7.65	7.22	7.49	7.42	7.71	7.88	7.15	6.37	7.21
	1.84	1.97	1.99	2.19	2.57	2.27	2.19	2.33	2.31	2.27	2.15	1.91	2.18
100	7.16	7.24	7.07	7.86	9.07	8.57	8.89	8.80	9.14	9.32	8.49	7.58	8.55
	1.96	2.10	2.12	2.33	2.73	2.42	2.33	2.48	2.46	2.42	2.30	2.03	2.31
200	8.89	9.00	8.79	9.78	11.29	10.66	11.06	10.95	11.36	11.53	10.56	9.41	10.62
	1.87	2.00	2.03	2.22	2.61	2.31	2.22	2.37	2.35	2.31	2.19	1.94	2.21
Freq	5.2	4.4	4.4	6.2	8.3	7.8	8.5	11.8	13.7	13.9	10.2	5.8	
Roughness Class 2 (0.1000 m)													
z	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	Total
10	3.75	3.80	3.74	4.23	4.80	4.54	4.73	4.67	4.88	4.98	4.44	3.92	4.53
	1.52	1.62	1.63	1.85	2.08	1.85	1.82	1.91	1.92	1.90	1.75	1.54	1.80
25	4.65	4.72	4.63	5.23	5.92	5.62	5.85	5.78	6.02	6.14	5.50	4.87	5.60
	1.63	1.73	1.74	1.98	2.23	1.98	1.95	2.05	2.05	2.03	1.87	1.65	1.92
50	5.49	5.56	5.46	6.14	6.93	6.60	6.87	6.78	7.06	7.19	6.46	5.74	6.57
	1.81	1.91	1.93	2.19	2.47	2.20	2.15	2.27	2.27	2.23	2.07	1.83	2.12
100	6.57	6.64	6.52	7.31	8.25	7.86	8.19	8.07	8.40	8.54	7.70	6.87	7.83
	1.98	2.10	2.12	2.41	2.71	2.41	2.37	2.49	2.49	2.45	2.28	2.01	2.33
200	8.10	8.19	8.04	9.03	10.19	9.70	10.10	9.96	10.35	10.50	9.50	8.46	9.66
	1.90	2.01	2.03	2.31	2.60	2.31	2.27	2.38	2.39	2.35	2.18	1.92	2.23
Freq	5.1	4.3	4.6	6.4	8.2	7.8	8.8	12.0	13.8	13.6	9.7	5.7	
Roughness Class 3 (0.4000 m)													
z	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	Total
10	2.95	3.01	3.01	3.40	3.73	3.59	3.76	3.70	3.86	3.91	3.46	3.07	3.57
	1.52	1.62	1.66	1.89	2.03	1.84	1.85	1.91	1.92	1.87	1.73	1.54	1.80
25	3.91	3.98	3.98	4.48	4.92	4.73	4.96	4.88	5.09	5.15	4.57	4.07	4.72
	1.62	1.72	1.76	2.00	2.15	1.95	1.96	2.03	2.03	1.97	1.83	1.63	1.90
50	4.75	4.83	4.82	5.42	5.93	5.72	5.99	5.89	6.14	6.21	5.53	4.94	5.70
	1.76	1.87	1.91	2.17	2.34	2.12	2.12	2.20	2.20	2.13	1.99	1.77	2.06
100	5.76	5.85	5.83	6.53	7.14	6.90	7.22	7.10	7.39	7.47	6.68	5.99	6.87
	2.00	2.13	2.17	2.48	2.67	2.41	2.42	2.51	2.50	2.42	2.26	2.02	2.34
200	7.03	7.14	7.12	7.98	8.73	8.43	8.83	8.68	9.02	9.09	8.16	7.30	8.39
	1.92	2.05	2.09	2.39	2.57	2.32	2.33	2.42	2.41	2.34	2.18	1.95	2.26
Freq	5.0	4.3	4.7	6.8	8.2	7.8	9.3	12.3	13.9	13.2	9.0	5.7	
z	Class 0		Class 1		Class 2		Class 3						
m	m/s	W/m <sup>2</sup>											
10	6.6	315	4.6	128	4.0	85	3.2	42					
25	7.2	403	5.5	202	5.0	149	4.2	90					
50	7.8	488	6.4	280	5.8	218	5.0	146					
100	8.4	639	7.6	445	6.9	341	6.1	229					
200	9.3	905	9.4	886	8.6	661	7.4	430					

Fonte: (MORTENSEN, LANDBERG, *et al.*, 2004).

Para o cálculo da energia produzida por uma turbina eólica, é necessário relacionar a curva de potência da turbina para a massa específica do ar em que ela irá operar, com a função de densidade de probabilidade de frequência do vento resultante em seu rotor (HANSEN, 1998).

A partir da curva de Weibull, pode-se determinar a frequência esperada de um determinado intervalo de velocidade de vento. Multiplicando-se essa frequência esperada pelo número total de horas do período analisado obtém-se o número de horas que o vento incide com uma determinada velocidade durante o período. Ao multiplicar-se o número de horas de ocorrência daquela velocidade de vento pela potência associada a ela na curva de potência da turbina eólica utilizada, sabe-se a quantidade de energia que aquela velocidade de vento é capaz de produzir naquele período. O somatório da contribuição de cada velocidade de vento leva à energia total produzida durante o período analisado (ARAUJO, MELO, *et al.*, 2009).

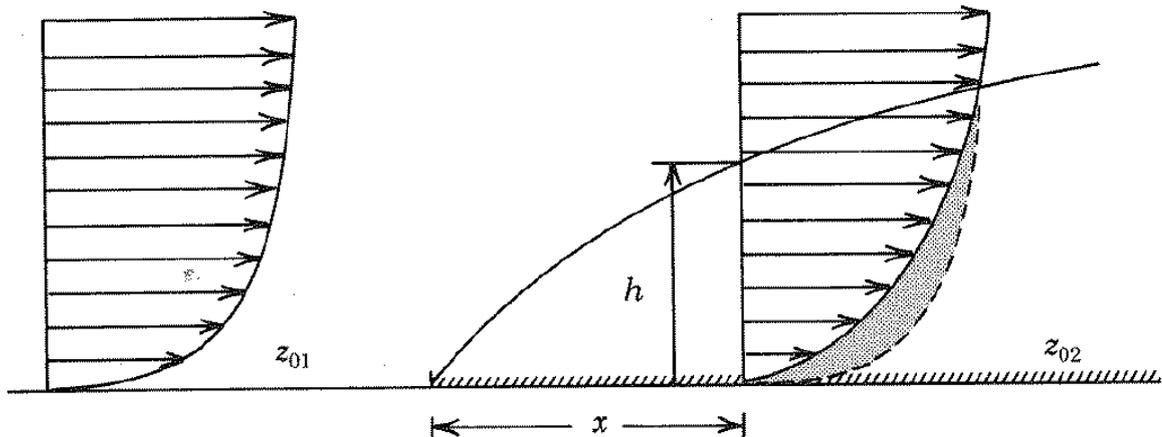
Não faz parte do escopo deste trabalho especificar com detalhes a metodologia WAsP<sup>®</sup> mas vem ao caso descrever o modelo de mudança de rugosidade que é um dos submodelos que são executados na metodologia.

### **3.2 Modelo de mudança de rugosidade**

O perfil logarítmico do vento só é aplicável se o terreno à montante do vento é homogêneo (isto é, não há mudanças significativas de rugosidade, obstáculos e em casos específicos, topografia). Se este não é o caso, desvios serão verificados no perfil vertical da velocidade do vento. Recomenda-se que a rugosidade do terreno seja descrita em todas as direções com uma região retangular envoltória (envelope) de pelo menos 10 km (EMD INTERNATIONAL A/S, 2010).

A partir de algumas hipóteses relacionadas à camada superficial, é possível modelar as mudanças de tensão superficial devidas a tais interferências que ocorrem quando o vento passa a fluir de uma superfície com rugosidade  $z_{01}$  para uma superfície com rugosidade  $z_{02}$ . A Figura 30 ilustra o ar passando de uma superfície com rugosidade  $z_{01}$  para uma superfície com rugosidade  $z_{02}$ .

**Figura 30 – Situação idealizada do fluxo de vento após mudança brusca na rugosidade superficial.**



A figura apresenta o perfil do vento sobre superfície homogênea com rugosidade  $z_{01}$  assim como o perfil após uma distância  $x$  onde o perfil é modificado devido ao efeito da rugosidade  $z_{02}$ . A altura da camada limite interna  $h$  é função de  $x$  (TROEN e PETERSEN, 1989).

Antes da mudança de rugosidade e acima da Camada Limite Interna (CLI), o perfil de velocidades é determinado pela rugosidade precedente  $z_{01}$ . Abaixo da altura  $h$  à jusante da mudança de rugosidade, o perfil de velocidades é igual ao perfil de velocidades à montante modificado por um fator que depende da altura sobre o solo, as duas rugosidades e a altura  $h$ . Esta altura pode ser determinada através da Equação 3.1:

$$\left(\frac{h}{z'}\right) \left(\ln\left(\frac{h}{z'}\right) - 1\right) = 0,9 \left(\frac{x}{z'}\right) \quad [3.1]$$

onde:

$h$  = altura da CLI [m];

$x$  = distância à jusante do ponto de observação até a mudança de rugosidades [m];

$z'$  =  $\max(z_{01}, z_{02})$ ;

Um ponto importante para notar neste tópico é o fato de que caso a altura do cubo (altura do eixo do rotor) seja maior que  $h$  o terreno pode ser considerado homogêneo do ponto de vista da turbina e não é necessário levar em consideração as mudanças de rugosidade. Por outro lado, caso a altura do cubo seja menor que  $h$ , os parâmetros de Weibull serão corrigidos conforme metodologia abaixo:

- Determinar os parâmetros  $A$  e  $k$  para o vento antes de atingir a mudança de rugosidade, ou seja, considerando apenas  $z_{01}$ .
- Determinar a altura  $h$  da CLI através da Equação 3.1
- Se a altura do cubo for maior que  $h$  então nenhuma correção deve ser feita.
- Caso a altura do cubo seja inferior a  $h$ , então, o parâmetro de Weibull  $A$  é corrigido usando a Equação 3.2 e 3.3:

$$A_{site(z_{02})} = A_{montante(z_{01})} Cor \quad [3.2]$$

$$Cor = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_{02}}\right) \ln\left(\frac{h}{z_{01}}\right)}{\ln\left(\frac{z}{z_{01}}\right) \ln\left(\frac{h}{z_{02}}\right)} \quad [3.3]$$

onde:

Cor = fator de correção;

$z_{01}$  = comprimento de rugosidade à montante [m];

$z_{02}$  = comprimento de rugosidade após mudança de rugosidade [m];

$z$  = altura do cubo [m];

Não é incomum encontrar um terreno em que um ou mais setores não possam ser considerados como homogêneos devido a mudanças claras na rugosidade que ocorrem dentro de um raio de 10 km do ponto de interesse. Por isso, este é um conceito fundamental para a compreensão do grau de sensibilidade necessário na elaboração de um mapa de rugosidades.

A fim de exemplificar, considere-se uma turbina com altura do cubo de 80 m situada a 2 km da costa em área plana com cobertura vegetal arbustiva esparsa com comprimento de rugosidade  $z_{02} = 0,1$  m (Classe 2). Em tais condições, a altura da CLI pode ser calculada a partir da Equação 3.1 como sendo aproximadamente 262 metros. O fator de correção é obtido aplicando esses dados na Equação 3.3 tendo como resultado  $Cor = 0,93$ . Sendo assim, o fator de escala  $A$  de Weibull sofrerá um decréscimo de 7% devido à mudança de rugosidade percebida pela turbina. O fator de forma  $k$  de Weibull não é alterado.

Empiricamente, foi provado que a mudança na velocidade de fricção superficial é bem modelada usando a seguinte relação estabelecida em condições de estabilidade atmosférica neutra:

$$\frac{u_{x2}}{u_{x1}} = \left( \frac{\ln\left(\frac{h}{z_{01}}\right)}{\ln\left(\frac{h}{z_{02}}\right)} \right) \quad [3.4]$$

onde:

$u_{x1}$  = velocidade de fricção superficial à montante [m/s];

$u_{x2}$  = velocidade de fricção após mudança na rugosidade superficial [m/s];

O perfil de vento é perturbado dentro da CLI e, portanto não pode ser descrito com um perfil logarítmico uniforme. Experimentalmente, chegou-se a um modelo capaz de descrever tal perfil usando três funções logarítmicas:

$$u(z) = \begin{cases} u'(\ln\left(\frac{z}{z_{01}}\right)) / \ln\left(\frac{c_1 h}{z_{01}}\right), & z \geq c_1 h \\ u'' + (u' - u'')(\ln\left(\frac{z}{c_2 h}\right)) / \ln\left(\frac{c_1}{c_2}\right), & c_2 h \leq z \leq c_1 h \\ u''(\ln\left(\frac{z}{z_{02}}\right)) / \ln\left(\frac{c_2 h}{z_{02}}\right), & z \leq c_2 h \end{cases} \quad [3.5]$$

onde:

$$u' = \left( \frac{u_{x1}}{k} \right) \ln\left(\frac{c_1 h}{z_{01}}\right);$$

$$u'' = \left( \frac{u_{x2}}{k} \right) \ln\left(\frac{c_2 h}{z_{02}}\right);$$

$$c_1 = 0,3;$$

$$c_2 = 0,09;$$

Com o uso da Equação 3.4 e da Equação 3.5, a velocidade de fricção no ponto de medição do vento pode ser relacionada com a velocidade de fricção antes da mudança de rugosidade. Para cada mudança de rugosidade a Equação 3.5 pode ser aplicada em sequencia, e assim a velocidade de vento medida pode ser usada para estimar a velocidade de fricção em pontos bem mais distantes. De acordo com a distância do ponto analisado ao ponto de medição, as mudanças de rugosidade são ponderadas através de um fator exponencial de forma que as mudanças de rugosidade mais próximas do ponto analisado tenham maior influência na perturbação do perfil dentro da CLI.

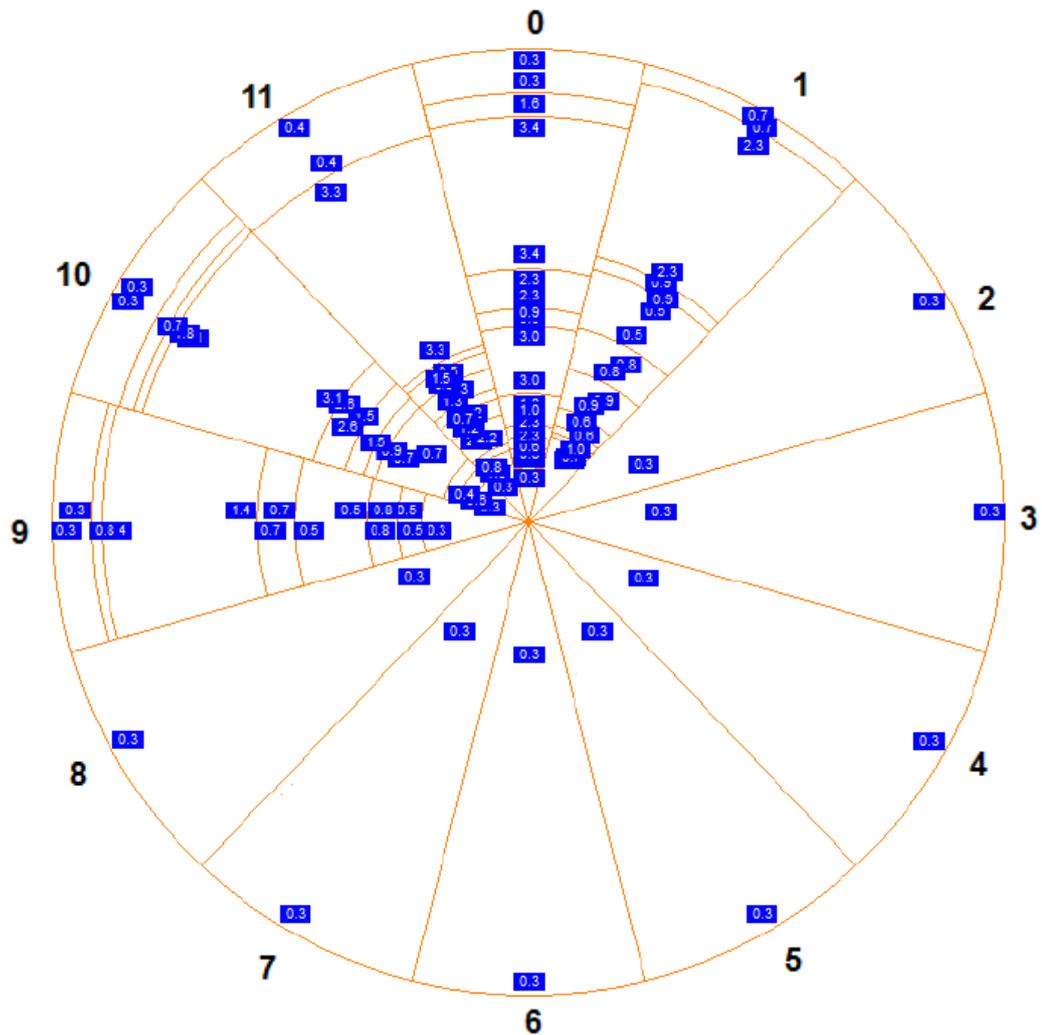
## 4 RESULTADOS E SIMULAÇÕES

Nesta seção estão descritas algumas simulações realizadas com o objetivo de enfatizar alguns conceitos teóricos específicos assim como avaliar a sensibilidade do modelo WASP<sup>®</sup> à variação do parâmetro comprimento de rugosidade. Uma breve análise da influencia da rugosidade na estimativa da vida útil da turbina também é discutida.

### 4.1 Conversão de mapas de rugosidade em rosas de rugosidade

A maneira como o WASP<sup>®</sup> “entende” a rugosidade é na forma de uma rosa de rugosidades conforme apresentado na Figura 31. Uma rosa de rugosidades é a representação gráfica de uma tabela especificando os valores de rugosidade para cada segmento de direção do vento. Tipicamente, são definidos 12 setores de 30° centralizados em um ponto de interesse no terreno. A tabela consiste de valores de rugosidade e distâncias até a próxima mudança de rugosidade para cada setor conforme ilustrado na Figura 32.

Figura 31 – Rosa de rugosidades



Fonte: (EMD INTERNATIONAL A/S, 2010).

Figura 32 – Tabela de rugosidades

Sector	Roughness at WTG	Distance to 1. change	Roughness after 1. change	Distance to 2. change	Roughness after 2. change	Distance to 3. change	Roughness after 3. change	Distance to 4. change	Roughness after 4. change	Distance to 5. change	Roughness after 5. change	Distance to 6. change	Roughness after 6. change
0-N		0											
1-NNE	0.1447	0											
2-ENE	0.1507	0											
3-E	0.1320	1,247	0.3286	2,500	0.1979	12,023	0.1629	16,907	0.0529	19,858	0.1951	0	
4-ESE	0.1334	861	0.3655	2,737	0.1913	0							
5-SSE	0.1496	0											
6-S	0.1503	0											
7-SSW	0.1584	0											
8-WSW	0.1515	0											
9-W	0.2281	5,030	0.1440	0									
10-WNW	0.1594	0											
11-NNW	0.1477	0											

Fonte: (EMD INTERNATIONAL A/S, 2010).

Conforme mencionado anteriormente, a informação de rugosidade para fins de cálculo do atlas eólico pode ser inserida no WAsP<sup>®</sup> das seguintes formas:

#### **4.1.1 Rosa de rugosidades**

Se a rugosidade superficial de um terreno é especificada diretamente como uma rosa, esta será usada para todas as posições no cálculo em questão, isto é, no ponto onde está situada a torre de medição e nas posições das turbinas. Esta alternativa apenas faz sentido em locais em que a rugosidade é bastante uniforme ou quando se quer realizar o cálculo apenas em uma posição específica uma vez que, quase sempre as condições de rugosidade do terreno mudam sensivelmente com a posição escolhida.

#### **4.1.2 Mapa de rugosidades**

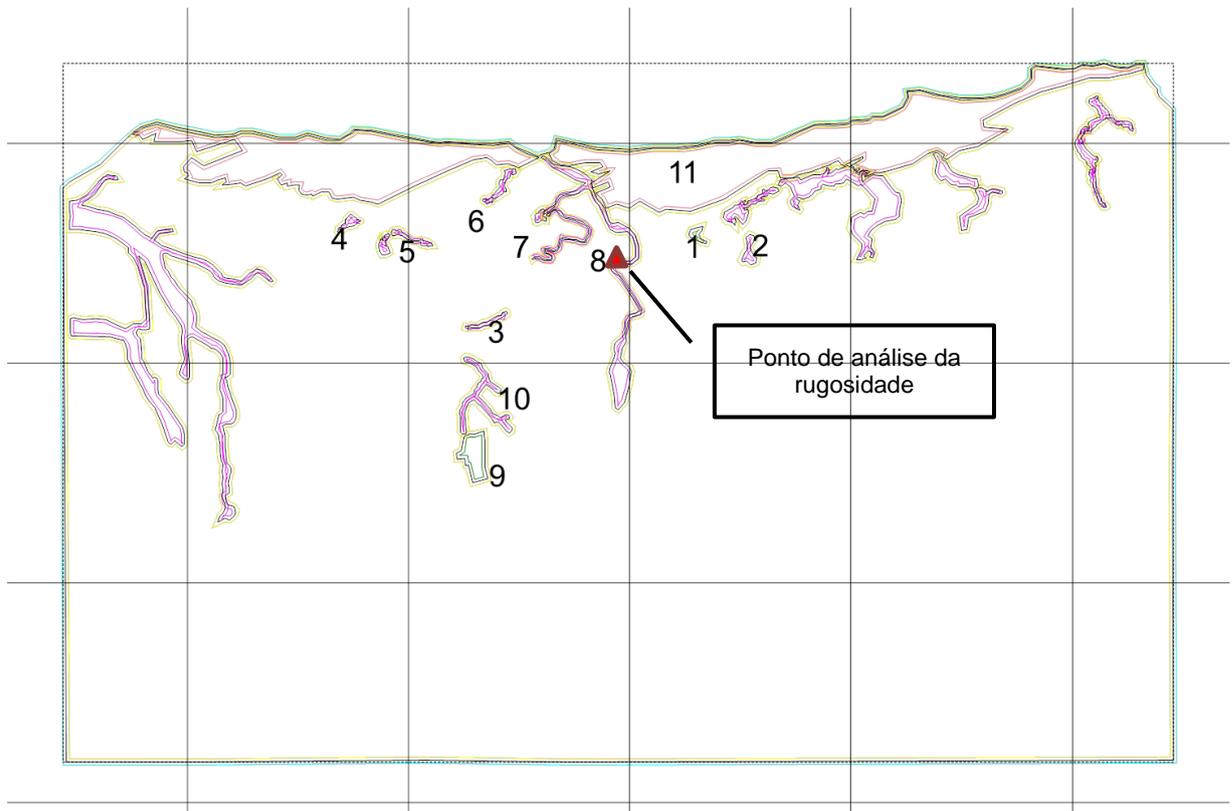
Esta é a forma mais comum de se definir a rugosidade no WAsP<sup>®</sup>. Neste caso, um mapa é criado para toda a área do terreno e o WAsP<sup>®</sup> se encarrega de criar as rosas de rugosidades em cada ponto de cálculo de acordo com este mapa.

Nesta simulação, o objetivo é ganhar sensibilidade na maneira que o WAsP<sup>®</sup> interpreta mapas de rugosidade complexos transformando-os em rosas de rugosidade. Assim, será possível adquirir uma ideia prática do nível de detalhe necessário em um mapa de rugosidade de modo que o mesmo represente satisfatoriamente bem a região. Muitos usuários gastam muito tempo digitalizando detalhes que acabam não adicionando informação relevante ao modelo. O processo de conversão para a rosa de rugosidade simplifica o mapa de tal forma que uma digitalização mais “grosseira” resultaria na mesma rosa de rugosidade e, assim, não afetaria os resultados do WAsP<sup>®</sup>.

Um mapa de rugosidade elaborado por um experiente usuário do modelo WAsP<sup>®</sup> foi utilizado como estudo de caso para essa avaliação. A Figura 33 apresenta o mapa de rugosidade extraído de um projeto no litoral do Rio Grande do Norte. Os comprimentos de rugosidade para este projeto variam entre 0 m e 0,132

m. A metodologia adotada consiste em eliminar gradualmente alguns polígonos existentes no mapa e verificar a variação de valores na rosa de rugosidade gerada pelo WASP<sup>®</sup>. Para essa análise foram escolhidos 11 polígonos enumerados na Figura 33. Os polígonos foram sendo removidos do mapa em ordem crescente e a rosa de rugosidade foi sendo avaliada em cada etapa. A definição da ordem foi feita baseada numa análise setorial, ou seja, os polígonos em um mesmo setor tem uma numeração sequencial. Outras ordens poderiam ter sido adotadas e o resultado seria ligeiramente diferente. A Figura 34 apresenta a rosa de rugosidade com a descrição dos setores usados para a análise. A rugosidade interna e externa de cada polígono é dada na Tabela 6.

**Figura 33 – Mapa de rugosidade em região litorânea do Rio Grande do Norte**



**A numeração indica a ordem em que os elementos de rugosidade foram retirados do mapa a fim de avaliar o impacto na geração da rosa de rugosidade. Imagem extraída do software WASP Map Editor<sup>®</sup>. Fonte: O autor.**

Tabela 6 – Comprimentos de rugosidade do mapa da Figura 33.

Polígono	Rugosidade interna [m]	Rugosidade externa [m]	Classe de rugosidade interna	Classe de rugosidade externa
1	0,132	0,055	2,2	1,5
2	0,001	0,055	0,2	1,5
3	0,001	0,055	0,2	1,5
4	0,001	0,055	0,2	1,5
5	0,001	0,055	0,2	1,5
6	0,001	0,055	0,2	1,5
7	0,001	0,055	0,2	1,5
8	0,001	0,055	0,2	1,5
9	0,132	0,055	2,2	1,5
10	0,001	0,055	0,2	1,5
11	0,004	0,055	0,6	1,5

Comprimentos de rugosidade para os polígonos enumerados na Figura 33.

Fonte: O autor.

Figura 34 – Rosa de rugosidade indicando os setores considerados no cálculo dos parâmetros

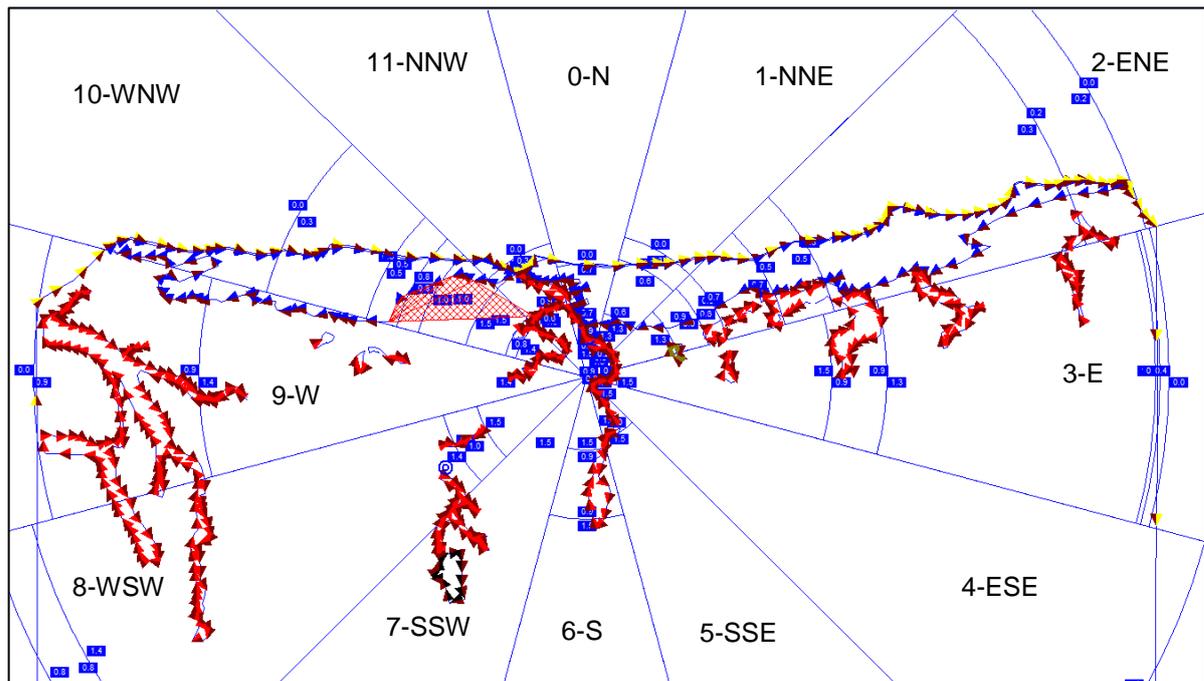
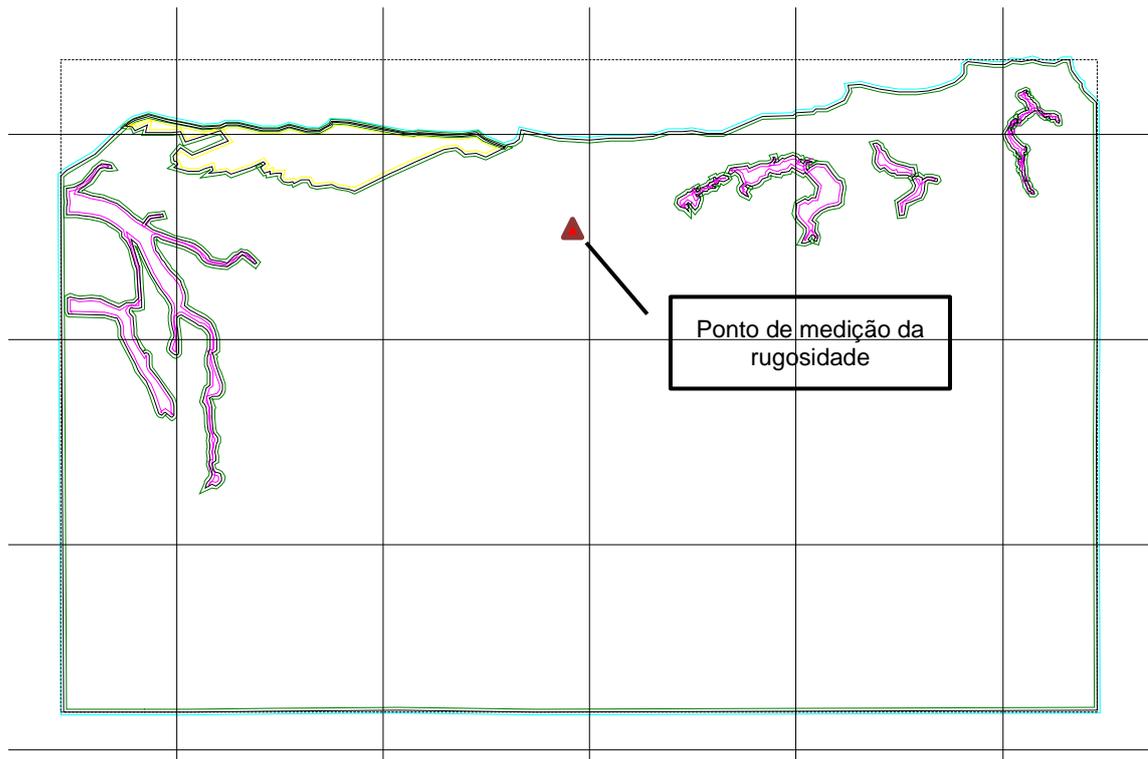


Imagem extraída do software WindPro®. Fonte: O autor.

A Figura 35 apresenta o mapa de rugosidade após a remoção dos polígonos enumerados na Figura 33. A fim de avaliar o impacto que os polígonos exercem na rosa de rugosidade que será usada no WASP®, doze tabelas foram montadas para que fosse possível verificar a evolução dos parâmetros. As linhas da tabela referem-se a cada etapa do processo de remoção dos polígonos e a respectiva parametrização de rugosidade para um setor específico.

**Figura 35 – Mapa de rugosidade após a remoção dos polígonos para verificação da rosa de rugosidade**



Fonte: O autor.

**Tabela 7 – Rosa de rugosidade para o mapa original.**

Sector	Rugosidade no ponto	Distancia para 1ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 1ª mudança [m]	Distancia para 2ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 2ª mudança [m]	Distancia para 3ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 3ª mudança [m]	Distancia para 4ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 4ª mudança [m]	Distancia para 5ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 5ª mudança [m]	Distancia para 6ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 6ª mudança [m]
0-N	0,054	1356	0,006	1723	0,021	2541	0,005	5161	0,000	0			
1-NNE	0,055	1331	0,012	1523	0,001	1707	0,041	3008	0,004	5544	0,001	6590	0
2-ENE	0,042	4194	0,015	5704	0,004	6583	0,008	8608	0,002	11541	0,001	23255	000,1
3-E	0,055	266	0,013	1386	0,052	11012	0,021	13513	0,045	25563	0,007	25770	000,1
4-ESE	0,055	259	0,000	337	0,016	507	0,054	28757	0,002	32173	0,000	0	
5-SSE	0,055	278	0,009	745	0,030	2916	0,055	23907	0,013	25694	0,002	28712	0
6-S	0,055	3342	0,018	6452	0,054	23007	0,000	0					
7-SSW	0,053	23877	0,013	25670	0,002	28788	0,000	0					
8-WSW	0,055	5141	0,025	6681	0,049	25806	0,013	27718	0,002	30951	0,000	0	
9-W	0,049	17436	0,016	24849	0,000	0							
10-WNW	0,047	3323	0,011	3796	0,053	5643	0,028	7851	0,009	8861	0,003	10273	000,1
11-NNW	0,045	3365	0,004	3565	0,015	5702	0,001	6296	0,000	0			

Fonte: O autor.

Tabela 8 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 0-N

Setor 0-N	Rugosidade no ponto	Distancia para 1ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 1ª mudança [m]	Distancia para 2ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 2ª mudança [m]	Distancia para 3ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 3ª mudança [m]	Distancia para 4ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 4ª mudança [m]	Distancia para 5ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 5ª mudança [m]	Distancia para 6ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 6ª mudança [m]
Original	0,054	1356	0,006	1723	0,021	2541	0,005	5161	0,000				
1	0,054	1356	0,006	1723	0,021	2541	0,005	5161	0,000				
2	0,054	1356	0,006	1723	0,021	2541	0,005	5161	0,000				
3	0,054	1356	0,006	1723	0,021	2541	0,005	5161	0,000				
4	0,054	1356	0,006	1723	0,021	2541	0,005	5161	0,000				
5	0,054	1356	0,006	1723	0,021	2541	0,005	5161	0,000				
6	0,054	1356	0,006	1723	0,021	2541	0,005	5161	0,000				
7	0,054	1356	0,006	1723	0,021	2541	0,005	5161	0,000				
8	0,053	2541	0,007	5095	0,000	0							
9	0,053	2541	0,007	5095	0,000	0							
10	0,053	2541	0,007	5095	0,000	0							
11	0,055	5095	0,000	0									

Fonte: O autor.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 8, pode-se notar que a remoção de polígonos de rugosidade que não estejam na direção que está sendo avaliada (neste caso, a direção norte) não altera os parâmetros de rugosidade. Alterações significativas para esse setor só foram percebidas após a remoção dos polígonos 8 e 11.

Tabela 9 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 1-NNE

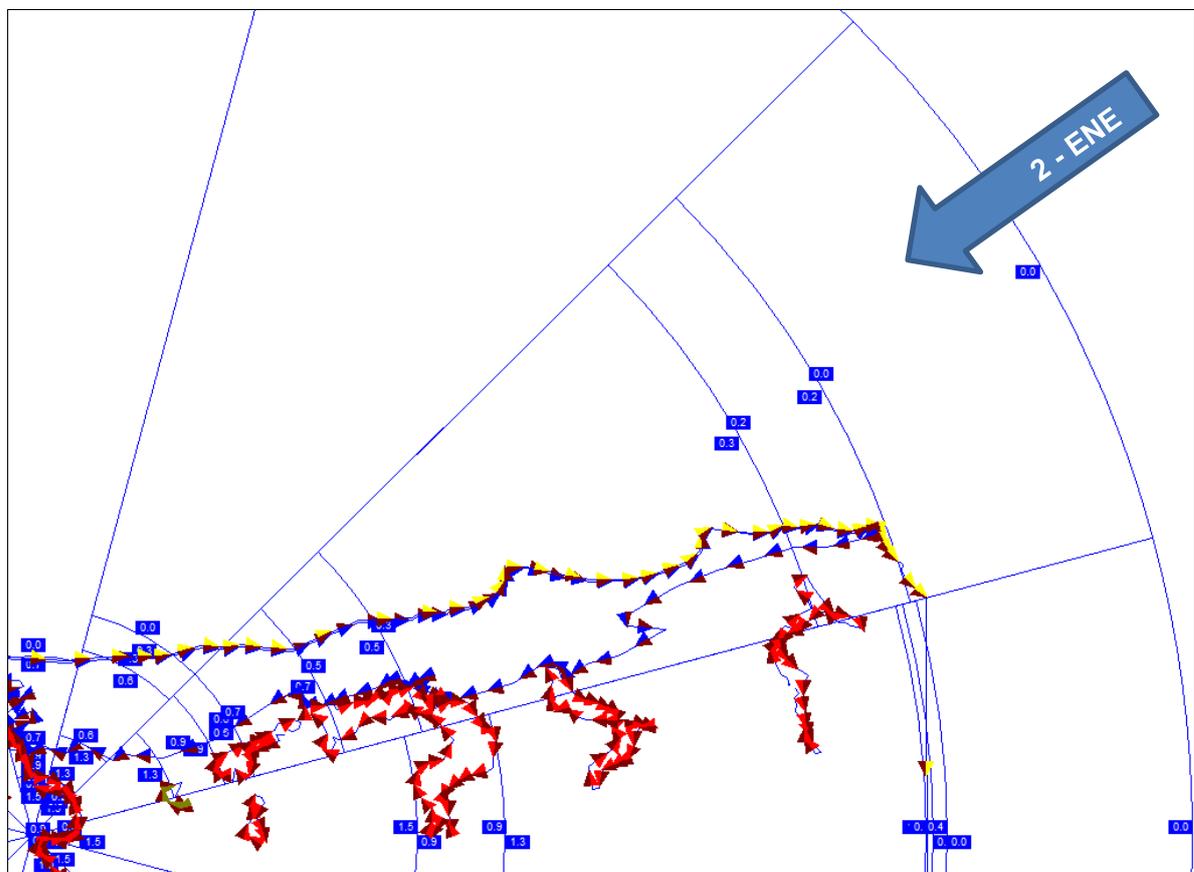
Setor 1-NNE	Rugosidade no ponto	Distancia para 1ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 1ª mudança [m]	Distancia para 2ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 2ª mudança [m]	Distancia para 3ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 3ª mudança [m]	Distancia para 4ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 4ª mudança [m]	Distancia para 5ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 5ª mudança [m]	Distancia para 6ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 6ª mudança [m]
Original	0,055	1331	0,012	1523	0,001	1707	0,041	3008	0,004	5544	0,001	6590	0,000
1	0,055	1331	0,012	1523	0,001	1707	0,041	3008	0,004	5544	0,001	6590	0,000
2	0,055	1331	0,012	1523	0,001	1707	0,041	3008	0,004	5544	0,001	6590	0,000
3	0,055	1331	0,012	1523	0,001	1707	0,041	3008	0,004	5544	0,001	6590	0,000
4	0,055	1331	0,012	1523	0,001	1707	0,041	3008	0,004	5544	0,001	6590	0,000
5	0,055	1331	0,012	1523	0,001	1707	0,041	3008	0,004	5544	0,001	6590	0,000
6	0,055	1331	0,012	1523	0,001	1707	0,041	3008	0,004	5544	0,001	6590	0,000
7	0,055	1331	0,012	1523	0,001	1707	0,041	3008	0,004	5544	0,001	6590	0,000
8	0,049	3008	0,004	5544	0,001	6590	0,000	0					
9	0,049	3008	0,004	5544	0,001	6590	0,000	0					
10	0,049	3008	0,004	5544	0,001	6590	0,000	0					
11	0,055	5332	0,013	5792	0,002	6590	0,000	0					

Fonte: O autor.

A Tabela 9 apresenta os resultados para o setor 1-NNE. Um comportamento muito similar ao do setor 0-N é verificado. Um aspecto interessante para esse setor é o fato de que existem 6 rugosidades intermediárias. Em particular, a primeira mudança de rugosidade se refere a uma estreita faixa de 192 metros definida pelo polígono 8. É interessante notar que apesar de estreita, o modelo captura essa mudança de rugosidade.

Na Tabela 10, pode ser verificada a evolução dos parâmetros de rugosidade para o setor 2-ENE. O comportamento da evolução dos parâmetros é ainda similar aos observados anteriormente pelas mesmas razões mencionadas anteriormente. A Figura 36 apresenta a rosa de rugosidade para o setor 2-ENE em destaque. É fácil notar como muitos detalhes considerados na elaboração do mapa de rugosidade são perdidos nesse processo. Assim, pode-se concluir que muito mais importante que definir com precisão os detalhes do contorno do mapa de rugosidade é definir com coerência os valores de comprimento de rugosidade adotados.

**Figura 36 – Rosa de rugosidade com o setor 2-ENE em destaque**



Fonte: O autor.

Tabela 10 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 2-ENE

Setor 2-ENE	Rugosidade no ponto	Distancia para 1ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 1ª mudança [m]	Distancia para 2ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 2ª mudança [m]	Distancia para 3ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 3ª mudança [m]	Distancia para 4ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 4ª mudança [m]	Distancia para 5ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 5ª mudança [m]	Distancia para 6ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 6ª mudança [m]
Original	0,042	4194	0,015	5704	0,004	6583	0,008	8608	0,002	11541	0,001	23255	0,001
1	0,042	4194	0,015	5704	0,004	6583	0,008	8608	0,002	11541	0,001	23255	0,001
2	0,042	4194	0,015	5704	0,004	6583	0,008	8608	0,002	11541	0,001	23255	0,001
3	0,042	4194	0,015	5704	0,004	6583	0,008	8608	0,002	11541	0,001	23255	0,001
4	0,042	4194	0,015	5704	0,004	6583	0,008	8608	0,002	11541	0,001	23255	0,001
5	0,042	4194	0,015	5704	0,004	6583	0,008	8608	0,002	11541	0,001	23255	0,001
6	0,042	4194	0,015	5704	0,004	6583	0,008	8608	0,002	11541	0,001	23255	0,001
7	0,042	4194	0,015	5704	0,004	6583	0,008	8608	0,002	11541	0,001	23255	0,001
8	0,055	3342	0,029	4194	0,015	5704	0,004	6583	0,008	8608	0,002	11541	0,001
9	0,055	3342	0,029	4194	0,015	5704	0,004	6583	0,008	8608	0,002	11541	0,001
10	0,055	3342	0,029	4194	0,015	5704	0,004	6583	0,008	8608	0,002	11541	0,001
11	0,055	5704	0,020	8814	0,003	10139	0,008	11614	0,003	16493	0,001	23067	0,000

Fonte: O autor.

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos para a rosa de rugosidade no setor 3-E. Apesar de estarem inclusos nesse setor os polígonos 1 e 2, estes não alteraram os resultados conforme pode ser verificado. O que pôde ser constatado a partir desse resultado é que a interferência das mudanças de rugosidade no modelo é função da área do polígono e da distância que o mesmo está do ponto em que está sendo estimada a rosa de rugosidade. Quanto mais distante estiver o polígono, menor será sua influência para a determinação da rugosidade média do setor.

Tabela 11 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 3-E

Setor 3-E	Rugosidade no ponto	Distancia para 1ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 1ª mudança [m]	Distancia para 2ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 2ª mudança [m]	Distancia para 3ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 3ª mudança [m]	Distancia para 4ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 4ª mudança [m]	Distancia para 5ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 5ª mudança [m]	Distancia para 6ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 6ª mudança [m]
Original	0,055	266	0,013	1386	0,052	11012	0,021	13513	0,045	25563	0,007	25770	0,001
1	0,055	266	0,013	1386	0,052	11012	0,021	13513	0,045	25563	0,007	25770	0,001
2	0,055	266	0,013	1386	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0	
3	0,055	266	0,013	1386	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0	
4	0,055	266	0,013	1386	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0	
5	0,055	266	0,013	1386	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0	
6	0,055	266	0,013	1386	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0	
7	0,055	266	0,013	1386	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0	
8	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0					
9	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0					
10	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0					
11	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0					

Fonte: O autor.

Tabela 12 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 4-ESE

Setor 4-ESE	Rugosidade no ponto	Distancia para 1ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 1ª mudança [m]	Distancia para 2ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 2ª mudança [m]	Distancia para 3ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 3ª mudança [m]	Distancia para 4ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 4ª mudança [m]	Distancia para 5ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 5ª mudança [m]	Distancia para 6ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 6ª mudança [m]
Original	0,055	266	0,013	1386	0,052	11012	0,021	13513	0,045	25563	0,007	25770	0,001
1	0,055	266	0,013	1386	0,052	11012	0,021	13513	0,045	25563	0,007	25770	0,001
2	0,055	266	0,013	1386	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0	
3	0,055	266	0,013	1386	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0	
4	0,055	266	0,013	1386	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0	
5	0,055	266	0,013	1386	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0	
6	0,055	266	0,013	1386	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0	
7	0,055	266	0,013	1386	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0	
8	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0					
9	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0					
10	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0					
11	0,055	11012	0,021	13513	0,044	25770	0,000	0					

Fonte: O autor.

A Tabela 12 apresenta os resultados para o setor 4-ESE. Nesse setor, o polígono 8 e o polígono 2 são os únicos que exercem influência para a alteração da rosa de rugosidade.

A evolução dos parâmetros de rugosidade para o setor 5-SSE pode ser verificado na Tabela 13. Esse setor experimenta um comportamento muito similar ao 4-ESE.

Tabela 13 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 5-SSE

Setor 5-SSE	Rugosidade no ponto	Distancia para 1ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 1ª mudança [m]	Distancia para 2ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 2ª mudança [m]	Distancia para 3ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 3ª mudança [m]	Distancia para 4ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 4ª mudança [m]	Distancia para 5ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 5ª mudança [m]	Distancia para 6ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 6ª mudança [m]
Original	0,055	278	0,009	745	0,030	2916	0,055	23907	0,013	25694	0,002	28712	0,000
1	0,055	278	0,009	745	0,030	2916	0,055	23907	0,013	25694	0,002	28712	0,000
2	0,055	278	0,009	745	0,030	2916	0,055	23907	0,013	25694	0,002	28712	0,000
3	0,055	278	0,009	745	0,030	2916	0,055	23907	0,013	25694	0,002	28712	0,000
4	0,055	278	0,009	745	0,030	2916	0,055	23907	0,013	25694	0,002	28712	0,000
5	0,055	278	0,009	745	0,030	2916	0,055	23907	0,013	25694	0,002	28712	0,000
6	0,055	278	0,009	745	0,030	2916	0,055	23907	0,013	25694	0,002	28712	0,000
7	0,055	278	0,009	745	0,030	2916	0,055	23907	0,013	25694	0,002	28712	0,000
8	0,054	25694	0,002	28712	0,000	0							
9	0,054	25694	0,002	28712	0,000	0							
10	0,054	25694	0,002	28712	0,000	0							
11	0,054	25694	0,002	28712	0,000	0							

Fonte: O autor.

Tabela 14 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 6-S

Setor 6-S	Rugosidade no ponto	Distancia para 1ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 1ª mudança [m]	Distancia para 2ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 2ª mudança [m]	Distancia para 3ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 3ª mudança [m]	Distancia para 4ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 4ª mudança [m]	Distancia para 5ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 5ª mudança [m]	Distancia para 6ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 6ª mudança [m]
Original	0,055	3342	0,018	6452	0,054	23007	0,000	0					
1	0,055	3342	0,018	6452	0,054	23007	0,000	0					
2	0,055	3342	0,018	6452	0,054	23007	0,000	0					
3	0,055	3342	0,018	6452	0,054	23007	0,000	0					
4	0,055	3342	0,018	6452	0,054	23007	0,000	0					
5	0,055	3342	0,018	6452	0,054	23007	0,000	0					
6	0,055	3342	0,018	6452	0,054	23007	0,000	0					
7	0,055	3342	0,018	6452	0,054	23007	0,000	0					
8	0,055	23005	0,000	0									
9	0,055	23005	0,000	0									
10	0,055	23005	0,000	0									
11	0,055	23005	0,000	0									

Fonte: O autor.

Os resultados para o setor 6-S podem ser verificados na Tabela 14. Nesse setor, é possível verificar que o único polígono cuja remoção altera os resultados do modelo é o polígono 8. Um dos resultados mais interessantes dessa simulação pode ser verificado na Tabela 15 que corresponde ao setor 7-SSW. Aqui fica constatado que em um raio de 20 km (área de interesse), não houve alteração nos parâmetros de rugosidade apesar dos polígonos 9 e 10 estarem dentro desse setor. Estes polígonos estão a cerca de 8 km do ponto de medição e não são suficientemente grandes para refletirem uma mudança na forma como o modelo irá responder a essa alteração. Em resumo se estes polígonos não tivessem sido considerados quando da elaboração do mapa de rugosidade, os resultados permaneceriam inalterados.

Tabela 15 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 7-SSW

Setor 7-SSW	Rugosidade no ponto	Distancia para 1ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 1ª mudança [m]	Distancia para 2ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 2ª mudança [m]	Distancia para 3ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 3ª mudança [m]	Distancia para 4ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 4ª mudança [m]	Distancia para 5ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 5ª mudança [m]	Distancia para 6ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 6ª mudança [m]
Original	0,053	23877	0,013	25670	0,002	28788	0,000	0					
1	0,053	23877	0,013	25670	0,002	28788	0,000	0					
2	0,053	23877	0,013	25670	0,002	28788	0,000	0					
3	0,053	23877	0,013	25670	0,002	28788	0,000	0					
4	0,053	23877	0,013	25670	0,002	28788	0,000	0					
5	0,053	23877	0,013	25670	0,002	28788	0,000	0					
6	0,053	23877	0,013	25670	0,002	28788	0,000	0					
7	0,053	23877	0,013	25670	0,002	28788	0,000	0					
8	0,053	23877	0,013	25670	0,002	28788	0,000	0					
9	0,052	23877	0,013	25670	0,002	28788	0,000	0					
10	0,054	25670	0,002	28788	0,000	0							
11	0,054	25670	0,002	28788	0,000	0							

Fonte: O autor.

O setor 8-WSW está representado pela Tabela 16. Nesse setor o polígono 3 acaba alterando os resultados apesar de sua pequena área devido à proximidade com o ponto de medição.

Tabela 16 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 8-WSW

Setor 8-WSW	Rugosidade no ponto	Distancia para 1ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 1ª mudança [m]	Distancia para 2ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 2ª mudança [m]	Distancia para 3ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 3ª mudança [m]	Distancia para 4ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 4ª mudança [m]	Distancia para 5ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 5ª mudança [m]	Distancia para 6ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 6ª mudança [m]
Original	0,055	5141	0,025	6681	0,049	25806	0,013	27718	0,002	30951	0,000	0	
1	0,055	5141	0,025	6681	0,049	25806	0,013	27718	0,002	30951	0,000	0	
2	0,055	5141	0,025	6681	0,049	25806	0,013	27718	0,002	30951	0,000	0	
3	0,052	25806	0,013	27718	0,002	30951	0,000	0					
4	0,052	25806	0,013	27718	0,002	30951	0,000	0					
5	0,052	25806	0,013	27718	0,002	30951	0,000	0					
6	0,052	25806	0,013	27718	0,002	30951	0,000	0					
7	0,052	25806	0,013	27718	0,002	30951	0,000	0					
8	0,052	25806	0,013	27718	0,002	30951	0,000	0					
9	0,052	25806	0,013	27718	0,002	30951	0,000	0					
10	0,052	27718	0,002	30951	0,000	0							
11	0,052	27718	0,002	30951	0,000	0							

Fonte: O autor.

Tabela 17 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 9-W

Setor 9-W	Rugosidade no ponto	Distancia para 1ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 1ª mudança [m]	Distancia para 2ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 2ª mudança [m]	Distancia para 3ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 3ª mudança [m]	Distancia para 4ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 4ª mudança [m]	Distancia para 5ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 5ª mudança [m]	Distancia para 6ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 6ª mudança [m]
Original	0,049	17436	0,016	24849	0,000	0							
1	0,049	17436	0,016	24849	0,000	0							
2	0,049	17436	0,016	24849	0,000	0							
3	0,049	17436	0,016	24849	0,000	0							
4	0,050	17436	0,016	24849	0,000	0							
5	0,052	17436	0,016	24849	0,000	0							
6	0,052	17436	0,016	24849	0,000	0							
7	0,053	17436	0,016	24849	0,000	0							
8	0,053	17436	0,016	24849	0,000	0							
9	0,053	17436	0,016	24849	0,000	0							
10	0,053	17436	0,016	24849	0,000	0							
11	0,053	17436	0,016	24849	0,000	0							

Fonte: O autor.

A Tabela 17 apresenta os resultados para o setor 9-W. Nesse setor os polígonos 4 e 6 alteram de forma quase que insignificante a média da rugosidade vista pelo modelo nessa direção devido à distância para o ponto de medição e a área dos polígonos. Os resultados para o setor 10-WNW estão apresentados na Tabela 18. Nesse setor a presença dos polígonos 6 e 7 é percebida pelo modelo alterando os parâmetros de rugosidade.

Tabela 18 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 10-WNW

Setor 10-WNW	Rugosidade no ponto	Distancia para 1ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 1ª mudança [m]	Distancia para 2ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 2ª mudança [m]	Distancia para 3ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 3ª mudança [m]	Distancia para 4ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 4ª mudança [m]	Distancia para 5ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 5ª mudança [m]	Distancia para 6ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 6ª mudança [m]
Original	0,047	3323	0,011	3796	0,053	5643	0,028	7851	0,009	8861	0,003	10273	0,001
1	0,047	3323	0,011	3796	0,053	5643	0,028	7851	0,009	8861	0,003	10273	0,001
2	0,047	3323	0,011	3796	0,053	5643	0,028	7851	0,009	8861	0,003	10273	0,001
3	0,047	3323	0,011	3796	0,053	5643	0,028	7851	0,009	8861	0,003	10273	0,001
4	0,047	3323	0,011	3796	0,053	5643	0,028	7851	0,009	8861	0,003	10273	0,001
5	0,047	3323	0,011	3796	0,053	5643	0,028	7851	0,009	8861	0,003	10273	0,001
6	0,055	1331	0,042	3350	0,012	3890	0,047	7851	0,009	8861	0,003	10273	0,001
7	0,055	3350	0,015	3890	0,047	7851	0,009	8861	0,003	10273	0,001	14915	0,000
8	0,051	7851	0,009	8861	0,003	10273	0,001	14915	0,000	0			
9	0,051	7851	0,009	8861	0,003	10273	0,001	14915	0,000	0			
10	0,051	7851	0,009	8861	0,003	10273	0,001	14915	0,000	0			
11	0,051	7851	0,009	8861	0,003	10273	0,001	14915	0,000	0			

Fonte: O autor.

Tabela 19 – Evolução dos parâmetros de rugosidade. Setor 11-NNW

Setor 11-NNW	Rugosidade no ponto	Distancia para 1ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 1ª mudança [m]	Distancia para 2ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 2ª mudança [m]	Distancia para 3ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 3ª mudança [m]	Distancia para 4ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 4ª mudança [m]	Distancia para 5ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 5ª mudança [m]	Distancia para 6ª mudança de rugosidade [m]	Rugosidade após 6ª mudança [m]
Original	0,045	3365	0,004	3565	0,015	5702	0,001	6296	0,000	0			
1	0,045	3365	0,004	3565	0,015	5702	0,001	6296	0,000	0			
2	0,045	3365	0,004	3565	0,015	5702	0,001	6296	0,000	0			
3	0,045	3365	0,004	3565	0,015	5702	0,001	6296	0,000	0			
4	0,045	3365	0,004	3565	0,015	5702	0,001	6296	0,000	0			
5	0,045	3365	0,004	3565	0,015	5702	0,001	6296	0,000	0			
6	0,045	3365	0,004	3565	0,015	5702	0,001	6296	0,000	0			
7	0,055	3344	0,013	5702	0,001	6296	0,000	0					
8	0,055	4677	0,016	5702	0,000	0							
9	0,055	4677	0,016	5702	0,000	0							
10	0,055	4677	0,016	5702	0,000	0							
11	0,054	5702	0,001	6296	0,000	0							

Fonte: O autor.

A Tabela 19 apresenta os resultados para o setor 11-NNW. Nesse setor apenas o polígono 7 e o polígono 8 causam uma alteração significativa nos resultados da modelagem.

A partir desses dados, várias conclusões podem ser extraídas. Primeiramente, podemos dizer que os polígonos 1, 2, 4, 5, 9 e 10 não agregam informação significativa ao modelo para a análise em questão. Outro aspecto que pôde ser verificado é o fato de que quanto maior a distância do polígono para o ponto em que está sendo determinada a rosa de rugosidade, menor é a influência que o mesmo terá em um determinado setor. É importante ter em mente que o modelo WAsP<sup>®</sup> irá calcular uma rosa de rugosidade para cada ponto onde o vento está sendo estimado. Também ficou verificado que executar com perfeição o contorno dos polígonos de rugosidade não agrega valor prático ao modelo tendo em vista que o modelo considera apenas valores médios para o setor ou seções do mesmo.

## 4.2 Análise de sensibilidade do modelo WASP® à rugosidade superficial

O objetivo dessa simulação é avaliar o impacto do erro na definição do parâmetro de rugosidade para fins de extrapolação vertical e horizontal do vento.

### 4.2.1 Extrapolação Horizontal

Para esse estudo, foi considerado um caso hipotético, porém bastante comum, de uma região que possa ser descrita basicamente por 2 comprimentos de rugosidade sendo um deles fixo em 0 m representando o oceano. A partir dessas condições variou-se a rugosidade da área seca entre 0,0003 m e 0,2 m. A Tabela 20 apresenta a descrição das rugosidades superficiais consideradas. Um exemplo real de tais rugosidades pode ser visto na Figura 37, Figura 38, Figura 39 e Figura 40. Essa faixa de valores foi escolhida por abranger a grande parte das condições de rugosidade superficial encontradas nas regiões rurais dos ecossistemas brasileiros. Assume-se para esta análise um terreno plano e a não interferência entre turbinas.

A Figura 41 apresenta as condições do vento consideradas para as torres de medição 1 e 2. Uma rosa unidirecional foi adotada para simplificar o entendimento de como a rugosidade superficial influencia a extrapolação horizontal.

**Tabela 20 – Comprimentos de rugosidade considerados**

Tipo de cobertura do solo	Valor aproximado de $z_0$ [m]
Zona rural com muitas árvores e casas	0,2
Zona rural com plantações	0,1
Zona rural sem plantações	0,05
Zona rural com poucas árvores e casas isoladas	0,03
Superfície coberta por areia	0,0003
Superfície coberta por água (lagos, mar aberto, etc.)	0,0001

**Fonte: Adaptado de (WASP, 2007).**

**Figura 37 – Exemplo de condições superficiais associadas a um comprimento de rugosidade  $z_0 = 0,0003$  m**



**Fonte: O autor**

**Figura 38 – Exemplo de condições superficiais associadas a um comprimento de rugosidade  $z_0 = 0,03$  m**



**Fonte: O autor.**

**Figura 39 – Exemplo de condições superficiais associadas a um comprimento de rugosidade  $z_0 = 0,1$  m**



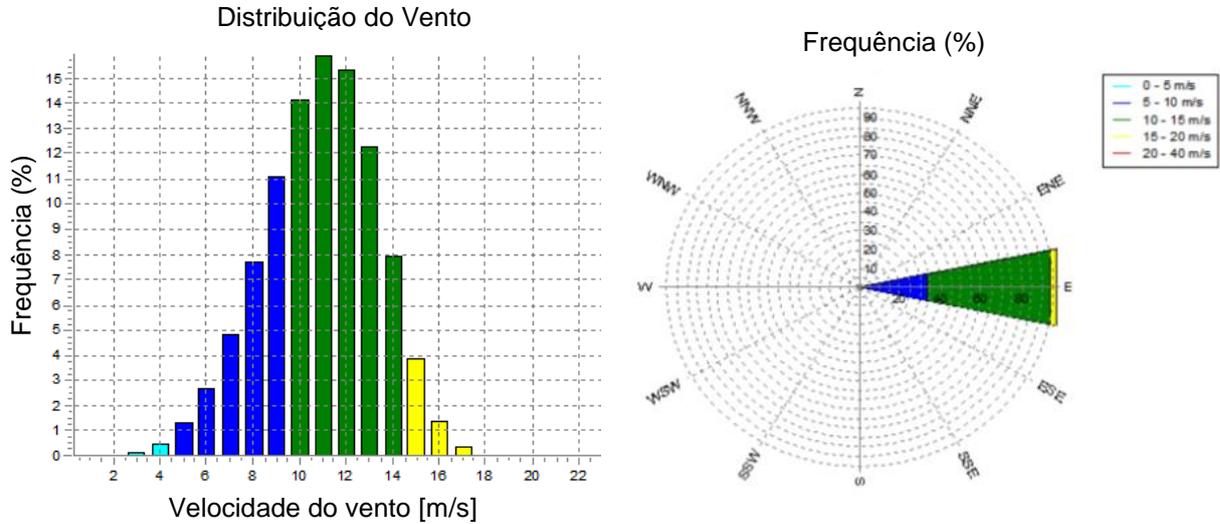
Fonte: O autor.

**Figura 40 – Exemplo de condições superficiais associadas a um comprimento de rugosidade  $z_0 = 0,2$  m**



Fonte: O autor.

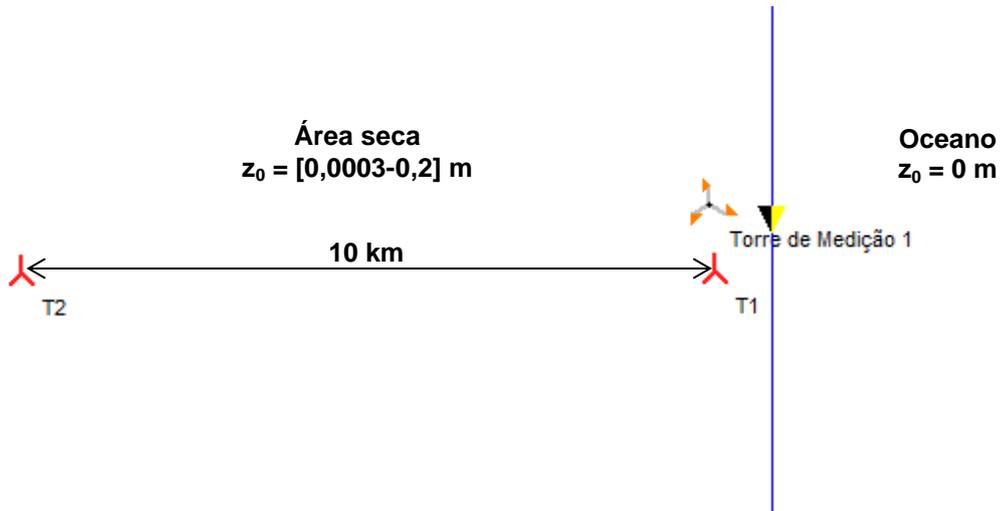
**Figura 41 – Condições climáticas assumidas para a Torre de Medição 1 e para a Torre de Medição 2.**



**Parâmetros de Weibull: K=5,0 e A=11,8 m/s. Fonte: O autor.**

No primeiro estudo de caso, denominado a partir deste ponto de Simulação 1, optou-se por posicionar a torre de medição próxima à região da mudança de rugosidade. Nestas condições o modelo WAsP<sup>®</sup> foi utilizado para estimar as condições de vento em uma posição a cerca de 10 km a oeste da torre de medição conforme ilustrado na Figura 42. Os resultados da velocidade de vento estimada ao variar a rugosidade podem ser verificados na Tabela 21.

**Figura 42 – Cenário hipotético para a Simulação 1**



**Fonte: O autor.**

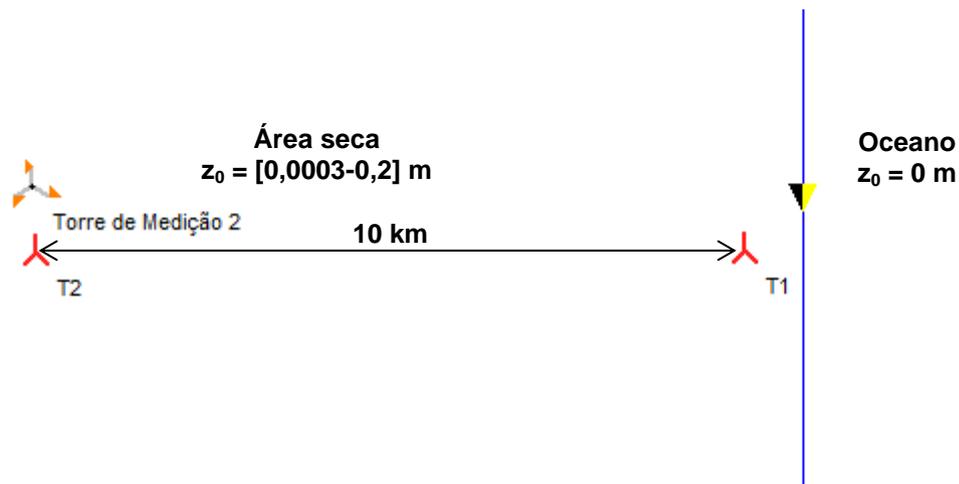
Tabela 21 – Resultados para a Simulação 1.

$z_0$ [m]	V_T1	V_T2	Diferença
0,0003	10,8 m/s	10,8 m/s	0%
0,03	10,8 m/s	9,7 m/s	-10%
0,1	10,8 m/s	9,1 m/s	-16%
0,2	10,7 m/s	8,7 m/s	-19%

Fonte: O autor

O segundo estudo de caso, denominado a partir deste ponto de Simulação 2, consiste em deslocar a torre de medição para um ponto 10 km a oeste no interior do terreno e estimar as condições de vento nas proximidades da região na qual ocorre a mudança de rugosidade. A Figura 43 ilustra o cenário considerado para a Simulação 2. Os resultados da velocidade de vento estimada ao variar a rugosidade para este estudo de caso podem ser verificados na Tabela 22.

Figura 43 – Cenário hipotético para a Simulação 2



Fonte: O autor.

Tabela 22 – Resultados para a Simulação 2.

$z_0$ [m]	V_T1	V_T2	Diferença
0,0003	10,8 m/s	10,8 m/s	0%
0,03	12,1 m/s	10,7 m/s	-12%
0,1	13,1 m/s	10,8 m/s	-18%
0,2	13,8 m/s	10,8 m/s	-22%

Fonte: O autor

A partir dos resultados apresentados fica claro que a definição imprecisa do comprimento de rugosidade pode ter um impacto muito grande nos resultados estimados de produção do projeto. A Tabela 21 e a Tabela 22 apresentam as diferenças percentuais em termos de velocidade do vento. O impacto dessa variação na energia é amplificado tendo em vista que a potência do vento é proporcional ao cubo da velocidade. Com os baixos preços praticados hoje no mercado de energia eólica no Brasil, um simples desvio na modelagem do mapa de rugosidade pode facilmente tornar um projeto financeiramente inviável.

Hoje existem vários estudos no sentido de avaliar o impacto da orografia do terreno nas estimativas de produção, porém, não foram encontradas muitas recomendações com relação a erros provenientes do modelo de rugosidade. A fim de reduzir os erros provenientes da extrapolação horizontal, recomenda-se aumentar o número de torres de medição anemométrica de acordo com a área de abrangência do projeto e complexidade do terreno. A Tabela 23 apresenta algumas recomendações práticas com relação ao raio de cobertura de uma torre de medição, em um determinado terreno, de acordo com sua complexidade. Caso estas recomendações sejam levadas em conta e realizando o mapa de rugosidade com o devido cuidado e critério, os erros de modelagem podem ser minimizados a níveis aceitáveis.

**Tabela 23 – Raio de cobertura de uma torre de medição**

Terreno <sup>7</sup>	Máxima distância entre a torre de medição e a turbina
Simple (plano)	5 km
Moderadamente complexo	1 km
Muito Complexo	0,5 km

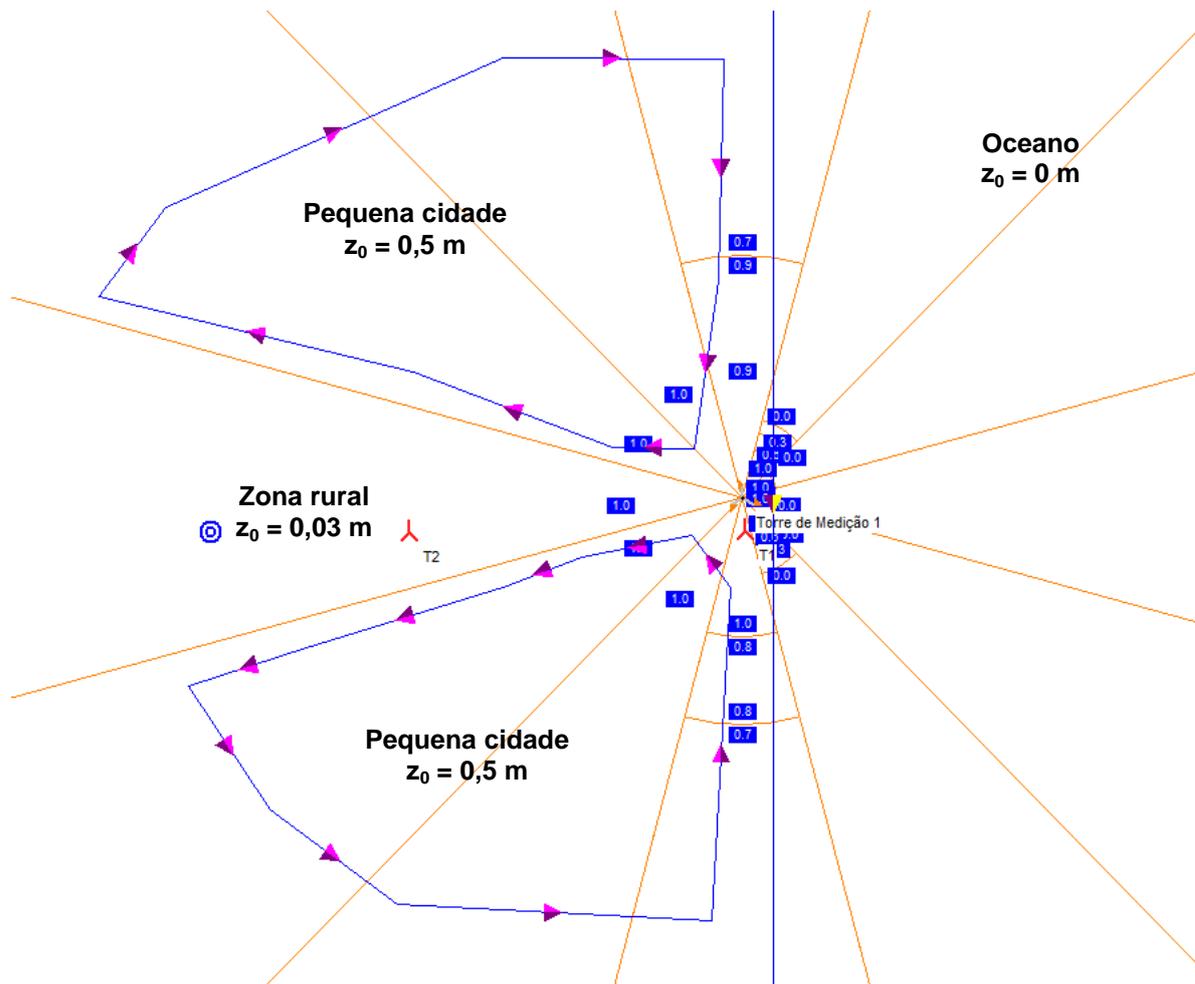
Fonte: (VESTAS WIND SYSTEMS, 2009)

O regime de vento no nordeste brasileiro é caracterizado por uma rosa de ventos uniforme e unidirecional. O terceiro estudo de caso tem por objetivo avaliar a sensibilidade do modelo de rugosidade a mudanças de rugosidade em setores onde

<sup>7</sup> O grau de complexidade do terreno pode ser determinado através de um cálculo RIX (MORTENSEN, BOWEN e IOANNIS, 2006) em cada posição estudada do projeto.  $RIX < 5\%$  é considerado plano;  $5\% < RIX < 20\%$  é moderadamente complexo;  $RIX > 20\%$  é considerado muito complexo.

não existe uma incidência de vento significativa. Para tal, o estudo de caso apresentado na Simulação 1 com uma rugosidade da área seca  $z_0 = 0,03$  m foi tomado como referencia de comparação. Polígonos com rugosidade alta ( $z_0 = 0,5$  m) foram adicionados nas adjacências do projeto conforme ilustrado na Figura 44.

**Figura 44 – Cenário hipotético para a Simulação 3**



Fonte: O autor.

Os resultados da velocidade de vento estimados nas posições T1 e T2 após a inserção das novas áreas de rugosidade podem ser vistos na Tabela 24. Comparando o resultado obtido com a Tabela 21 fica constatado que o modelo é sensível também à rugosidade em áreas adjacentes ao setor onde o vento está concentrado. Esse resultado é coerente tendo em vista que o vento deve ser modelado como um fluido contínuo onde cada parcela de ar interage com as parcelas vizinhas. É interessante notar que a influência, apesar de existir, é pequena. Neste exemplo consideramos uma vasta área na vizinhança com rugosidade equivalente à existência de uma pequena cidade ( $z_0 = 0,5$  m) e ainda assim verificou-se uma mudança de -10% para -11% em relação ao resultado anterior. Assim, também podemos concluir que os setores com maior incidência do vento devem receber atenção redobrada em detrimento de outros setores com menor influência nos resultados.

**Tabela 24 – Resultados para a Simulação 3.**

$z_0$ [m]	V_T1	V_T2	Diferença
0,03	10,8 m/s	9,6 m/s	-11%

Fonte: O autor

#### 4.2.2 Extrapolação Vertical

Conforme foi visto na seção 2.2.3, o comprimento de rugosidade é um dos parâmetros considerados para a extrapolação vertical no modelo WAsP<sup>®</sup>. Nesta seção, um estudo de caso será considerado para a verificação dessa influência nas estimativas dos parâmetros eólicos.

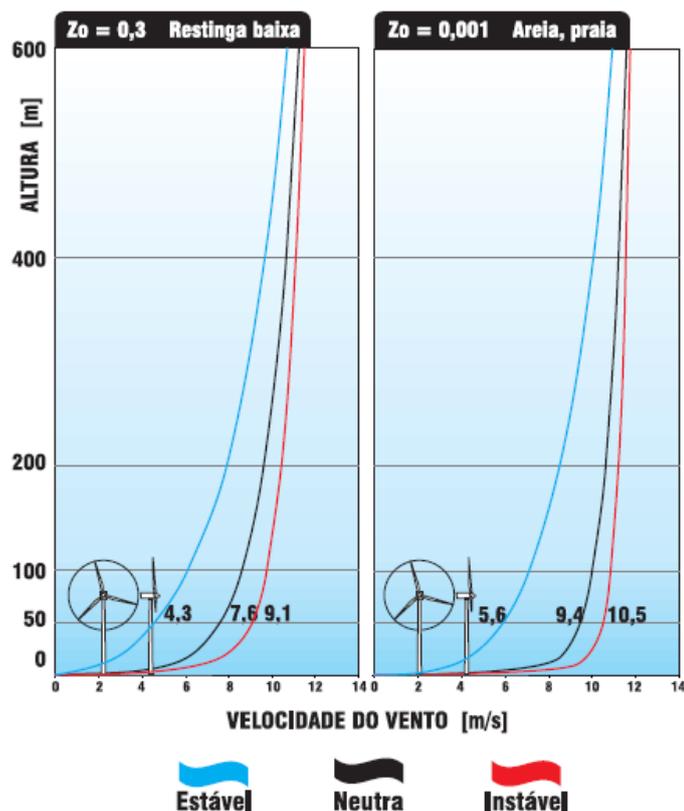
Com o avanço da tecnologia de aerogeradores, a altura das torres tem aumentado chegando a níveis acima de 100 metros. Ainda é comum encontrar torres de medição com altura de 50 e 60 metros no Brasil. Caso a altura de medição não coincida com a altura do aerogerador o modelo WAsP<sup>®</sup> é capaz de extrapolar as condições de vento para a altura desejada a fim de realizar as estimativas de produção de energia.

Dentro da camada limite superficial, o vento é bastante influenciado pelas condições de relevo e rugosidade do terreno, presença de obstáculos e estabilidade

atmosférica. A Figura 45 ilustra o perfil vertical de velocidades em dois locais planos, com cobertura de restinga e areia, respectivamente. Fica evidente que a rugosidade e estabilidade têm grande influência na forma do perfil (AMARANTE, SILVA e ANDRADE, 2010).

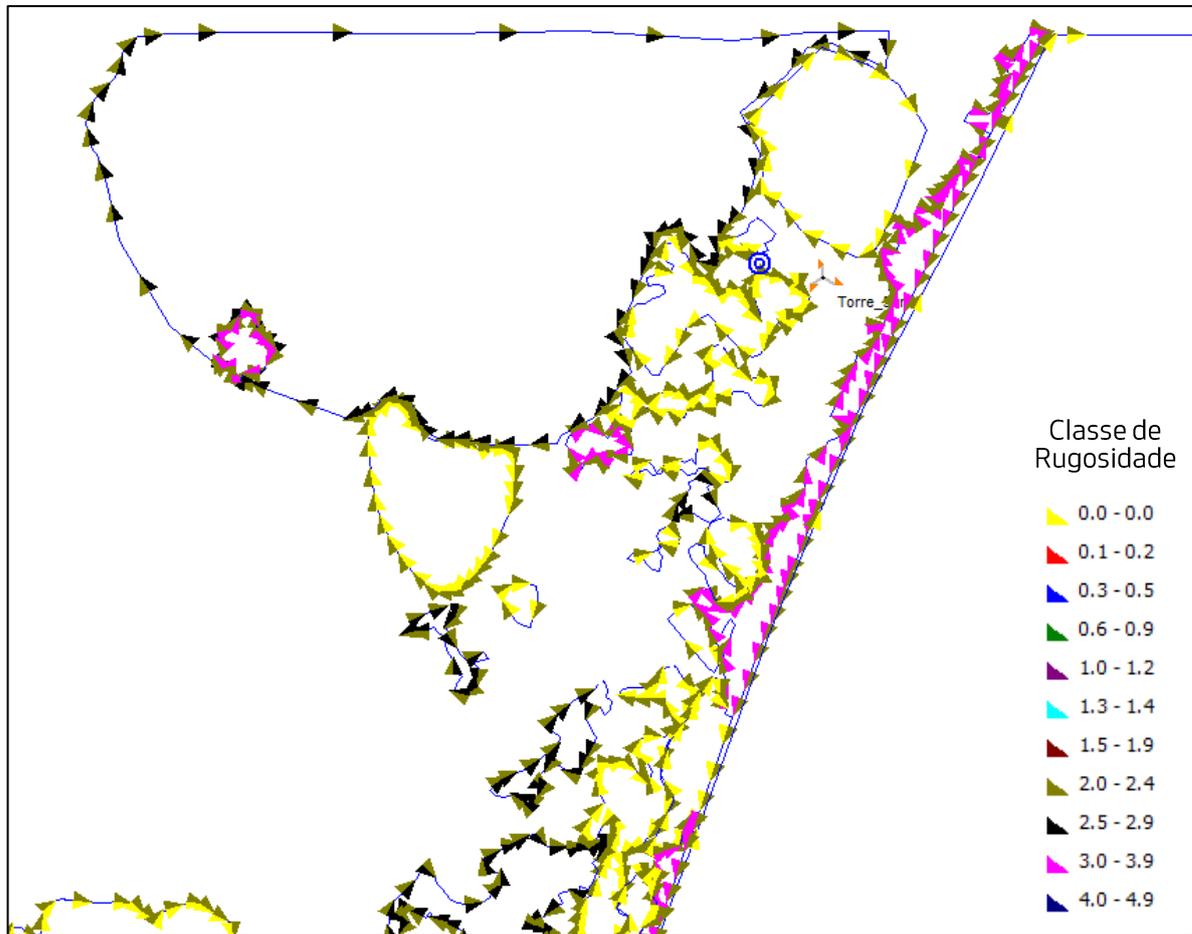
Para avaliar o impacto do comprimento de rugosidade nas estimativas do perfil vertical da velocidade do vento, um estudo de caso real para um projeto no Brasil foi considerado. Devido a questões de confidencialidade, apenas as informações relevantes ao estudo serão apresentadas. As poligonais delimitando as diferentes características superficiais foram feitas e foi então solicitado a dois experientes usuários do modelo WAsP<sup>®</sup> que eles definissem os comprimentos de rugosidade para os polígonos baseando-se em imagens de satélite. A Figura 46 e a Figura 47 apresentam os diferentes mapas gerados. Uma diferença marcante foi detectada entre os mapas. Um dos usuários definiu que a maior área do projeto, incluindo a área em que se encontra a torre de medição, como tendo uma rugosidade de  $z_0 = 0,1$  m enquanto que outro usuário considerou que o valor que melhor representaria essa mesma área seria  $z_0 = 0,03$  m.

**Figura 45 – Influência da rugosidade e estabilidade térmica no perfil vertical da velocidade de vento.**



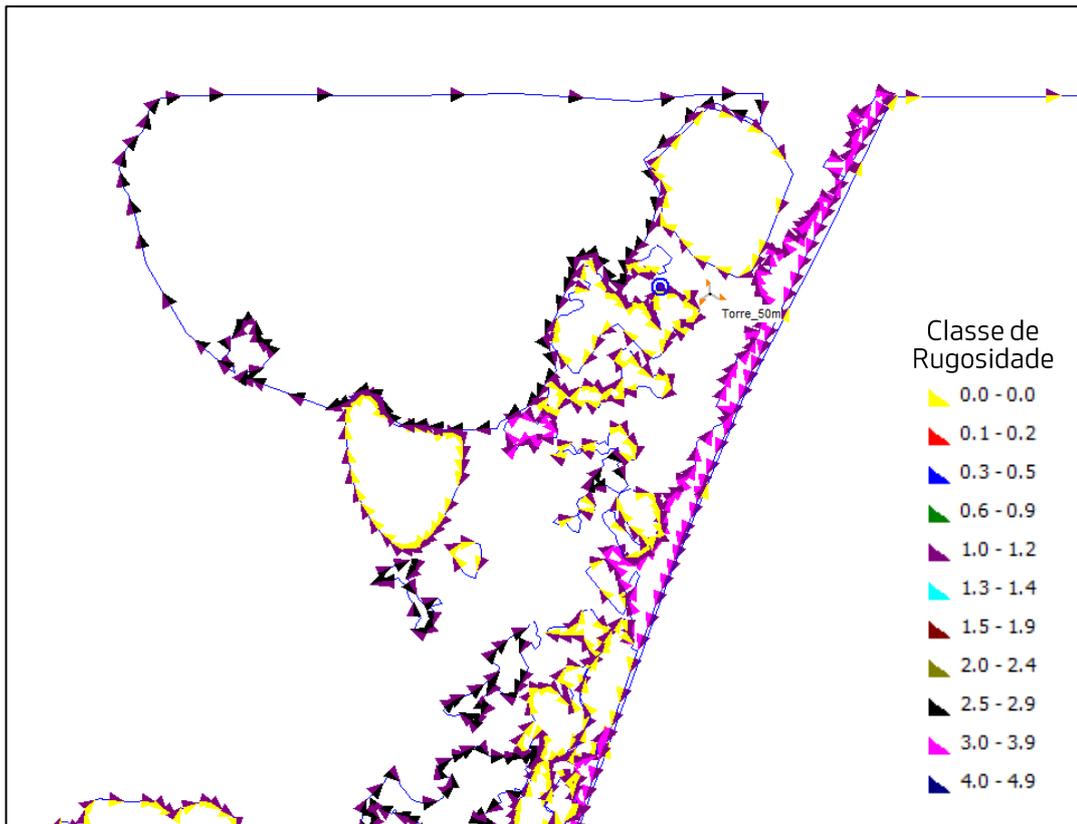
Fonte: (AMARANTE, SILVA e ANDRADE, 2010).

Figura 46 – Mapa de rugosidade com rugosidade geral  $z_0 = 0,1$  m



Fonte: O autor.

Figura 47 – Mapa de rugosidade com rugosidade geral  $z_0 = 0,03$  m

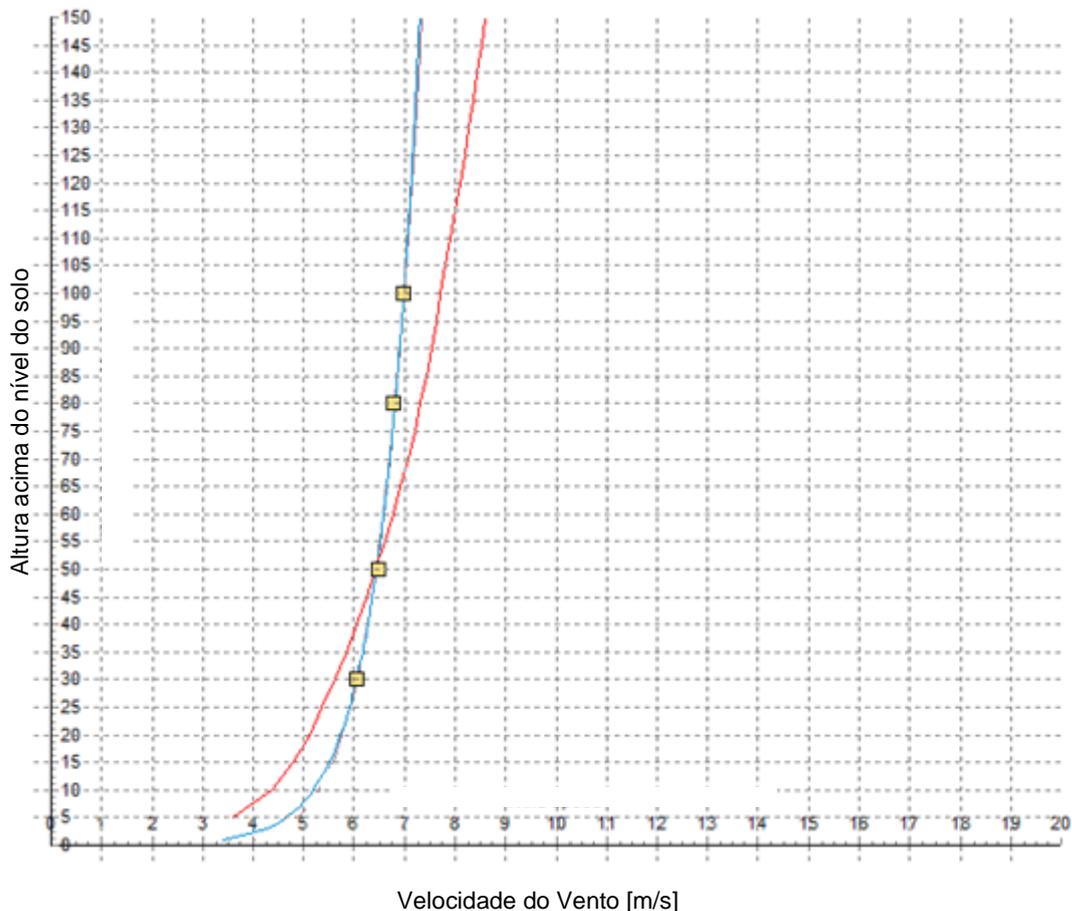


Fonte: O autor.

O impacto na geração do perfil de vento pode ser visto na Figura 48 e na Figura 49. Após uma visita ao local do projeto, constatou-se que a rugosidade que melhor descreve a região é  $z_0 = 0,03$  m.

Um aspecto que é importante salientar nessa altura é o fato de que a imagem de satélite, apesar de nítida, muitas vezes não possui resolução suficiente para garantir o tipo de cobertura superficial. Por se tratar de uma imagem em duas dimensões não é possível confirmar a altura da vegetação que cobre o terreno. Essa foi a fonte do erro no processo de modelagem entre os especialistas. Ao analisar as imagens de satélite, verificou-se um terreno com uma cobertura densa de vegetação identificada através de uma coloração verde escura intensa. Um especialista que não conheça os biomas característicos daquela região poderia supor que a imagem se refere a uma vegetação arbustiva densa enquanto que na verdade se trata de uma cobertura gramínea.

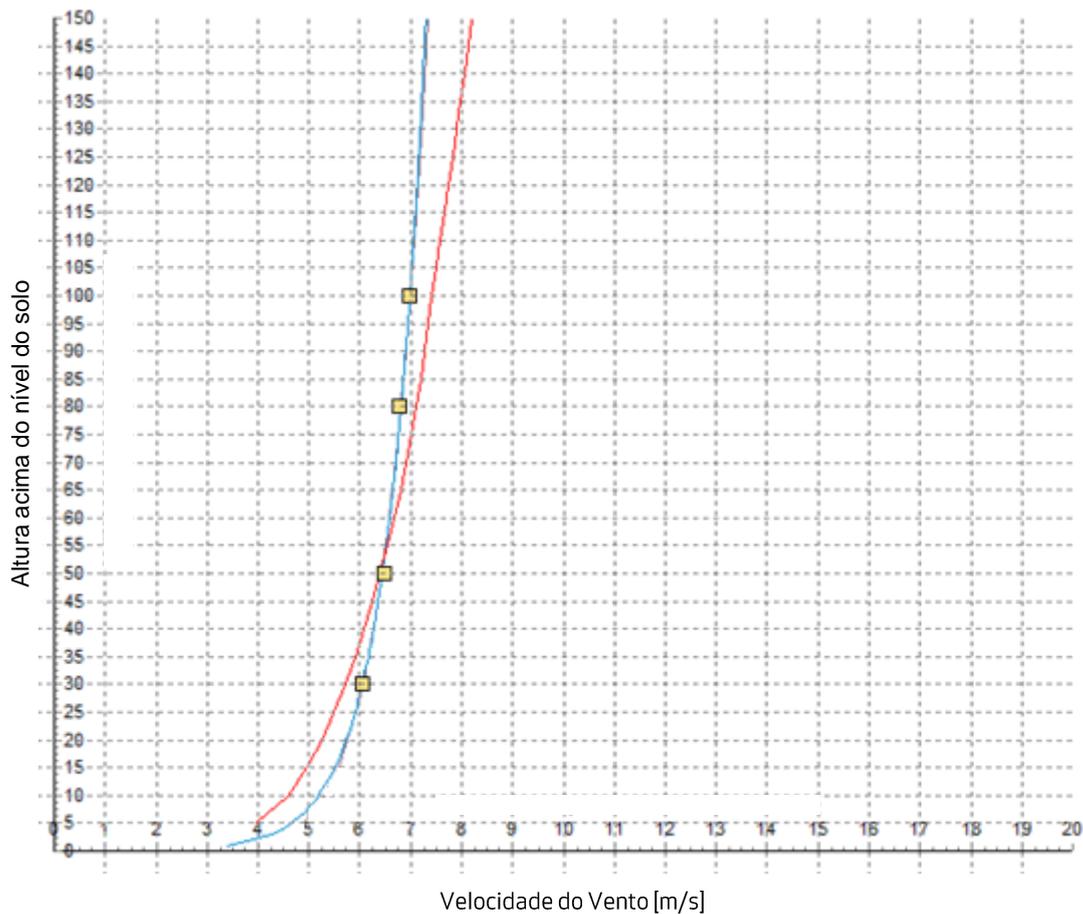
**Figura 48 – Perfil vertical da velocidade do vento para mapa com rugosidade geral  
 $z_0 = 0,1$  m**



**A linha vermelha descreve o perfil vertical da velocidade do vento para mapa com rugosidade geral  $z_0 = 0,1$  m. A linha azul representa o perfil de vento que foi gerado baseado na lei da potência usando dados medidos nas alturas de 50 m e 30 m. Os pontos amarelos indicados nas alturas de 80 m e 100 m indicam a velocidade do vento extrapolada a partir dos pontos inferiores. Fonte: O autor.**

Fica então constatado que, ao executar um trabalho de modelagem da rugosidade de um terreno, o especialista não deve se deter apenas em imagens de satélite, mas também fazer uma pesquisa buscando caracterizar os principais biomas da região, se possível, avaliando relatórios ambientais disponíveis. A modelagem só deve ser considerada conclusiva após uma visita ao local confirmando as premissas assumidas a partir de relatórios fotográficos.

**Figura 49 – Perfil vertical da velocidade do vento para mapa com rugosidade geral  $z_0 = 0,03$  m**



**A linha vermelha descreve o perfil vertical da velocidade do vento para mapa com rugosidade geral  $z_0 = 0,03$  m. A linha azul representa o perfil de vento que foi gerado baseado na lei da potência usando dados medidos nas alturas de 50 m e 30 m. Os pontos amarelos indicados nas alturas de 80 m e 100 m indicam a velocidade do vento extrapolada a partir dos pontos inferiores. Fonte: O autor.**

Tomando uma altura do cubo de 100 metros como exemplo, iremos encontrar uma diferença nas estimativas da velocidade de vento em torno de 6%. Um erro dessa magnitude pode ser crucial para a definição de viabilidade financeira do projeto. Como conclusão desse estudo, fica claro que a extrapolação vertical pode impactar consideravelmente as estimativas de energia.

A fim de mitigar esse erro, é recomendado que a torre de medição tenha medições na altura do cubo do aerogerador planejado para o projeto. Se essa condição não for possível, então a torre anemométrica deve ter medições em pelo menos duas alturas e representativas das condições de vento na altura do cubo, isto

é, as medições devem ser tomadas a no mínimo 80% da altura do cubo. O espaçamento adequado entre as alturas representativas de medição é necessário a fim de obter uma boa representação de todo o perfil da velocidade do vento. A separação entre os níveis de medição deve ser maior que 50% da altura da torre de medição com o nível de medição inferior a uma altura maior que toda a vegetação ao redor e outros obstáculos representativos por uma boa margem de pelo menos 15 m. O perfil medido será importante para validar o perfil estimado pelo WASP<sup>®</sup>, uma vez que o modelo apenas aceita medições em 1 altura (VESTAS WIND SYSTEMS, 2009).

### **4.3 Sensibilidade do modelo de carga em turbinas eólicas à rugosidade superficial**

Sabe-se que a rugosidade superficial altera as condições de turbulência estimada em um parque eólico. De acordo com a robustez da máquina projetada as turbinas são classificadas em classes.

A norma IEC 61400-1 (2005, 3<sup>a</sup> edição), determina a classe dos aerogeradores através dos parâmetros: velocidade de vento de referência e intensidade de turbulência de referência do parque. Uma turbina especificada em uma classe de turbinas eólicas com uma velocidade de vento de referência ( $V_{ref}$ ) é projetada para resistir a um vento extremo, cuja velocidade média durante 10 minutos, com um período de recorrência de 50 anos na altura do eixo da turbina, seja inferior ou igual a  $V_{ref}$ . A intensidade de turbulência de referência é o valor esperado, na altura do cubo, da intensidade de turbulência para a velocidade média do vento durante 10 minutos na faixa de 14,5 a 15,5 m/s. A turbulência tem um papel muito importante na vida útil da turbina devido ao fato de ser agente motriz para que ocorram falhas por fadiga (BURTON, SHARPE, *et al.*, 2001). A Tabela 25 apresenta os parâmetros básicos para a determinação da classe dos aerogeradores.

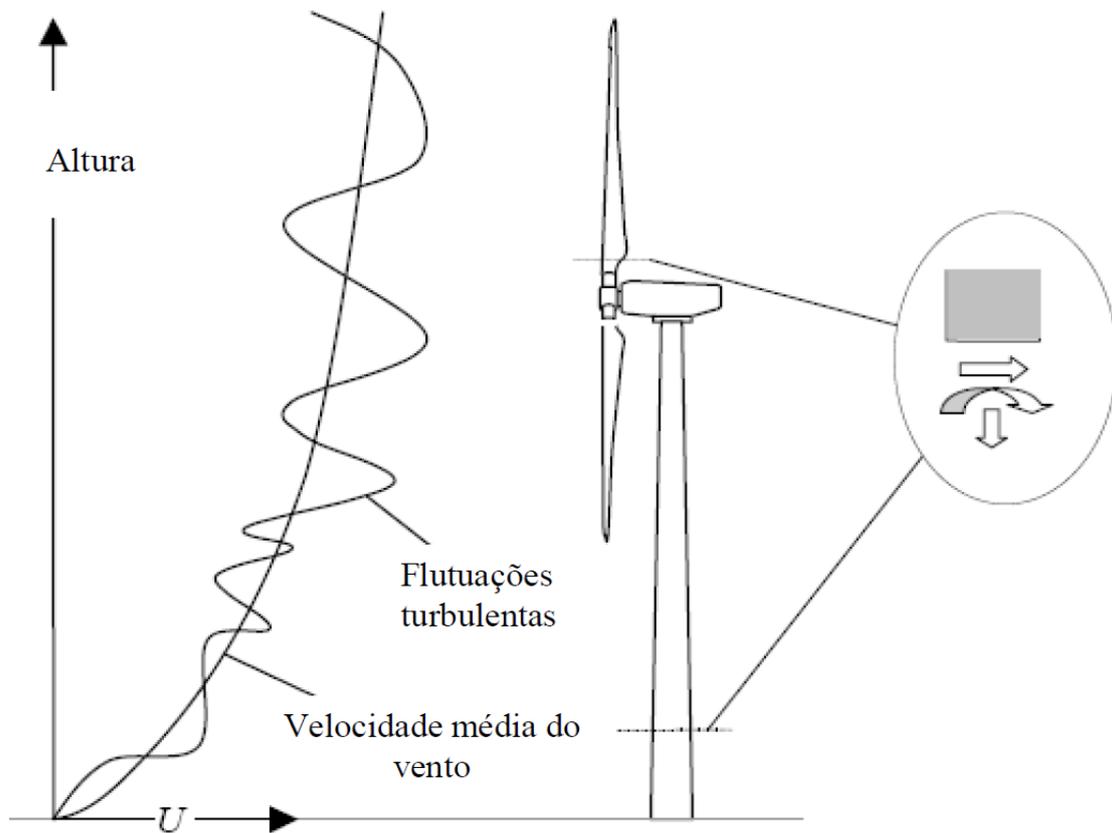
Tabela 25 – Parâmetros básicos para a classe de aerogeradores (IEC61400-1).

Classe de turbinas eólicas	I	II	III	S
$V_{ref}$ (m/s)	50	42,5	37,5	Valores especificados pelo fabricante
$A I_{ref}$ (-)		0,16		
$B I_{ref}$ (-)		0,14		
$C I_{ref}$ (-)		0,12		

Fonte: Adaptado de (IEC61400-1, 2005).

O vento é a principal fonte de carga na turbina. Descrever o vento em termos de um perfil vertical médio e nas flutuações turbulentas ao redor da média, conforme ilustrado na Figura 50, simplifica o modelamento do estudo de cargas. O projeto de uma turbina deve levar em consideração tanto a carga extrema como a fadiga dos componentes sendo a fadiga o fator mais crítico para a definição do projeto. A resposta dinâmica da turbina que pode resultar em falhas por fadiga é governada, principalmente, pelas flutuações na velocidade de vento turbulento (FRENDSEN, 2007). Sendo assim, ao realizar a locação das turbinas de um parque eólico devem-se evitar, ao máximo, os pontos de maior turbulência em uma determinada área.

Figura 50 – Carregamento do vento em uma estrutura de turbina eólica



A velocidade do vento é decomposta em duas componentes: a média de 10 minutos e a flutuação ao redor da média (intensidade de turbulência). A partir de cálculos estruturais é possível determinar as forças no rotor, flexão e fadiga dos componentes. Fonte: Adaptado de (FRENDSEN, 2007)

O objetivo desse estudo de caso é avaliar o impacto da rugosidade no aumento da intensidade de turbulência em um parque eólico. Devido a questões de confidencialidade, os resultados serão apresentados de forma qualitativa. A análise será restrita a verificar como varia a turbulência média estimada nas turbinas ao aumentar a rugosidade superficial na região do parque eólico.

O cálculo de turbulência média foi feito usando o software VestasFOAM para resolver numericamente as equações de média de Reynolds (Reynolds Average Navier-Stokes – RANS) para o fluxo de vento sobre o domínio do parque eólico. O software utiliza algoritmos automáticos de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) que calculam muitos resultados para todas as direções do vento, incluindo:

- Os valores de  $I_{ref}$  na altura do cubo apresentados em um gráfico de cores onde o vermelho indica as áreas mais turbulentas e o azul as menos turbulentas;

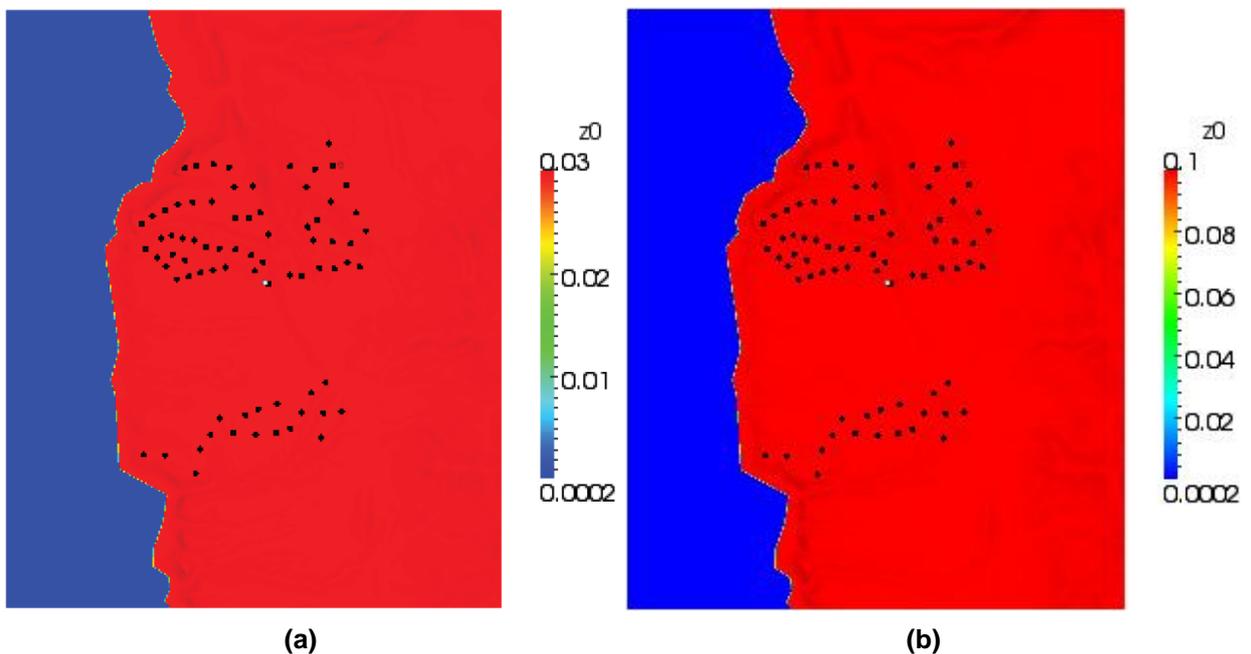
- Ângulo de entrada do vento no rotor da turbina (*inflow angle*);
- Perfil vertical de velocidade do vento ao longo do rotor;
- Direção do vento na parte superior e inferior do rotor.

A fim de comparar a sensibilidade da geração de turbulência com a variação da rugosidade, um estudo CFD foi feito considerando os comprimentos de rugosidade  $z_{01} = 0,03$  m e  $z_{02} = 0,1$  m conforme ilustrado na Figura 51.

Um parque eólico hipotético contendo 83 turbinas e 1 torre de medição foi escolhido. O domínio do projeto é caracterizado por uma grande área coberta por água a oeste e uma área seca com comprimento de rugosidade uniforme a leste. Sabe-se que a rugosidade real da área seca é  $z_0 = 0,03$  m.

Um resumo dos dados anemométricos medidos está descrito na Tabela 26. As condições climáticas para o projeto podem ser verificadas na Tabela 27 e a rosa dos ventos está ilustrada Figura 52.

Figura 51 – Mapas de rugosidade com distintos comprimentos de rugosidade para a área seca (vermelha).



Rugosidade em (a):  $z_{01} = 0,03$  m. Rugosidade em (b):  $z_{02} = 0,1$  m. Fonte: O autor.

Tabela 26 – Sumário dos dados de vento medidos.

Sector	Ângulo	A	K	Freq [%]
1	0	4,4	1,6	5,1
2	30	5,8	1,7	5,6
3	60	3,2	0,9	1,7
4	90	2,1	2,2	1,1
5	120	3,0	2,2	2,8
6	150	8,4	1,8	25,5
7	180	9,3	2,3	35,4
8	210	6,6	2,8	10,4
9	240	3,9	3,2	3,2
10	270	3,3	2,8	2,2
11	300	4,0	2,6	3,2
12	330	4,4	1,6	3,9

Fonte: O autor.

Tabela 27 – Condições climáticas para a Simulação 4.3.

Parâmetro	Símbolo	Média do Site	Máximo do Site	Unidade
Condições de vento normais (anual)				
Parâmetro de escala de Weibull	A	7,3	8,2	[m/s]
Parâmetro de forma de Weibull	K	1,6	1,6	[-]
Velocidade média do vento	$V_{ave}$	6,5	7,3	[m/s]
Intensidade de turbulência média em 15 m/s	$I_{ref}^8$	5,0	5,0	%
Desvio padrão de $I_{ref}$	$\sigma_{Iref}$	2,4	2,4	%
Expoente de gradiente vertical <sup>9</sup>	$\alpha$	0,21	-0,02/0,44	[-]
Mínima distância relativa entre turbinas	-		2,4	[Diâmetro do rotor]

Fonte: O autor.

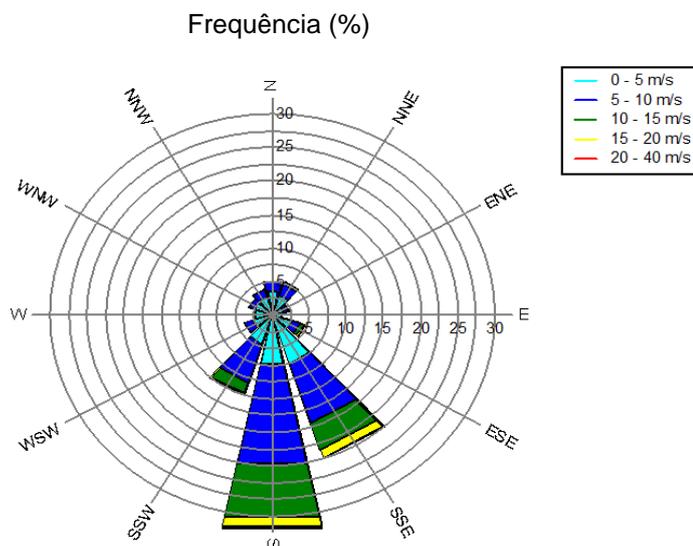
<sup>8</sup>  $I_{ref}$  é o valor esperado da intensidade de turbulência na altura do cubo extraída das médias de 10 minutos no intervalo de 14,5 – 15,5 m/s, conforme definido pela IEC61400-1 Edition 3.

$$I = \frac{\text{Desvio Padrão}_{10MIN.}}{\text{Velocidade Média}_{10MIN.}} \cdot 100\%$$

<sup>9</sup>  $\alpha$  é o expoente de gradiente vertical que expressa a variação da velocidade de vento com a altura.

$$\alpha = \frac{\log \left( \frac{WS_1}{WS_0} \right)}{\log \left( \frac{H_1}{H_0} \right)}$$

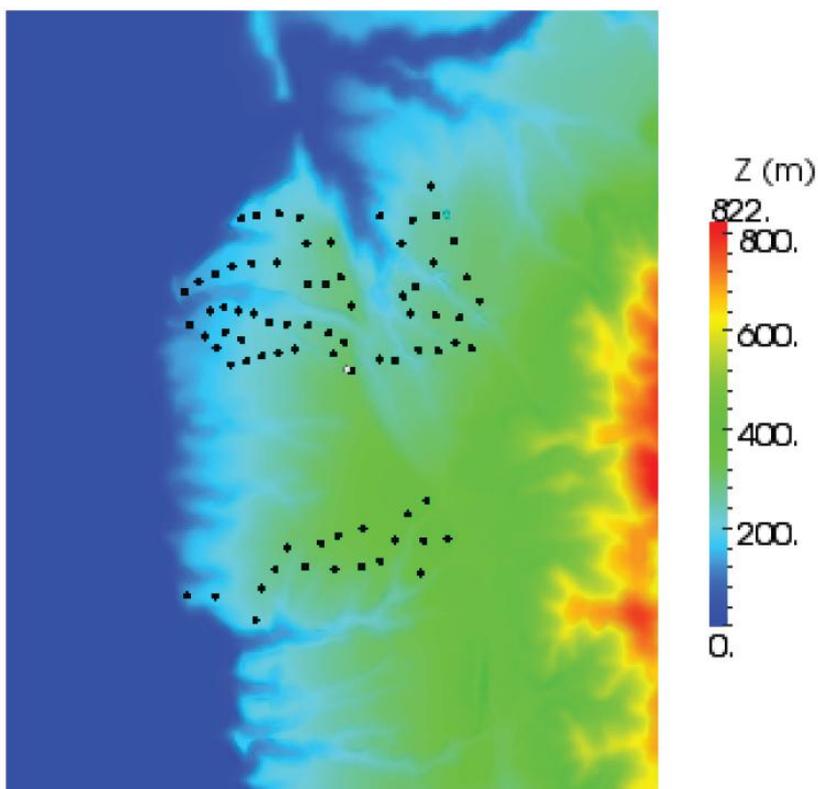
**Figura 52 – Rosa dos ventos para Simulação 4.3.**



Fonte: O autor.

A Figura 53 apresenta as características topográficas do terreno e a posição das turbinas (pontos pretos) e torre anemométrica (ponto branco).

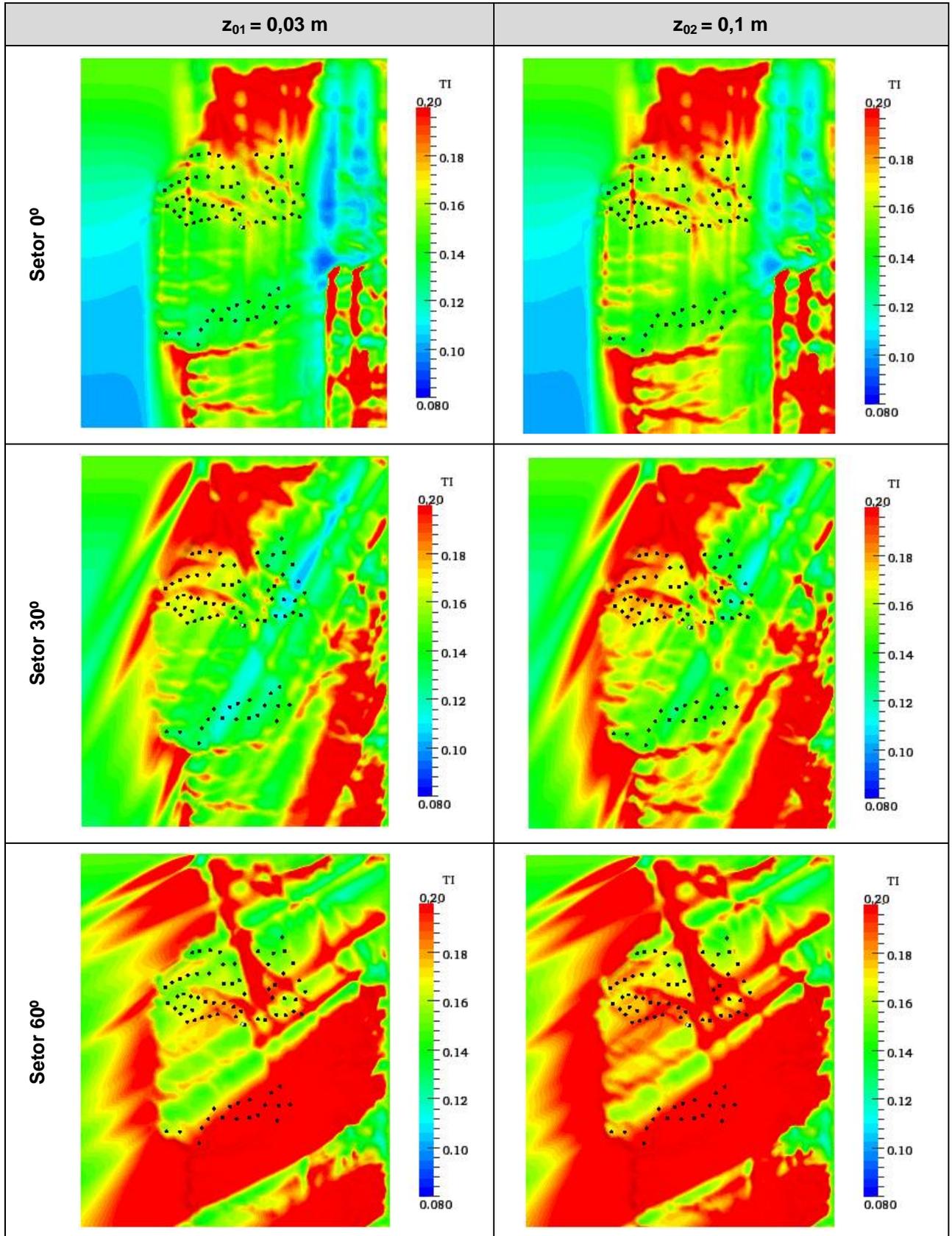
**Figura 53 – Mapa topográfico com a posição das turbinas e torre anemométrica**



Os pontos pretos representam a posição das turbinas. A torre anemométrica está representada pelo ponto branco na região central do parque eólico. Fonte: O autor.

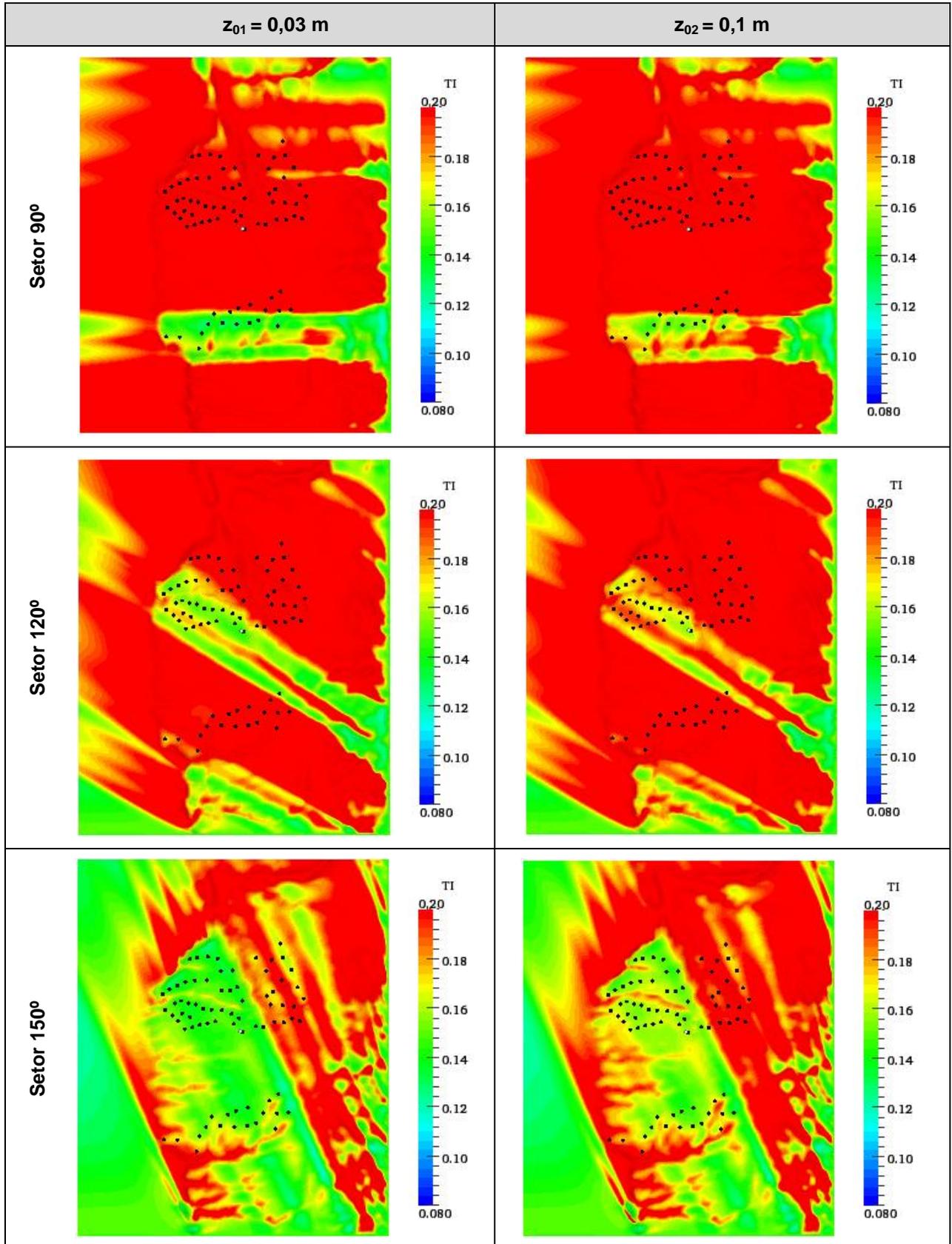
Como resultado desse estudo é possível gerar mapas a fim de dar uma impressão geral das condições esperadas no parque eólico em termos de intensidade de turbulência que é o fator dominante para a ocorrência de falhas por fadiga. O vento é simulado em cada um dos 12 setores cobrindo assim todas as direções ao redor da turbina, sendo que as direções mais importantes são aquelas em que há maior incidência de vento. A Figura 54, Figura 55, Figura 56 e a Figura 57 apresentam os mapas com os resultados da simulação.

Figura 54 – Mapa de intensidade de turbulência na altura do cubo da turbina para os setores  $0^\circ - 60^\circ$



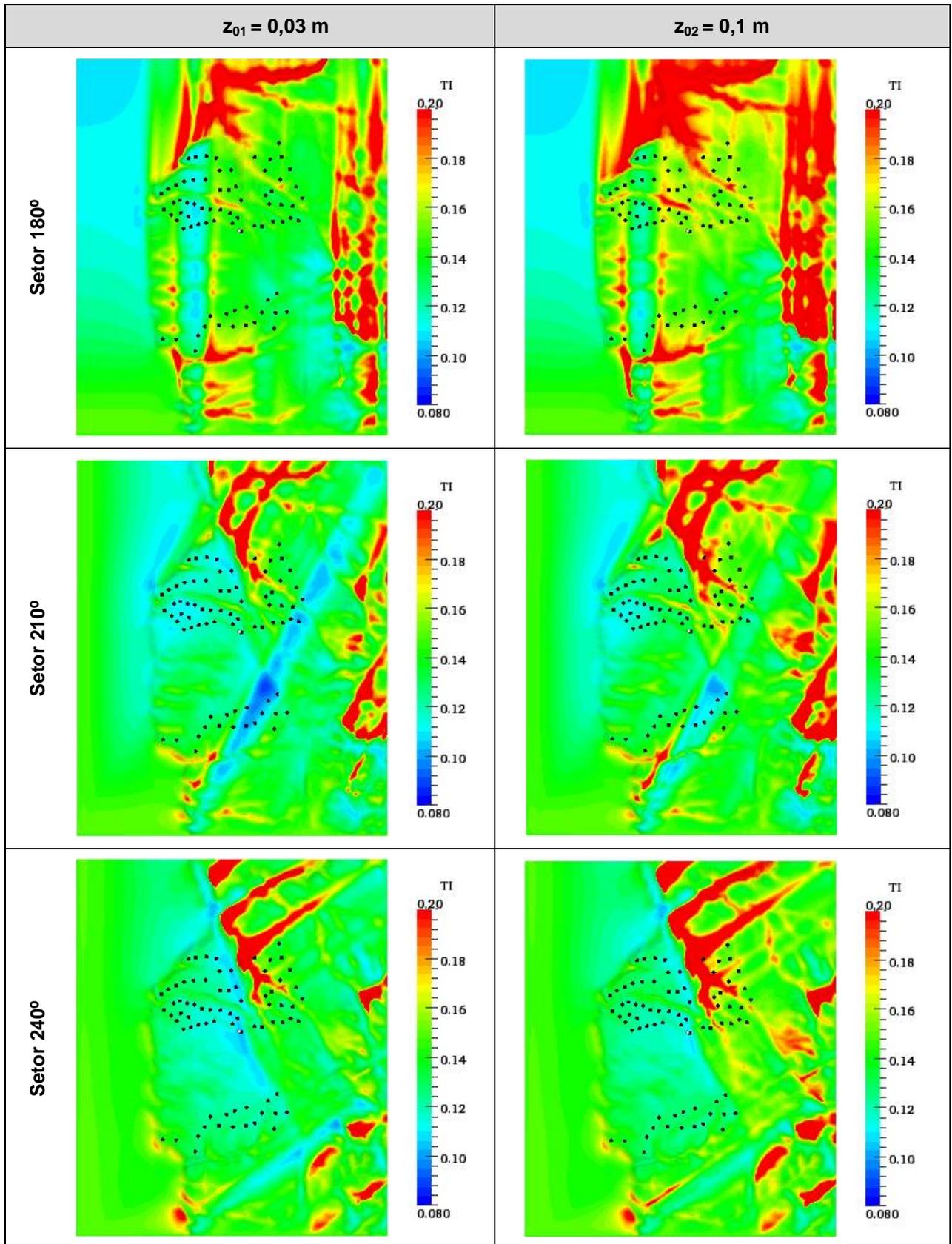
Fonte: O autor.

Figura 55 – Mapa de intensidade de turbulência na altura do cubo da turbina para os setores 90° - 150°



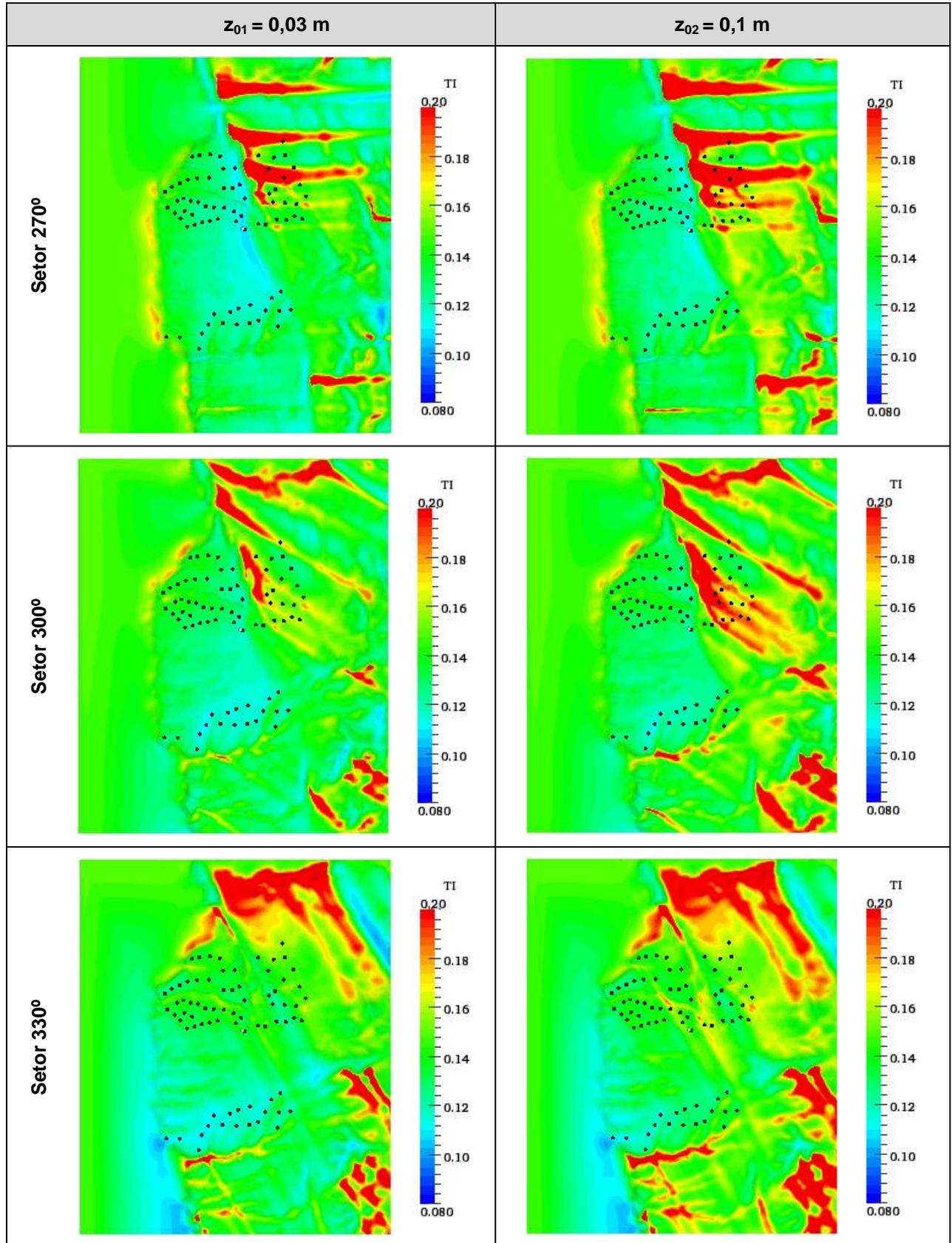
Fonte: O autor.

Figura 56 – Mapa de intensidade de turbulência na altura do cubo da turbina para os setores 180° - 240°



Fonte: O autor.

Figura 57 – Mapa de intensidade de turbulência na altura do cubo da turbina para os setores 270° - 330°



Fonte: O autor.

Baseando-se na rosa de ventos, é possível verificar que os setores de maior incidência de vento e, portanto, os de maior interesse para o projeto são: 150°, 180° e 210°. A Figura 55 demonstra que o vento no setor 150° causa uma turbulência alta em uma parcela significativa da parte nordeste do parque eólico e portanto esse setor deve ser analisado com maior atenção.

Através dos resultados da simulação CFD é possível concluir que o aumento do comprimento de rugosidade é suficiente para elevar a intensidade de turbulência geral média do parque.

A análise de cargas nos componentes de uma turbina é um processo complexo composto por diversas variáveis não lineares e, portanto, estudos mais detalhados podem ser feitos a fim de permitir um melhor entendimento da correlação entre a rugosidade do solo e o carregamento mecânico da turbina eólica.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir da realização deste trabalho pôde-se verificar a existência de um grande número de pesquisas já realizadas e em andamento no que se refere à avaliação do recurso eólico. O crescimento acelerado da expansão eólica, atrelado aos baixos preços verificados nos últimos leilões de energia renovável, necessita ser acompanhado por uma mão de obra local altamente especializada a fim de executar estimativas cada vez mais precisas. Sendo assim, fica evidente a relevância de um conhecimento profundo das incertezas e possíveis erros associados ao processo de modelagem do projeto.

O problema relacionado com a definição do parâmetro rugosidade superficial, anteriormente caracterizado, foi amplamente definido, avaliado e desmistificado nos aspectos que geram maior impacto na estimativa de rentabilidade do projeto eólico. Erros de grande magnitude puderam ser atestados devido a erros na modelagem da rugosidade superficial. Foi possível adquirir uma melhor compreensão do grau de detalhes necessários ao elaborar um mapa de rugosidade. A partir de alguns exemplos práticos, foi verificada a sensibilidade da estimativa da velocidade de vento no modelo WAsP<sup>®</sup> à rugosidade superficial no que diz respeito à extrapolação horizontal e vertical. Foi ainda apresentado um estudo qualitativo da influência da rugosidade no aumento de turbulência em uma determinada área.

Todas as simulações e estudos de caso realizados nesse trabalho são possíveis de ser ampliados. Diversas recomendações práticas foram feitas com o intuito de mitigar os erros advindos da definição da rugosidade.

Algumas sugestões de atividades que podem ser desenvolvidas em trabalhos futuros, de modo a elucidar ainda mais as incertezas da modelagem e promover uma estimativa do recurso eólico mais precisa, são listadas a seguir:

- Validar o uso de mapas de rugosidade baseados em imagens de satélite.
- Analisar o impacto dos erros introduzidos ao modelo pelo fato de não considerar a mudança de vegetação sazonal em uma determinada região.
- A validação da modelagem do atlas eólico estimado de uma região com o auxílio de LIDAR/SODAR.
- Determinação de comprimentos de rugosidade para biomas tipicamente brasileiros.

- Avaliar o impacto na vida útil de componentes do aerogerador com o aumento de turbulência mecânica gerada pela rugosidade superficial.

Ainda há muitos artigos e teses sendo realizados com o intuito de tornar as metodologias de cálculos da estimativa de produção de energia cada vez mais confiáveis e precisos. É importante que tais metodologias sejam cautelosamente validadas e adequadas para que possam ser aplicadas com sucesso no Brasil tendo em vista suas peculiaridades climáticas e biomas locais.

## BIBLIOGRAFIA

AMARANTE, O. A. C. D.; SILVA, F. D. J. L. D.; ANDRADE, P. E. P. D. **Atlas eólico: Minas Gerais**. Belo Horizonte. 2010.

ARAUJO, A. M. et al. Simulación de la Producción de Energía Eléctrica con Aerogeneradores de Pequeño Tamaño. **Inf. tecnol. [online]**, vol. 20, n. n. 3, 2009. pp. 37-44.

BLACKADAR, A. K.; TENNEKES, H. Asymptotic Similarity in Neutral Barotropic Planetary Boundary Layers. **J. Atmos. Sci**, n.6, 1968. p.1015-1020.

BRASIL. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2021**. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro. 2012.

BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons, 2001.

BURTON, W. V. **WIND TUNNEL SIMULATION OF AN ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER**. Estados Unidos: Texas Tech University, 2001. Tese de mestrado em engenharia mecânica.

CUSTÓDIO, R. D. S. **Energia Eólica Para Produção de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.

DIMICELI, C. M. et al. MODIS Vegetation Continuous Fields. **Global Land Cover Facility**, 2011. Disponível em: <<http://glcf.umd.edu/data/vcf/>>. Acesso em: 10 jul. 2013.

EMD INTERNATIONAL A/S. Chapter 3 - Energy, Aalborg, Outubro 2010.

EMD INTERNATIONAL A/S. **Roughness in WindPRO**. Aalborg. 2010.

FARIAS, J. C. D. M. **Plano Decenal de Energia - PDE 2019**. Apresentação do PDE 2019. Recife: [s.n.]. 19 Novembro 2010. p. 24.

FRENDSSEN, T. S. **Turbulence and turbulence-generated structural loading in wind turbine clusters**. Roskilde, DK. 2007.

FRERY, A. C.; NASCIMENTO, A. D. C.; CINTRA, R. J. Information theory and image understanding: application to polarimetric SAR imagery. **Chilean Journal of Statistics**, Vol. 2, No. 2, Setembro 2011. 81-100.

HANSEN, M. O. L. **Wind Turbines: Aerodynamic, loads and structures**. Dinamarca: [s.n.], 1998.

IEC61400-1. Wind Turbines - Part 1: Design requirements. Third edition. ed. Suíça: International Eletrotechnical Commission, 2005.

JACKSON, T. Renewable Energy - Summary Paper for the Renewables. **Energy Policy, Series of 25 Papers**, p. 861-882, 1992.

LETTAU, H. **Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element distribution**. (Citado por MORTENSEN, N. G. et al. 2007): [s.n.], 1969.

LOSEKANN, L. **Blog Infopetro**, 07 Maio 2012. Disponível em: <<http://infopetro.wordpress.com/2012/05/07/a-energia-eolica-e-realmente-competitiva-no-brasil/>>. Acesso em: 15 Maio 2012.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **WindEnergy Explained**. West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2002.

MERONEY, R. **Fluid Dynamics of flow over hills/mountains. Insights obtained through physical modelling**. Lisboa: Universidade de Coimbra, 1991.

MORTENSEN, N. G. et al. **WAsP Utility Program**. Roskilde, Denmark. 2004. (Risø-I-2261(EN)).

MORTENSEN, N. G.; BOWEN, A. J.; IOANNIS, A. **IMPROVING WAsP PREDICTIONS IN (TOO) COMPLEX TERRAIN**. Roskilde, DK. 2006.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Acompanhamento Mensal da Geração de Energia das Usinas Eólicas com Programação e Despacho Centralizados pelo ONS**. [S.l.]. Março/2012.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. **Conceptos básicos sobre la meteorología de la contaminación del aire**, Janeiro 2005. Disponível em: <[http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_meteoro/lecc3/lecc3\\_p.html](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/lecc3/lecc3_p.html)>. Acesso em: 02 Outubro 2012.

PARKER, S. P. **Fluid Mechanics Source Book**. New York: McGraw-Hill, 1987.

PETERSEN, E. L. et al. Wind Power Meteorology. **Wind Energy**, 1998. 2-22.

PIERCE COLLEGE. Pierce College Weather Station, 1999. Disponível em: <<http://piercecollegeweather.com/stability.php>>. Acesso em: 05 December 2011.

RAMLI, N. I. et al. **Estimation of the Roughness Length (zo) in Malaysia using Satellite Image**. The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering. Taipei: [s.n.]. 2009. p. November 8-12.

ROHATGI, J. S.; NELSON, V. **Wind Characteristics: Analysis for the Generation of Wind Power.** Texas, USA: Alternative Energy Institute West Texas A&M University, 1994.

SILVA, N. F. **FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS COMPLEMENTARES NA EXPANSÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO: O CASO DA ENERGIA EÓLICA.** Rio de Janeiro: Dissertação de doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia, 2006.

STULL, R. B. **Meteorology for Scientists and Engineers.** Pacific Grove, CA: Brooks/Cole, 2000.

TROEN, I.; PETERSEN, E. L. **European Wind Atlas.** Roskilde. Dinamarca: Risø National Laboratory, 1989.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Global Land Cover Characterization, 23 Junho 2008. Disponível em: <<http://edc2.usgs.gov/glcc/glcc.php>>. Acesso em: 10 jul. 2013.

UTAH STATE UNIVERSITY. Utah State University, 2008. Disponível em: <[http://ocw.usu.edu/Forest\\_\\_Range\\_\\_and\\_\\_Wildlife\\_Sciences/Wildland\\_Fire\\_Management\\_and\\_Planning/Unit\\_7\\_\\_Atmospheric\\_Stability\\_and\\_Instability\\_1.html](http://ocw.usu.edu/Forest__Range__and__Wildlife_Sciences/Wildland_Fire_Management_and_Planning/Unit_7__Atmospheric_Stability_and_Instability_1.html)>. Acesso em: 12 out. 2011.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia.** Recife: Versão Digital 2, 2006.

VESTAS WIND SYSTEMS. **Wind & Site Meteorological Data Checking Guidelines.** Aarhus, DK. 2009.

WASP. **Wind Atlas Analysis and Application Program: WASP 8 Help Facility.** Dinamarca: Wind Energy Department, Risø National Laboratory, 2007.