

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

EFEITOS DA ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA NA MODELAGEM DO ESCOAMENTO
PARA APLICAÇÕES NO SETOR DE ENERGIA EÓLICA

por

Leonardo Calil Barriatto

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, março de 2018

EFEITOS DA ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA NA MODELAGEM DO ESCOAMENTO
PARA APLICAÇÕES NO SETOR DE ENERGIA EÓLICA

por

Leonardo Calil Barriatto
Engenheiro Mecânico

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

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

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

Aprovada por:

Dr^ª. Jussara Maria Leite Mattuella.....LAC / UFRGS

Prof. Dr. Acir Mércio Loredou-Souza.....PPGEC / UFRGS

Prof. Dr. Bardo Ernst Josef Bodmann.....PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Jakson M. Vassoler
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 21 de março de 2018

*Dedico este trabalho a duas grandes mulheres:
-Minha mãe, Patrícia Calil Barriatto e minha esposa, Raquel Elise Kalsing Barriatto.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a todos os docentes e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC) que me acolheram como aluno ao longo dos últimos três anos.

Agradeço à minha orientadora, Profa. Dra. Adriane Prisco Petry pelo pioneirismo em ser um dos primeiros acadêmicos no Brasil a se dedicar à propagação e ao aprofundamento do conhecimento científico associado à geração de energia eólica.

Agradeço à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e à *Milwaukee School of Engineering* (MSOE). Foi dentro destas duas instituições acadêmicas que adquiri a bagagem cultural que me transformou em um Engenheiro Mecânico. Sem esta valiosa bagagem, a execução do presente estudo não teria sido possível.

Agradeço também à empresa DNV GL pela excelência e rigor de todos os trabalhos técnicos realizados no campo da engenharia eólica. Foi dentro desta empresa que expandi e consolidei meus conhecimentos sobre o setor eólico e sobre a modelagem do escoamento atmosférico.

Por fim agradeço aos meus pais, minha irmã e minha esposa que sempre me incentivaram a ir adiante.

RESUMO

Simulações numéricas do escoamento atmosférico em microescala constituem o foco principal deste estudo. Estas simulações são abordadas tendo em vista aplicações para o setor eólico, em especial para avaliações de produção de energia em parques eólicos. Existem diversas categorias de incertezas associadas às estimativas de produção de energia para um projeto eólico, mas na maioria dos casos, a incerteza associada ao modelo de escoamento é a maior e mais relevante de todas. Dentro do setor eólico, o termo “modelo de escoamento” refere-se à ferramenta numérica utilizada para extrapolar o recurso eólico medido na posição das torres anemométricas (e sensores remotos) até as posições projetadas para os aerogeradores. Diversos autores sugerem através de estudos comparativos que os modelos tipo “*CFD RANS k-ε*” atualmente representam o “estado da arte” para aplicações em parques eólicos e são os mais utilizados comercialmente no setor. Contudo, o escoamento atmosférico livre é intrinsecamente turbulento, e a dinâmica dos escoamentos turbulentos é um campo científico que ainda não foi totalmente dominado pelo conhecimento humano. O presente estudo demonstra que a maioria dos “modelos de escoamento” atualmente disponíveis possuem pontos fracos, em especial quando aplicados em simulações do escoamento atmosférico livre sobre áreas com topografia e rugosidade complexas. Uma das fraquezas presentes na maioria dos modelos de microescala para escoamento atmosférico é a “incapacidade” de simular com precisão o escoamento que ocorre durante períodos de “estabilidade atmosférica”. Diversos locais com elevado potencial eólico apresentam ciclos durante os quais as características do escoamento são afetadas pela ocorrência de estratificação térmica dentro da Camada Limite Atmosférica. Tendo como objetivo principal melhorar as simulações do escoamento nestas condições, propõe-se através deste estudo algumas modificações na modelagem “*CFD RANS k-ε*” tradicionalmente empregada. Dentre estas, destacam-se a inclusão de um perfil estratificado de temperatura potencial como condição de contorno, a inclusão dos efeitos das forças de empuxo no equacionamento “*k-ε*” e a solução simultânea das equações para balanço de energia e para o fluxo de temperatura potencial. Este modelo foi chamado de “*RANS estável*”. Para validação deste modelo foram utilizadas cinco torres anemométricas instaladas em um local com topografia complexa. Estas torres foram montadas e instrumentadas conforme as melhores práticas internacionais. Os dados anemométricos registrados por essas torres demonstram a presença de ciclos diários de estabilidade atmosférica. Os erros de previsão cruzada foram

calculados comparando-se as previsões de cada modelo com as medições reais registradas na posição das torres. O erro global médio de previsão cruzada entre torres anemométricas obtido com a composição dos modelos *RANS* “*estável + neutro*” foi de 3,8% enquanto o erro obtido apenas com o modelo *RANS* $k-\varepsilon$ tradicional foi de 5,2%. Para o modelo linear *WAsP*, amplamente utilizado no setor eólico, o erro foi de 7,1%. Além dos erros de previsão cruzada entre torres, os perfis verticais de velocidade e os fatores de aceleração direcionais obtidos com a composição dos modelos *RANS* “*estável + neutro*” também sugerem que esta é uma alternativa versátil e promissora para capturar os ciclos de estabilidade atmosférica utilizando simulações numéricas em regime permanente.

Palavras-chave: Energia Eólica; Camada Limite Atmosférica; Escoamento Atmosférico; Dinâmica dos Flúidos Computacional; CFD.

ABSTRACT

Microscale numerical simulations of the atmospheric wind flow are the central focus of this study. These simulations are analysed from the wind energy perspective. Special attention is given to the usage and application of these simulations in energy production assessments for proposed wind farms. There are multiple uncertainty categories associated with energy production forecasts for future wind farms. However, in most cases the uncertainty factors related with wind flow modelling are the largest and most relevant of them all. The wording “flow model” refers to the numerical simulations (or “models”) that are used to extrapolate the anemometric data recorded at meteorological masts positions to the proposed wind turbine positions. Several authors have demonstrated through comparative studies that the “*CFD RANS k-ε*” models currently represent the “state of the art” when it comes to microscale wind flow simulations targeted at wind farms. Nonetheless, the atmospheric wind flow is turbulent by nature, and the dynamics of turbulent flows represent one of the scientific fields that have not yet been fully dominated by the human knowledge. The present study demonstrates that the majority of flow models currently available to mankind still lack in precision, even more so when it comes to modelling free atmospheric wind flow over complex terrain. One of the major weak spots of most microscale wind flow models is their inability to precisely simulate the wind flow that occurs during periods of atmospheric stability. Numerous locations with large potential for wind energy production present cyclic periods of thermal stratification inside the atmospheric boundary layer. These cycles alter the dynamics and characteristics of the wind stream. With the purpose of improving wind flow simulations under stable atmospheric conditions, some modifications to the standard “*RANS k-ε*” model implementation are proposed. The most significant of these modifications are the usage of a potential temperature profile among the boundary conditions, the inclusion of the buoyancy forces in the “*k-ε*” equations and the simultaneous solution of the equations for energy balance and for potential temperature transport. This “modified” model was named “*stable RANS*”. It was validated using five well mounted meteorological masts installed in a location with complex topography. The anemometric data measured by these site masts suggest the existence of strong daily cycles of atmospheric stability. Cross prediction errors were calculated by comparing the forecasts (outputs) from each flow model against real wind data measured at each mast position. The global average cross prediction error yielded by the *RANS “stable +neutral”* model was around

3,8%, whereas the error yielded by the traditional “*RANS k-ε*” implementation was near 5,2%. For the linear model WAsP the error was calculated to be 7,1%. In addition to cross prediction errors, the vertical wind speed profiles and speed-up factors calculated with the *RANS “stable +neutral”* model composition also suggest that it is a promising and versatile alternative for capturing the effects from atmospheric stability on wind flow using steady state numerical simulations.

Keywords: Wind Energy; Atmospheric Boundary Layer; Atmospheric Flow; Computer Fluid Dynamics; CFD.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Setor Eólico no Brasil	1
1.1.1	Avaliação de Produção de Energia Eólica	2
1.1.2	Quantificação do Recurso Eólico.....	5
1.2	Objetivos.....	7
2	ESCOAMENTO NA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA.....	8
2.1	Estratificação Térmica e Estabilidade Atmosférica.....	10
2.1.1	Camada Limite Estável	12
2.1.2	Camada Limite Convectiva.....	13
2.2	Métricas para Estabilidade na CLA	14
2.3	Perfil Vertical do escoamento (Próximo do Solo)	19
3	MODELAGEM DO ESCOAMENTO NO SETOR EÓLICO	24
3.1	Comparação entre modelos amplamente utilizados.....	25
3.2	Modelagem da Camada Limite (Atmosférica) Estável.....	28
3.2.1	Testes utilizando túnel de vento.....	34
4	RESULTADOS E VALIDAÇÃO	38
4.1	Local	38
4.2	Torres Anemométricas no Local.....	40
4.3	Domínio Computacional e Condições de Contorno dos Modelos CFD.....	46
4.4	Testes e Simulações	53
4.5	Convergência das Simulações	55
4.6	Análises de Qualidade de Malha.....	57
4.7	Resultados.....	62
5	CONCLUSÕES.....	70
5.1	Discussão Ampliada	70
5.2	Conclusões Resumidas	73
Apêndice A	– Camada Limite.....	79
Apêndice B	– Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) Equations.....	90
Apêndice C	– Torres Anemométricas: Montagem e Instrumentação.....	93
Apêndice D	– Mapa de velocidades obtido com WASP	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Grandes etapas comuns a uma avaliação de produção de energia eólica	2
Figura 2.1 – Variação da temperatura absoluta nas camadas atmosféricas [Adaptado de UCAR, 2017].....	8
Figura 2.2 – Evolução típica da camada limite atmosférica ao longo de um dia sobre solo exposto e sob céus abertos [Adaptado de Garratt, 1992]	12
Figura 2.3 – Temperatura potencial e dispersão de poluentes variando com altitude para o período diurno [Adaptado de Garratt, 1992]	16
Figura 2.4 – Perfis verticais teóricos de temperatura potencial [Adaptado de Bleeg et al., 2015].....	17
Figura 2.5 – Perfis diários teóricos de intensidade de turbulência e coeficiente de extrapolação vertical [Adaptado de Wenzel et al., 2014]	18
Figura 2.6 – Perfil vertical de velocidade teórico dentro da CLA segundo a lei logarítmica ..	22
Figura 3.1 – Vista noroeste da ilha <i>Bolund</i> , Dinamarca [adaptado de Bechmann et al., 2011].	25
Figura 3.2 – Vista superior da ilha <i>Bolund</i> , Dinamarca. Contornos de elevação com intervalos de 0,25 m. Torres anemométricas representadas por pontos vermelhos [Adaptado de Bechmann et al., 2011]	26
Figura 3.3 – Diagrama ilustrativo do túnel de vento utilizado nos experimentos de Ross et al., 2004.	34
Figura 3.4 – Medições experimentais em túnel de vento realizadas por Ross et al., 2004, e resultados numéricos obtidos por Bleeg et al., 2014 usando modelo RANS estável.	35
Figura 3.5 – Perfis verticais de velocidade medidos por Ross et al., 2004, para várias distâncias em relação à entrada do túnel e resultados numéricos obtidos por Bleeg et al., 2014 usando modelo RANS estável.	36
Figura 4.1 – Posição relativa das torres anemométricas e topografia do local.....	38
Figura 4.2 – Cobertura do solo (rugosidade) no local do estudo.....	39
Figura 4.3 – Velocidades médias mensais do vento registradas pelas torres anemométricas a 80 m acima do solo.....	40
Figura 4.4 – Distribuição de frequências de velocidade do vento para Torre E a 80 m do solo	41
Figura 4.5 – Distribuição de frequências de direção do vento para Torre E (considerando norte geográfico).....	41
Figura 4.6 – Variação da intensidade de turbulência com a velocidade do vento para as torres anemométrica as 80 m do solo	42
Figura 4.7 – Perfis verticais de velocidades derivados para a Torre “E” a partir das medições de três anemômetros	43
Figura 4.8 – Variação diária de intensidade de turbulência e coeficiente da lei de potências (“ α ”) para a Torre “E” a 80 m do solo.....	43
Figura 4.9 – Variação de intensidade de turbulência e coeficiente da lei de potências (“ α ”) para a Torre “D” a 80 m do solo.....	44
Figura 4.10 – Duração do escoamento estável para cada direção na Torre Anemométrica “E” considerando três diferentes parâmetros.....	45
Figura 4.11 – Duração média do escoamento estável para cada direção considerando todas as torres anemométricas.....	46
Figura 4.12 – Vista superior do domínio computacional e da topografia do terreno.....	47

Figura 4.13 – Vista superior ampliada da malha para uma região central do domínio.....	48
Figura 4.14 – Vista em corte da malha no centro de um dos domínios computacionais considerados com 20,5 milhões de células.....	49
Figura 4.15 – Vista superior do domínio e da rugosidade do terreno ("z0").....	50
Figura 4.16 – Perfil de temperatura potencial (" θ ") utilizado para modelagem " <i>RANS estável</i> "	51
Figura 4.17 – Perfil da componente de velocidade horizontal (" <i>u</i> ") utilizado para modelagem " <i>RANS estável</i> " e perfil logarítmico	52
Figura 4.18 – Etapas de pós-processamento utilizadas para combinar os resultados das simulações direcionais realizadas com os modelos CFD	54
Figura 4.19 – Resíduos para o modelo " <i>RANS neutro</i> " por setor direcional	55
Figura 4.20 – Resíduos para o modelo " <i>RANS estável</i> " por setor direcional.....	56
Figura 4.21 – Velocidade horizontal resultante " <i>V_{xy}</i> " avaliada nas torres para a simulação com ângulo de entrada de 110 graus (Modelo " <i>RANS estável</i> ").....	57
Figura 4.22 – Posições para avaliação da componente horizontal de velocidade (" <i>V_{xy}</i> ") a 80 m do solo	58
Figura 4.23 – " <i>V_{xy}</i> " a 100 m do solo avaliada em 45 posições para os três domínios considerados considerando modelo " <i>RANS neutro</i> "	59
Figura 4.24 – Correlação entre " <i>V_{xy}</i> " a 100 m para malha computacional com 20,5 E6 células e com 16,0 E6 células considerando modelo " <i>RANS neutro</i> "	60
Figura 4.25 – Correlação entre " <i>V_{xy}</i> " a 100 m para malha computacional com 20,5 E6 células e com 28,1 E6 células considerando modelo " <i>RANS neutro</i> "	60
Figura 4.26 – " <i>V_{xy}</i> " a 100 m do solo avaliada em 45 posições para os três domínios considerados considerando modelo " <i>RANS estável</i> "	61
Figura 4.27 – Magnitude da componente horizontal de velocidade (<i>V_{xy}</i>) a 80 m do solo para simulação com modelo " <i>RANS neutro</i> " e escoamento orientado a 110 graus na entrada	63
Figura 4.28 – Magnitude da componente horizontal de velocidade (<i>V_{xy}</i>) a 80 m do solo para simulação com modelo " <i>RANS estável</i> " e escoamento orientado a 110 graus na entrada	64
Figura 4.29 – Fatores de aceleração direcionais entre as Torres "C" e "E"	65
Figura 4.30 – Fatores de aceleração direcionais entre as Torres "A" e "C".....	66
Figura 4.31 – Perfis verticais de velocidade para a posição da "Torre A" normalizados pela velocidade média registrada na altura do anemômetro superior	67
Figura 4.32 – Perfis verticais de velocidade para a posição da "Torre E" normalizados pela velocidade medida pelo anemômetro superior	68
Figura A.1 – Camada limite laminar formada sobre uma placa plana	79
Figura A.2 – Perfil de velocidade adimensional dentro da CLL sobre uma placa plana	82
Figura A.3 – Camada limite laminar formada sobre uma placa plana [adaptado de Fox et al., 2015].....	84
Figura A.4 – Regiões dentro da Camada Limite Turbulenta [adaptado de STAR-CCM+, 2014]	89
Figura A.5 – Regiões dentro da CLT [experimentos de Cushman e Beckers, 2012].....	89
Figura C.1 – Vista geral do local de interesse a partir da Torre Anemométrica "A"	93
Figura C.2 – Arranjo de montagem da Torre Anemométrica "A"	94
Figura C.3 – Recomendação de montagem para anemômetro de topo [IEC, 2005]	95
Figura C.4 – Recomendação de montagem para anemômetros paralelos [IEC, 2005].....	96
Figura C.5 – Instrumentação recomendada para uma torre anemométrica [EPE, 2014]	97
Figura D.1 – Mapa da componente horizontal de velocidade (<i>V_{xy}</i>) a 80 m do solo obtido com o modelo linear WAsP v10.2.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Dez países com maior capacidade eólica instalada até dezembro de 2016 [GWEC, 2017].....	1
Tabela 2-1 Valores típicos para rugosidade (ou cobertura do solo).....	22
Tabela 3.1 – Erros médios de previsão cruzada entre modelo e medições para o comparativo realizado por Bechmann et al., 2011.	27
Tabela 3.2 – Constantes para o modelo de turbulência “ $k-\varepsilon$ ”.....	33
Tabela 4.1 – Parâmetros de corte para escoamento estável / neutro para cada torre anemométrica.....	45
Tabela 4.2 – Diferentes domínios computacionais analisados.....	58
Tabela 4.3 – Erro global de previsão cruzada entre torres anemométricas considerando simulações com escoamento orientado a 110 graus na entrada.....	61
Tabela 4.4 – Erros médios globais de previsão cruzada a partir de cada torre.....	68
Tabela A-1 Resultados de Blasius, 1908, para a CLL ao longo de uma placa plana.....	82

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CLA	Camada Limite Atmosférica
CLC	Camada Limite Convectiva
CLE	Camada Limite Estável
CLL	Camada Limite Laminar
CLT	Camada Limite Turbulenta
DES	Detached Eddy Simulations
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEC	International Electrotechnical Commission
IT	Intensidade de Turbulência
LES	Large Eddy Simulation
LIDAR	Light Detection and Ranging
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
SODAR	Sonic Detection And Ranging
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program
WRF	Weather Research and Forecasting

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coeficiente adimensional de extrapolação vertical da lei de potência
β	Coeficiente de expansão térmica [K^{-1}]
C_ε	Coeficientes da equação de “ ε ” (valores adotados são apresentados na Tabela 3.2)
C_μ	Coeficiente da equação para viscosidade parente (o valor adotado é apresentado na Tabela 3.2)
C_p	Capacidade térmica a pressão constante [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]
da	Elemento vetorial de área [m^2]
δ_{ij}	Função delta de Kronecker
ε	Taxa de dissipação turbulenta” [$J.kg^{-1}.s^{-1}$]
F_i	Componente do vetor forças de campo na direção “ i ” [N/m^3]
F_C	Vetor para força de campo referente ao efeito Coriolis [N/m^3]
F_g	Vetor para força de campo gravitacional [N/m^3]
g	Campo vetorial gravitacional [m/s^2]
h	Espessura da camada limite atmosférica [m]
h_s	Entalpia específica [J/kg]
I_m	Matriz identidade adimensional
k	Energia cinética turbulenta [$J.kg^{-1}$]
κ	Constante adimensional de Von Kármán
L_{MO}	Escala de comprimento de Monin-Obukhov [m]
μ	Viscosidade dinâmica [$Pa.s$]
μ_t	Viscosidade aparente ou “turbulenta” [$Pa.s$]
Ω	Velocidade de rotação da Terra, equivalente a $7,29.10^{-5}$ [rad/s]
p	Pressão aparente do fluido [Pa];
P	Pressão absoluta do fluido [Pa]
P_0	Pressão de referência, tipicamente definida como 10^5 [Pa]
P_b	Termo associado à produção de “ k ” por empuxo [$J.s^{-1}.m^{-3}$]
P_k	Termo associado à produção de “ k ” por cisalhamento/atrito [$J.s^{-1}.m^{-3}$]
ϕ	Latitude geográfica [$graus$]
ψ	Fator adimensional de correção para estabilidade
R	Constante específica dos gases [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]
Re	número adimensional de Reynolds.
ρ	Massa específica [kg/m^3]
S_ε	Termo de “fonte” [$J.s^{-2}.m^{-3}$] para taxa de dissipação trubulenta
S_k	Termo de “fonte” para energia cinética turbulenta [$J.s^{-1}.m^{-3}$]
σ_{ij}	Tensor de tensões [N/m^2]

σ_ε	Número de Prandtl “ ε ” (razão entre difusão de quantidade de movimento turbulenta e difusão de “ ε ”)
σ_k	Número de Prandtl “ k ” (razão entre difusão de quantidade de movimento turbulenta e difusão de “ k ”)
σ_S	Desvio padrão para uma dada amostra de medições de velocidade do vento [m/s]
σ_t	Número de Prandtl turbulento (razão entre difusão da quantidade de movimento turbulenta e difusão térmica)
T	Temperatura absoluta [K]
TI	Intensidade de turbulência para o escoamento atmosférico livre [%]
τ	Tensor de tensões viscosas [N/m^2]
τ_w	Tensão de cisalhamento junto à parede [Pa]
θ	Temperatura potencial [K]
θ_z	Temperatura potencial avaliada na altura de medição [K]
u	Componente do vetor velocidade na direção \hat{i} [m/s]
u_i'	Componente flutuante do vetor velocidade na direção \hat{i} [m/s]
\bar{u}_i	Componente média do vetor velocidade na direção \hat{i} [m/s]
u_*	Velocidade de fricção (ou velocidade turbulenta) [m/s]
U_∞	Velocidade de corrente livre [m/s]
v	Componente do vetor velocidade na direção \hat{j} [m/s]
\mathbf{v}	Campo vetorial de velocidade [m/s]
V_{xy}	Componente horizontal resultante de velocidade [m/s]
ν	Viscosidade cinemática [m^2/s]
z	Altitude em relação ao nível do solo [m]
z_0	Comprimento efetivo de rugosidade [m]
$\overline{w'\theta'}$	Fluxo (turbulento) de energia térmica avaliado na superfície [$\frac{m}{s} \cdot K$]

1 INTRODUÇÃO

1.1 Setor Eólico no Brasil

Um dos primeiros complexos eólicos de escala industrial do Brasil foi inaugurado em meados de 2007, em Osório no Rio Grande do Sul. Desde o início de sua operação comercial, o setor eólico esteve em franco desenvolvimento. Após uma década desde o nascimento desta indústria, o Brasil já figura na seleta lista dos dez países com maior capacidade instalada, conforme indicam os dados exibidos na Tabela 1.1. Durante o ano 2016 a capacidade eólica instalada no país ultrapassou a barreira dos 10 GW. Ao longo do ano 2017 a marca de 12 GW de potência eólica instalada foi atingida. Segundo dados da Associação Brasileira de Energia Eólica [ABEEólica, 2017] entre os meses de janeiro e julho de 2017 a geração líquida de energia eólica apresentou 25% de crescimento em relação ao mesmo período do ano anterior. A qualidade do recurso eólico brasileiro também se destaca no cenário internacional. Segundo um estudo conduzido pela ABEEólica, o fator de capacidade líquido para todos os parques eólicos operacionais no Brasil, durante o ano de 2016, foi de 40,7%. No mês de setembro o conjunto dos parques eólicos brasileiros atingiu um fator de capacidade médio de 52,0%. Esses níveis de desempenho excedem consideravelmente os patamares médios mundiais. Segundo o Ministério de Minas e Energia, em 2015 o fator de capacidade líquido médio para todos os parques eólicos em operação no planeta não ultrapassou a marca dos 23,8%.

Tabela 1.1 – Dez países com maior capacidade eólica instalada até dezembro de 2016

[GWEC, 2017]

País	Capacidade Instalada [MW]	[%]
China	168.690	34,7
EUA	82.184	16,9
Alemanha	50.018	10,3
Índia	28.700	5,9
Espanha	23.074	4,7
Reino Unido	14.543	3,0
França	12.066	2,5
Canadá	11.900	2,4
Brasil	10.740	2,2
Itália	9.257	1,9
Demais países	75.577	15,5

1.1.1 Avaliação de Produção de Energia Eólica

A principal finalidade de um estudo de avaliação de produção de energia é obter estimativas confiáveis sobre os níveis energia que um parque eólico (ainda não construído) deverá produzir. Para que um parque eólico saia do âmbito dos projetos e venha a ser concretizado no mundo real é fundamental que existam estudos prévios de produção de energia. São nas estimativas e previsões contidas nestes estudos que desenvolvedores e investidores baseiam suas decisões sobre a viabilidade de cada projeto eólico. São estes estudos também que delimitam o nível de risco (ou incerteza) associado às expectativas de produção de energia de cada parque eólico. Em geral, este tipo de estudo pode ser dividido em quatro grandes etapas, conforme ilustrado na Figura 1.1.

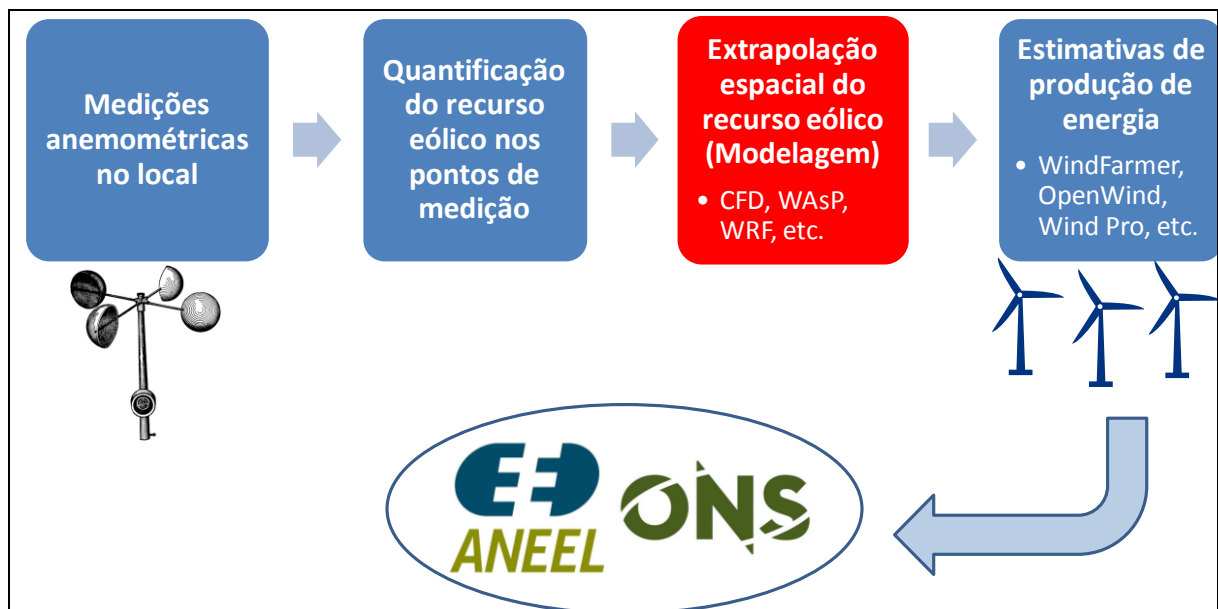


Figura 1.1 – Grandes etapas comuns a uma avaliação de produção de energia eólica

A primeira grande etapa de um estudo de avaliação de produção de energia eólica consiste na aquisição de dados meteorológicos para o local de interesse. As variáveis que compõe estas séries de dados utilizadas para quantificar o recurso eólico são apresentadas na seção 1.1.2. Estes dados meteorológicos podem ser obtidos através de fontes virtuais e de campanhas de medição realizadas localmente com torres anemométricas e sensores remotos. Para participação nos leilões federais para venda de energia no Brasil, a Empresa de Pesquisa

Energética [EPE, 2017] exige que os projetos cadastrados possuam pelo menos três anos de dados meteorológicos registrados por torres anemométricas instaladas nos locais dos projetos.

A segunda etapa de uma avaliação de produção de energia eólica consiste na análise e tratamento dos dados meteorológicos, tendo em vista quantificar o recurso eólico de longo prazo nos pontos de medição, ou seja, nas posições das torres anemométricas. A seção 1.1.2 apresenta com mais detalhes as métricas que são usualmente consideradas para quantificar o “recurso eólico”.

A terceira grande etapa consiste na extrapolação espacial do recurso eólico, isto é, no emprego de modelos de escoamento que deverão transpor o “recurso eólico” desde as posições de medição (torres anemométricas) até as posições alvo de interesse, como por exemplo as posições onde se pretende instalar aerogeradores. É inviável de um ponto de vista prático que existam torres anemométricas medindo dados meteorológicos em todos os pontos de interesse em um projeto eólico de porte industrial (> 10 MW), de forma que esta terceira etapa é inerente à maioria dos projetos de parques eólicos. Segundo Bechmann et al., 2011, os modelos de escoamento mais utilizados em avaliações de produção de energia eólica são:

- Modelos em microescala lineares como o WAsP, 2011. (*Wind Atlas Analysis and Application Program*);
- Modelos em microescala tipo CFD RANS com fechamento em duas equações (*Computer Fluid Dynamics - Reynolds-Averaged Navier–Stokes*);
- Modelos meteorológicos em mesoescala tipo WRF (*Weather Research and Forecasting*);
- Acoplamentos e variações dos modelos supracitados.

Finalmente, a quarta grande etapa de uma avaliação de produção de energia consiste no cálculo das estimativas futuras de produção de energia e do nível de risco (ou incerteza) associado a estas previsões. Este tipo de cálculo é realizado através da composição do recurso eólico simulado na posição dos aerogeradores com as características técnicas dos modelos de aerogeradores selecionados (como curva de potência, diâmetro do rotor, etc.). Calcula-se também todos os fatores de perda que impactam a geração de energia bruta, de modo que se possa estimar níveis de produção de energia líquida e probabilidades de excedência destes níveis tendo em vista a incerteza global do projeto. Segundo Burton et al., 2011, os principais fatores de perda de energia são:

- Perdas por desempenho do aerogerador;

- Perdas por restrições operacionais (como restrições por ruído ou por estratégias de gestão por direção);
- Perdas por efeito de esteira devido à operação dos aerogeradores contíguos;
- Perdas por falta de disponibilidade do sistema;
- Perdas por eficiência elétrica (associadas às etapas de transformação e transmissão de energia).

Há diversas modalidades de *software* comercialmente disponíveis para realizar este tipo de cálculo, como por exemplo *WindFamer*, *OpenWind* ou *WindPro*. Dentro desta quarta grande etapa também ocorre a definição do posicionamento ótimo para os aerogeradores, tendo em vista a redução das perdas por efeito de esteira e maximização do fator de capacidade do parque eólico.

Por fim, as estimativas de produção de energia líquida podem ser utilizadas para diversas finalidades, como:

- Habilitar o projeto para um futuro cadastramento junto aos órgãos governamentais competentes [ANEEL, 2016 e EPE, 2018];
- Avaliar diferentes alternativas de configuração do Projeto para selecionar o cenário que participará em futuros leilões federais para venda de energia;
- Conhecer o potencial energético, os níveis de incerteza e os riscos técnicos associados ao projeto, de forma a subsidiar a sua decisão de investimento e/ou atender as condições de financiamento.

Existem várias categorias de fatores de incerteza associados a cada grande etapa de um estudo padrão de avaliação de produção de energia voltado para o setor eólico. Alguns exemplos são:

- Fatores de incerteza associados às medições anemométricas;
- Variabilidade interanual do recurso eólico;
- Fatores de incerteza associados aos fatores de perda de energia;
- Fatores de incerteza associados aos modelos de escoamento do vento;
- Incertezas associadas aos dados de entrada para os modelos, etc.

Dentre todas as categorias de incertezas associadas as previsões de produção de energia para um dado parque eólico, Burton et al., 2011, afirmam que, na maioria dos casos, a incerteza associada à modelagem do escoamento atmosférico representa a categoria de maior magnitude e relevância. Utilizando como exemplo um projeto de parque eólico com 100 MW de potência

nominal total. Supondo que a média das velocidades simuladas para todas as posições de aerogerador tenha sido sobre estimada em 5% pelo modelo de escoamento atmosférico empregado. Caso este erro seja transposto para a geração de energia do parque eólico, ele deverá variar entre 6% e 10% da energia líquida prevista para o projeto. Supondo ainda que o fator de capacidade médio deste parque eólico seja de 40% e que a receita pela geração contratada seja de 100 R\$/MWh. O erro introduzido pelo modelo de escoamento se traduziria em uma incerteza quanto à receita anual do projeto que varia entre 2,1 e 3,6 milhões de reais. É por este motivo que a terceira grande etapa de um estudo de avaliação de produção de energia, que está associada à modelagem do escoamento (ou extrapolação horizontal do recurso eólico) foi enfatizada com a cor vermelha na Figura 1.1, visando evidenciar que a modelagem do escoamento atmosférico livre constitui parte fundamental de qualquer estudo pré-constutivo de produção de energia para o setor eólico.

No âmbito deste estudo o termo “modelos do escoamento” se refere às ferramentas que possibilitam que o recurso eólico medido na posição das torres anemométricas possa ser transposto e quantificado na posição desejada para cada aerogerador. Na seção 3 são apresentados os modelos para escoamento do vento mais utilizados no setor eólico. No âmbito deste estudo o termo “recurso eólico” se refere principalmente à velocidade do vento, direção do escoamento e intensidade de turbulência.

1.1.2 Quantificação do Recurso Eólico

Segundo Burton et. al., 2011, para uma dada posição espacial e uma dada altura em relação ao solo, as métricas (ou variáveis) comumente consideradas para caracterização do regime eólico incluem:

- Velocidade média de longo prazo;
- Distribuição de frequências direcionais;
- Rosa dos ventos;
- Intensidade de turbulência.

Em projetos para o setor eólico, usualmente se utiliza torres anemométricas para medir e quantificar as variáveis que compõe o recurso eólico em uma dada posição. A configuração mínima de montagem e instrumentação recomendada pela Empresa de Pesquisa Energética

[EPE, 2014] para uma torre anemométrica é apresentada no Apêndice C. Esta instrumentação usualmente é composta no mínimo por:

- Três anemômetros de copo posicionados em três diferentes alturas;
- Dois sensores de direção do vento (*wind vanes*);
- Um higrômetro;
- Um barômetro;
- Um termômetro.

Em países de clima mais frio que o Brasil é comum que os anemômetros de copo sejam aquecidos ou ainda que se utilize anemômetros sônicos, pois estes não possuem partes móveis e não tem suas medições severamente afetadas por acúmulo de gelo e/ou congelamento [Burton et. al., 2011]. Também é comum o uso de sensores remotos do tipo LIDAR (*Light Detection and Ranging*) e do tipo SODAR (*Sonic Detection And Ranging*) em concorrência com torres anemométricas em campanhas de medição para projetos do setor eólico.

Os anemômetros de copo usualmente registram a componente horizontal do escoamento atmosférico (do vento) com taxas de aquisição que vão de 0,5 Hz até 2 Hz [IEC, 2005]. Para uso em estudos de produção de energia e modelagem do escoamento atmosférico geralmente são feitas médias para períodos de retorno mais extensos (como médias horárias, mensais e anuais). Na Figura 4.3 são apresentadas médias mensais para os dados de velocidade registrados pelas torres anemométricas instaladas na área de interesse para o presente estudo. A posição relativa das torres é apresentada na Figura 4.1.

As distribuições de frequências de velocidade e de direção do vento também são métricas fundamentais para caracterização do recurso eólico. A última é também frequentemente chamada de “rosa dos ventos” dentro do setor eólico. Estas distribuições são exemplificadas para uma das torres anemométricas do projeto na Figura 4.3 e na Figura 4.4.

Segundo Burton et. al., 2011, a intensidade de turbulência do escoamento atmosférico livre, é comumente avaliada no setor eólico segundo a Equação (1.1).

$$TI = \frac{\sigma_S}{u} \quad (1.1)$$

Onde:

- "TI" é a intensidade de turbulência para o escoamento atmosférico livre [%];
- "u" é a componente horizontal de velocidade do vento [m/s];

- " σ_s " é o desvio padrão para uma dada amostra de medições de velocidade do vento [m/s].

A intensidade de turbulência avaliada na posição das torres anemométricas instaladas no local do estudo é apresentada na Figura 4.6.

1.2 Objetivos

O presente estudo tem como um de seus objetivos principais analisar a aplicação de métodos numéricos para simular o escoamento atmosférico livre sobre regiões com características de topografia e cobertura do solo complexas. Estas simulações numéricas são analisadas pela ótica do setor de energia eólica, que faz uso delas para extrapolar espacialmente as variáveis que quantificam o recurso eólico de um dado local.

Ainda no âmbito dos objetivos principais, o presente estudo busca propor aprimoramentos e melhorias para os modelos “*CFD RANS $k-\varepsilon$* ” amplamente utilizados em simulações do escoamento atmosférico livre. Os aprimoramentos propostos buscam capacitar estes modelos a simular o escoamento atmosférico durante condições de estabilidade atmosférica.

O presente estudo também possui objetivos secundários, associados e alinhados com os objetivos principais. Seguindo esta lógica, procura-se apresentar de maneira objetiva os conceitos teóricos fundamentais para o entendimento dos fenômenos físicos que regem o escoamento atmosférico mais próximo do solo (dentro da Camada Limite Atmosférica).

Adicionalmente, busca-se também apresentar os modelos de escoamento empregados com maior frequência em estudos de avaliação de produção de energia eólica, e comparar o desempenho destes modelos contra dados anemométricos reais medidos por torres anemométricas instaladas nas áreas de interesse. Estas comparações de desempenho entre os modelos testados são também analisadas pela ótica do setor eólico, visando explicitar a magnitude dos erros de projeto que podem ser causados pelo mau desempenho de modelos de escoamento, pondo em risco inclusive a saúde financeira dos empreendimentos (parques eólicos).

2 ESCOAMENTO NA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

Embora a atmosfera terrestre possua centenas de quilômetros de espessura, subcamadas ou subdivisões internas podem ser definidas. Subindo desde o nível do solo, estas subcamadas são geralmente nomeadas troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. A exosfera é a última camada delimitável, e gradualmente se dissolve e se transforma em espaço interplanetário.

A Figura 2.1 a seguir ilustra a variação da temperatura absoluta com a altitude, para as diferentes camadas da atmosfera. Trata-se apenas de um exemplo figurativo, visto que a espessura total da atmosfera e a distribuição de temperaturas são transientes e variam geograficamente.

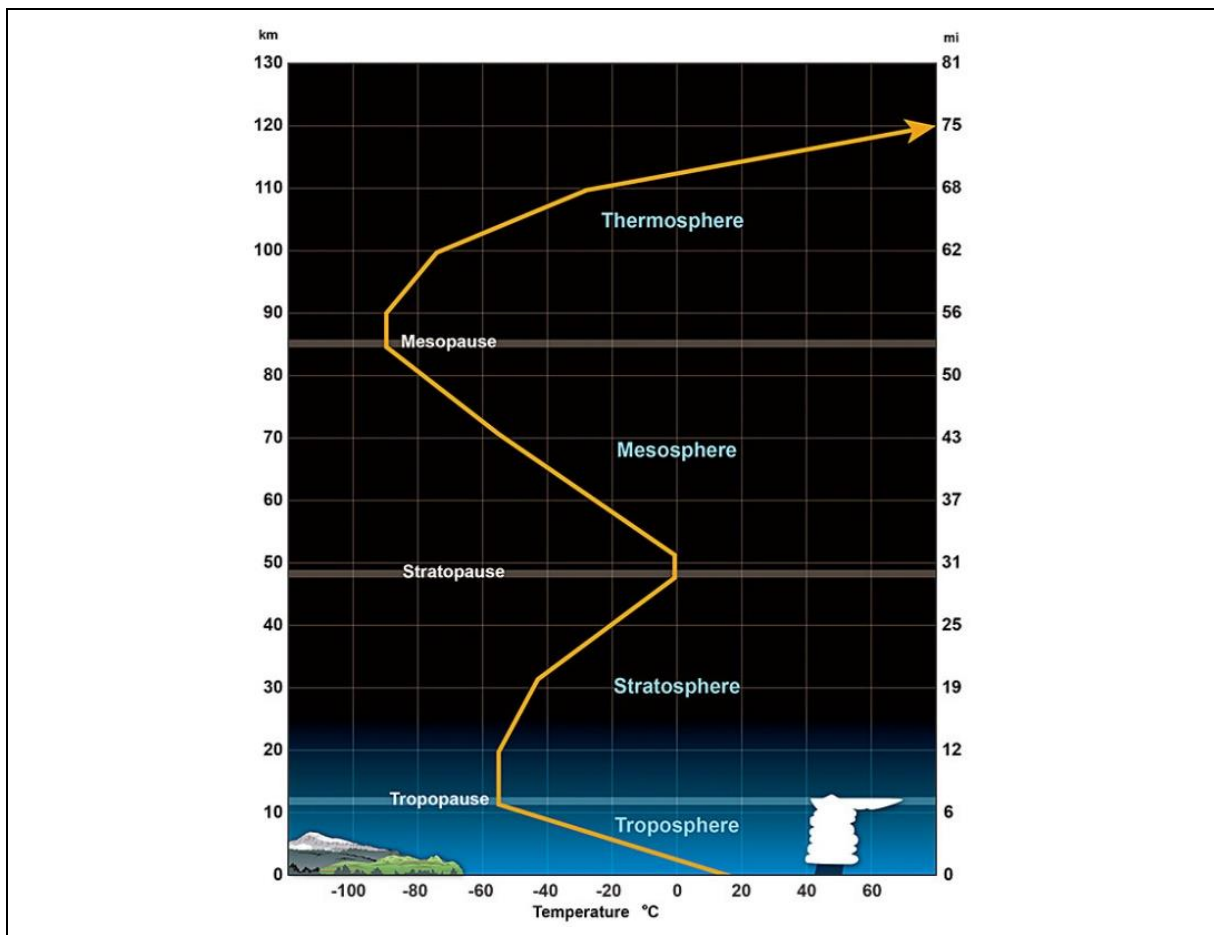


Figura 2.1 – Variação da temperatura absoluta nas camadas atmosféricas [Adaptado de UCAR, 2017]

Na região situada entre 10 km e 50 km de altitude, também conhecida como estratosfera, observa-se um aumento relativo da temperatura em função da altitude. Nesta subcamada atmosférica situa-se também a “camada de ozônio”. Em virtude da distribuição característica de temperatura, o escoamento atmosférico dentro da estratosfera é notoriamente menos turbulento do que o escoamento observado nas camadas mais inferiores da atmosfera. Segundo Cushman e Beckers, 2012, é por esta razão que a maioria dos aviões “à jato” comerciais operam com altitude cruzeiro entre 10 km e 11 km, dentro do limite inferior da estratosfera.

Sistemas meteorológicos como ciclones, tempestades e furacões concentram-se nos primeiros 10 km da atmosfera, na região conhecida como troposfera. A maioria das nuvens também se forma dentro da troposfera, pois estima-se que 99% de todo o volume de vapor de água se concentre dentro desta subcamada. Sob condições normais, a temperatura diminui em função da altitude dentro da troposfera. Holtslag et al., 2013, caracterizam o escoamento dentro da troposfera como “caótico” e em estado permanente de mudança. Trata-se de um escoamento essencialmente turbulento. Os autores ressaltam ainda que as instabilidades e a turbulência intrínsecas da troposfera, são essenciais para vida humana, pois dão origem aos sistemas climáticos que causam precipitação, irrigando as plantações e renovando as fontes de água doce. Além disso, a turbulência da troposfera também garante que a mistura e a dispersão de poluentes dentro da atmosfera sejam rápidas e eficientes.

Dentro da troposfera, na região mais próxima do solo é que se forma a Camada Limite Atmosférica (CLA). Sua espessura é transiente e varia relevantemente com a latitude geográfica. Segundo Armenio e Sarkar, 2005, em média, esta espessura se aproxima de 1km.

O escoamento do vento dentro da CLA compartilha diversas similaridades com o escoamento teórico de um fluido viscoso sobre uma placa plana com rugosidade não nula, sem a presença de trocas térmicas relevantes. Analogamente à camada limite que se formaria devido ao escoamento potencial sobre uma placa plana, é dentro da CLA que os efeitos do atrito do escoamento do vento com o solo e com os demais obstáculos são mais pronunciados. Este escoamento teórico foi o foco de inúmeras pesquisas e avanços científicos realizados nos últimos séculos, como por exemplo, os experimentos de Prandtl, 1904. No Apêndice A é apresentada a fundamentação teórica postulada por Blasius, 1908, para a camada limite que se forma sobre uma placa plana.

As interações e a transferência de energia entre o fluido (vento) e as superfícies sólidas (solo e demais obstáculos) ocorrem através de dois mecanismos principais: transferência de

energia mecânica (atrito) e transferência de energia térmica. O atrito do escoamento com a cobertura solo gera tensões cisalhantes que desaceleram o escoamento do vento nas proximidades do solo e aumentam a intensidade de turbulência das correntes livres. A presença ou ausência de efeitos térmicos relevantes dentro da CLA mudam as características do escoamento do vento nas altitudes relevantes para o setor eólico. Estas situações são descritas ao longo das seções 2.1.1 e 2.1.2.

2.1 Estratificação Térmica e Estabilidade Atmosférica

Na ausência de efeitos térmicos relevantes entre o escoamento e as superfícies sólidas, a CLA pode ser categorizada como estável, no que diz respeito à estratificação térmica vertical. Nesta situação o perfil (ou distribuição) vertical de temperatura, desde a altitude do solo até final da camada limite, é contínuo e não apresenta inversões. Contudo, segundo Duffie e Beckman, 2013, é extremamente comum que existam trocas térmicas relevantes entre o escoamento dentro da CLA e o solo (e demais obstáculos).

As trocas térmicas entre as camadas mais baixas da atmosfera e a superfície terrestre tem sua origem na radiação solar. A atmosfera terrestre é permeável à maior parte do espectro de radiação eletromagnética emitida pelo Sol. Duffie e Beckman, 2013, exemplificam este fenômeno através da faixa de comprimentos de onda que representa o espectro de “luz visível” ($0,38 \mu m < \lambda < 0,78 \mu m$). Segundo os autores, o fato de humanos serem capazes de enxergarem longas distâncias através do “ar” comprova a permeabilidade da atmosfera em relação a estes comprimentos de ondas eletromagnéticas.

É possível concluir que parcelas relevantes de radiação solar atravessam a atmosfera e atingem a superfície terrestre. No entanto, ao contrário da atmosfera, a superfície terrestre é majoritariamente opaca. O solo de todos os continentes é opaco. Mesmo os oceanos e lagos são menos transparentes à radiação solar do que a atmosfera terrestre, e como consequência disso parcelas relevantes de radiação solar que penetram a atmosfera são “absorvidas” diretamente pela superfície terrestre. Consequentemente, esta superfície se aquece e emite radiação térmica de volta para as camadas mais baixas da atmosfera (mais próximas do solo). Em virtude das faixas de temperaturas típicas do solo terrestre, a radiação térmica emitida por este “corpo” se concentra dentro o espectro infravermelho ($0,78 \mu m < \lambda < 1 mm$), que é invisível aos olhos humanos, mas perceptível na forma de “calor”.

Segundo Cushman e Beckers, 2012, parcelas pequenas de radiação térmica emitidas pelo solo atravessam a atmosfera e “escapam” para o espaço sideral. A maior parte desta radiação, que foi “reemitida”, ficam retidas na atmosfera, em virtude principalmente da absorção pelo vapor de água, dióxido de carbono e outros gases. O sol é a principal fonte de aquecimento do escoamento atmosférico, mas apesar deste estar obviamente situado “acima” da atmosfera, uma parcela relevante do aquecimento atmosférico é (re)emitida e refletida pelo solo situado “abaixo” da atmosfera.

As interações térmicas entre o escoamento atmosférico e as superfícies adjacentes são cíclicas e periódicas, e na grande maioria dos casos estão fortemente correlacionadas com ciclos diários, visto que o sol aquece diretamente a atmosfera e o solo apenas durante o dia. A intensidade destas trocas térmicas depende muito das condições meteorológicas, e em especial, da quantidade de nuvens no céu. Em um dia nublado com densa cobertura de nuvens, a superfície do solo recebe geralmente menos irradiação solar do que em um dia de céu aberto.

Nos períodos diurnos, a convecção natural é tipicamente intensa, e a mistura (vertical) entre as camadas de escoamento ocorre desde a superfície do solo até altitudes que variam de 1 a 2 km. Esta altitude “ h ” é comumente denotada de espessura da CLA. A Figura 2.2 ilustra os ciclos diários de comportamento da CLA, considerando céu limpo.

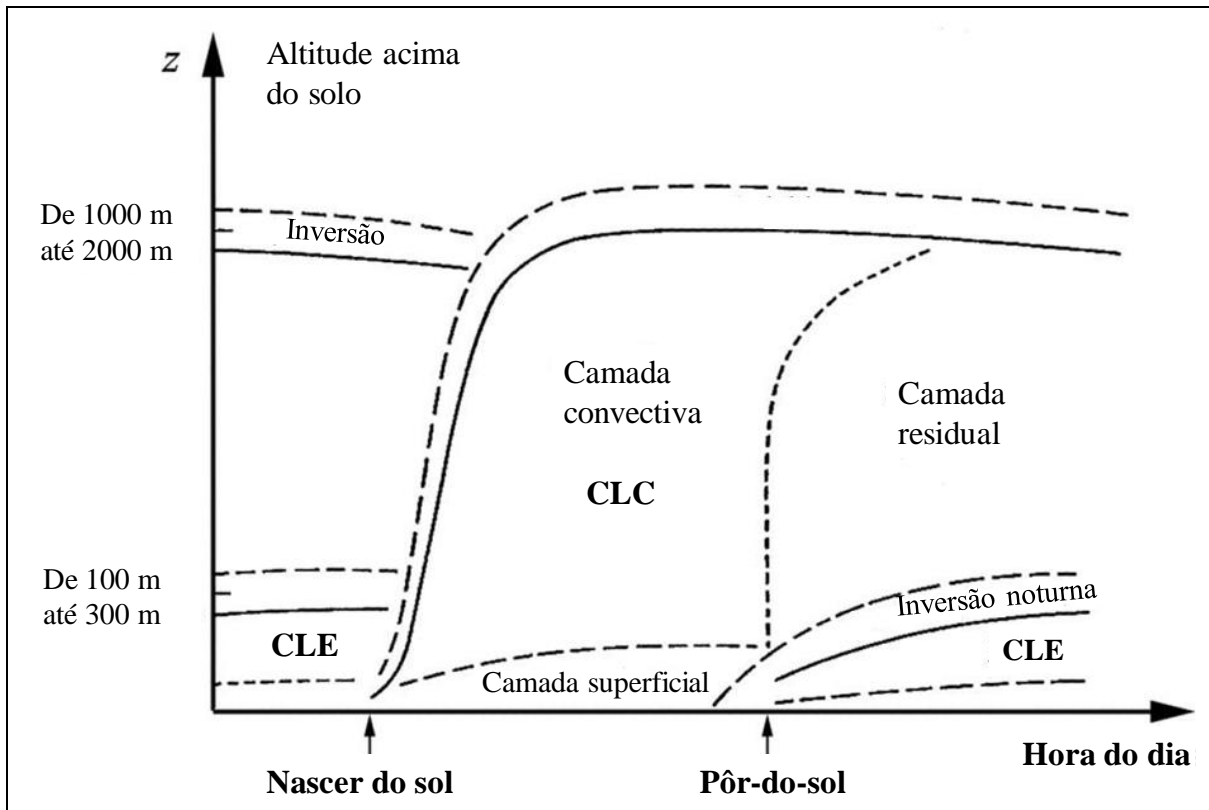


Figura 2.2 – Evolução típica da camada limite atmosférica ao longo de um dia sobre solo exposto e sob céus abertos [Adaptado de Garratt, 1992]

Em resumo, a presença ou ausência de efeitos térmicos relevantes dentro da CLA muda de maneira relevante as características do escoamento do vento nas altitudes importantes para o setor eólico. Dentro do escopo do presente estudo; na ausência de efeitos térmicos significantes, a CLA será chamada de Camada Limite Estável (CLE). Esta configuração da CLA é apresentada na seção 2.1.1. Na presença de efeitos térmicos significantes, a CLA será denominada Camada Limite Convectiva (CLC), e suas características são apresentadas na seção 2.1.2.

2.1.1 Camada Limite Estável

Na ausência de convecção natural, durante os períodos noturnos, ocorre estratificação térmica positiva dentro da CLA. As noites tipicamente terminam com uma delgada “subcamada limite noturna”. Segundo Cushman e Beckers, 2012, a espessura desta subcamada depende da

velocidade média do vento e da rugosidade base da cobertura do solo, mas ela raramente excede a marca de 300 m.

Nesta configuração do escoamento atmosférico superficial observa-se tipicamente uma configuração estável, onde uma camada de ar frio (mais densa) situa-se mais próxima do solo e uma cama de ar quente (menos densa) situa-se acima, sem contato com a superfície. O perfil vertical de temperatura é positivamente estratificado e a magnitude das forças de empuxo resultantes é reduzida, o que auxilia na diminuição da intensidade de turbulência das correntes livres. Nessas condições, a camada limite é frequentemente denominada de Camada Limite Estável (CLE).

Segundo Michalcová et al., 2017, O escoamento dentro da CLE é então caracterizado por baixa intensidade de turbulência e pouca mistura entre as camadas de fluido escoando em diferentes altitudes. Como consequência, verifica-se coeficientes de extrapolação vertical (" α ") mais elevados do que aqueles característicos dos períodos diurnos. A definição deste coeficiente é apresentada na equação (2.6). Perfis diários para intensidade de turbulência e coeficiente α derivados a partir das medições realizadas para torres anemométricas instaladas na área de interesse do estudo são apresentados na Figura 4.8 e na Figura 4.9.

Esta configuração (positivamente) estratificada da CLA é típica dos períodos noturnos e de localidades onde a superfície terrestre é substancialmente mais fria que o escoamento atmosférico. A CLE pode perdurar por períodos longos nas regiões com latitudes elevadas, onde os invernos são longos e com poucas horas de sol, o que possibilita que o ar atinja temperaturas muito baixas.

2.1.2 Camada Limite Convectiva

Após o nascer do sol, a atmosfera começa a ser aquecida “por baixo” e a convecção (natural) térmica começa rapidamente a influenciar o escoamento dentro da CLA. As componentes verticais do escoamento atmosférico desfazem a delgada subcamada limite formada durante a noite e a substituem pela Camada Limite Convectiva (CLC). Dependendo da intensidade da estratificação que havia acima da CLE, na presença de gradientes convectivos intensos ela pode se desfazer com rapidez, dando espaço para a rápida formação da CLC, conforme ilustrado pela Figura 2.2.

Na CLC as forças de empuxo resultantes são positivas junto à superfície, e contribuem para amplificação de instabilidades térmicas e para o consequente aumento na intensidade de turbulência nas correntes de vento livre. Esta configuração do escoamento atmosférico é típica de períodos diurnos e também de regiões tropicais (de baixa latitude), em virtude das temperaturas elevadas na superfície terrestre destas regiões durante boa parte do ano. O comportamento diurno real da intensidade de turbulência, obtido através de medições realizadas por torres anemométricas instaladas na área de interesse do presente estudo é apresentado na Figura 4.8 e na Figura 4.9.

A turbulência “livre” presente nas correntes de vento é consideravelmente mais fraca do que a turbulência induzida pela convecção na CLC, exceto nas camadas mais baixas do escoamento, onde ambas têm magnitudes semelhantes. Na Figura 2.2 essa sub-região é indicada como “camada superficial”. Conforme ilustrado pela Figura 2.2, a espessura típica da CLC situa-se entre 1 km e 2 km desde o nível do solo, no entanto, o aquecimento solar assistido pela energia térmica liberada pela condensação do vapor d’água podem originar um processo convectivo tão intenso que estenda os níveis elevados de turbulência da CLC por toda a troposfera (até 10 km do solo). Estas ocorrências se dão com certa frequência dentro da zona de convergência intertropical., isto é, nas regiões mais próximas da linha do equador.

No âmbito deste estudo a CLC será considerada representativa tanto do escoamento atmosférico neutro e como do escoamento atmosférico instável.

2.2 Métricas para Estabilidade na CLA

No âmbito do presente estudo o termo “*métricas para estabilidade*” refere-se a variáveis mensuráveis, através das quais se pode quantificar (ou estimar) períodos durante os quais o escoamento é afetado pela estabilidade atmosférica. Diversos autores já investigaram métodos para determinar estas “métricas” a partir de medições do escoamento atmosférico [Holtslag et al., 2013].

Garratt, 1992, demonstrou que a variação vertical de temperatura potencial seria útil para a avaliação da estratificação térmica dentro da Camada Limite Atmosférica (CLA). A temperatura potencial (" θ ") é a temperatura que uma parcela de fluido (“ar”) atingiria se fosse expandida ou comprimida de forma adiabática desde o seu estado real de pressão e temperatura

para uma pressão padrão, tipicamente definida como 100 kPa . Sua definição matemática é apresentada na Equação (2.1).

$$\theta = T \cdot \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (2.1)$$

Onde:

- " θ " é a temperatura potencial [K];
- " T " é a temperatura absoluta [K];
- " P " é a pressão absoluta do fluido [Pa];
- " P_0 " é a pressão de referência, tipicamente definida como 10^5 Pa ;
- " R " é a constante específica dos gases [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$];
- " C_p " é a capacidade térmica a pressão constante [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$];

Segundo Garratt, 1992 e Bleeg et al., 2014, quando o escoamento atmosférico se encontra positivamente estratificado, a temperatura potencial aumenta com a altitude desde o solo. Durante estes períodos as movimentações verticais do escoamento são amortecidas devido às forças de empuxo resultantes, e a intensidade de turbulência é reduzida. Ainda segundo os autores, se o perfil de temperatura potencial apresenta decréscimo com a altitude, a o escoamento atmosférico é instável e a CLA se torna convectiva.

A Figura 2.3 ilustra um perfil típico de temperatura potencial em função da altitude para o período diurno. Pode-se observar uma região delgada de instabilidade na região mais próxima do solo. Em seguida observa-se uniformidade da temperatura potencial até cerca de 1000 m, e estratificação na região superior a 1000 m de altitude, na região externa à CLA.

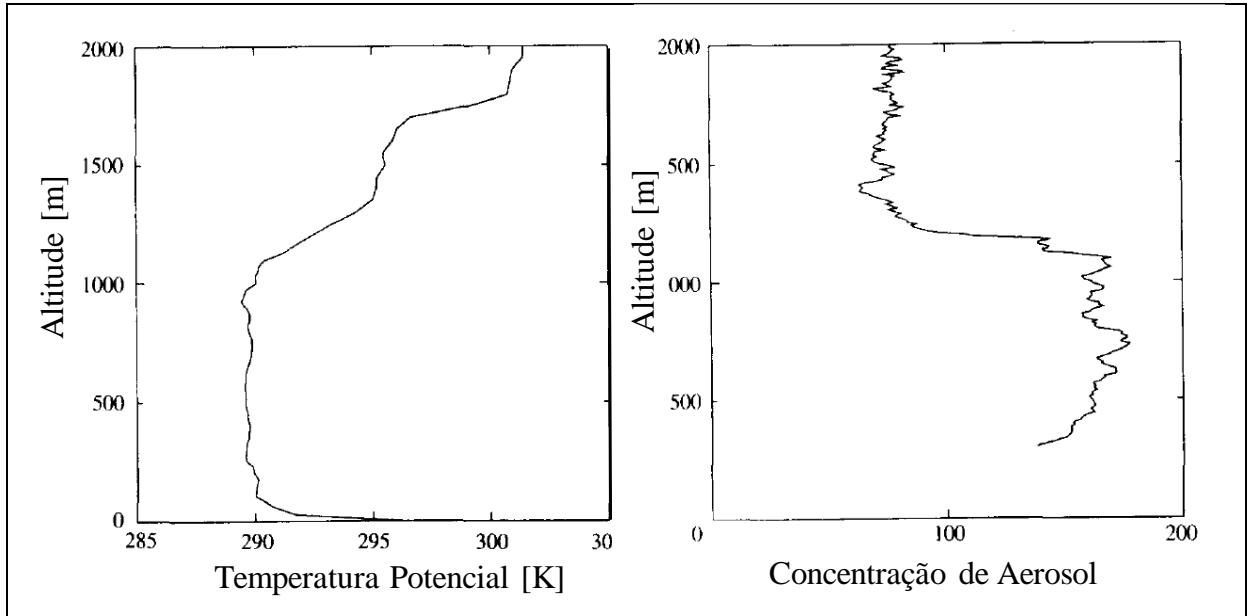


Figura 2.3 – Temperatura potencial e dispersão de poluentes variando com altitude para o período diurno [Adaptado de Garratt, 1992]

A Figura 2.4 ilustra os perfis teóricos de variação da temperatura potencial para períodos diurnos, quando a CLA é tipicamente convectiva, e para os períodos noturnos, quando a CLA é termicamente estratificada.

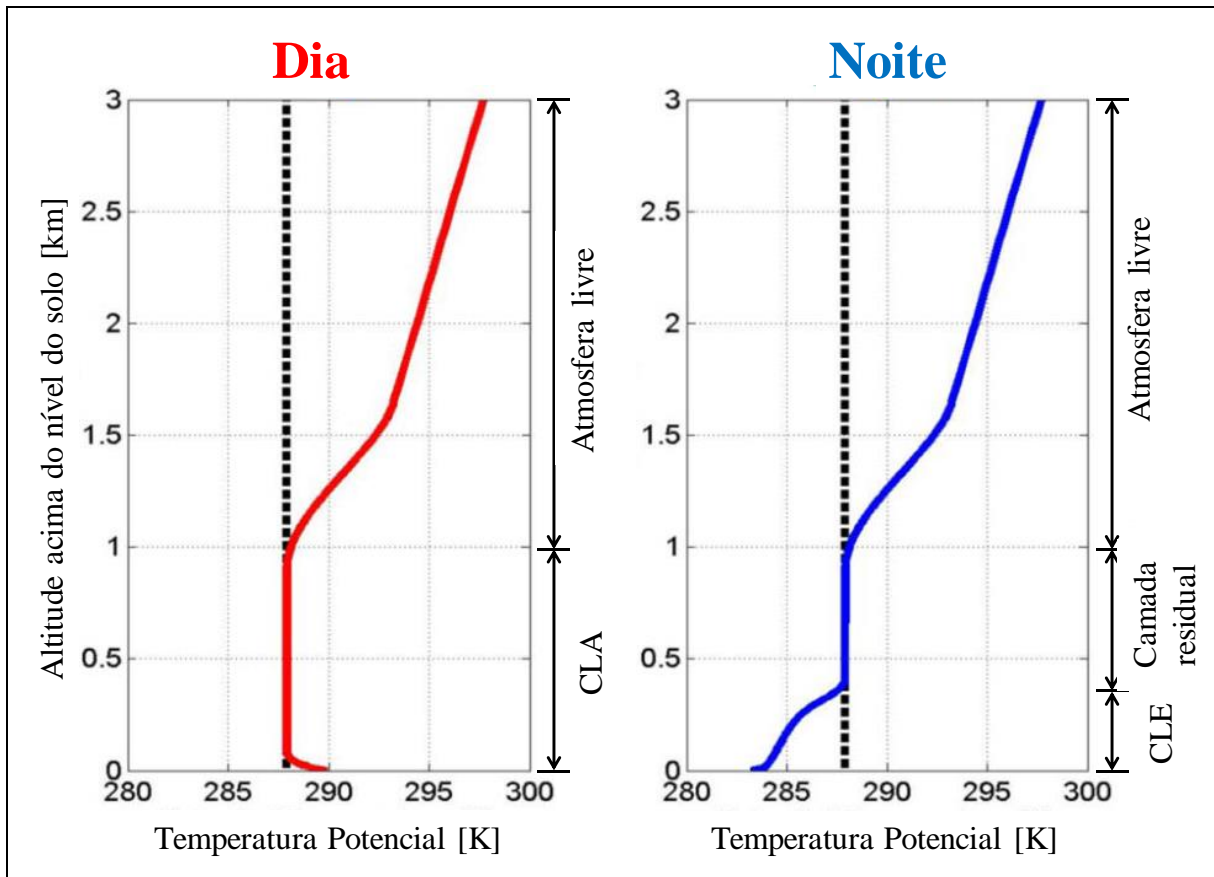


Figura 2.4 – Perfis verticais teóricos de temperatura potencial [Adaptado de Bleeg et al., 2015]

A taxa de variação vertical da temperatura potencial pode ser utilizada como parâmetro indicador da estabilidade do escoamento atmosférico livre. Contudo, a instrumentação tipicamente presente em uma torre anemométrica geralmente não é suficiente para determinar de maneira precisa a variação vertical da temperatura potencial. Conforme descrito na seção 1.1.2 e no Apêndice C, as torres anemométricas instaladas no Brasil raramente possuem mais de um sensor de temperatura [EPE, 2014]. Adicionalmente, segundo Bleeg et al., 2014, mesmo nos casos onde as torres anemométricas possuem múltiplos sensores de temperatura instalados em alturas diferentes, a precisão destes sensores geralmente é insuficiente para caracterizar o perfil vertical de temperatura potencial. Hayes et al., 2012, propuseram uma técnica para corrigir tendências indevidas observáveis nos dados de temperatura registrados por torres anemométricas, de forma que o perfil de temperatura potencial pudesse ser determinado com precisão aceitável, contudo essa técnica não foi completamente validada pelos autores.

Tendo em vista a instrumentação tipicamente disponível em torres anemométricas e a precisão destes instrumentos, Blegg et al., 2014, concluíram que os ciclos diários de intensidade de turbulência e do coeficiente da lei de potências são parâmetros aceitáveis para quantificar a duração dos períodos durante os quais o escoamento atmosférico apresentou estabilidade. A grande vantagem destes indicadores seria a possibilidade de calculá-los a partir da instrumentação básica presente na maioria das torres anemométricas. No âmbito do presente estudo, a variável “intensidade de turbulência” (IT) é definida conforme a Equação (1.1). O coeficiente adimensional de extrapolação vertical “ α ” da “lei de potência” é definido pela Equação (2.6). A variação diária teórica esperada para estas variáveis foi descrita por Wenzel et al., 2014, e é apresentada na Figura 2.5.

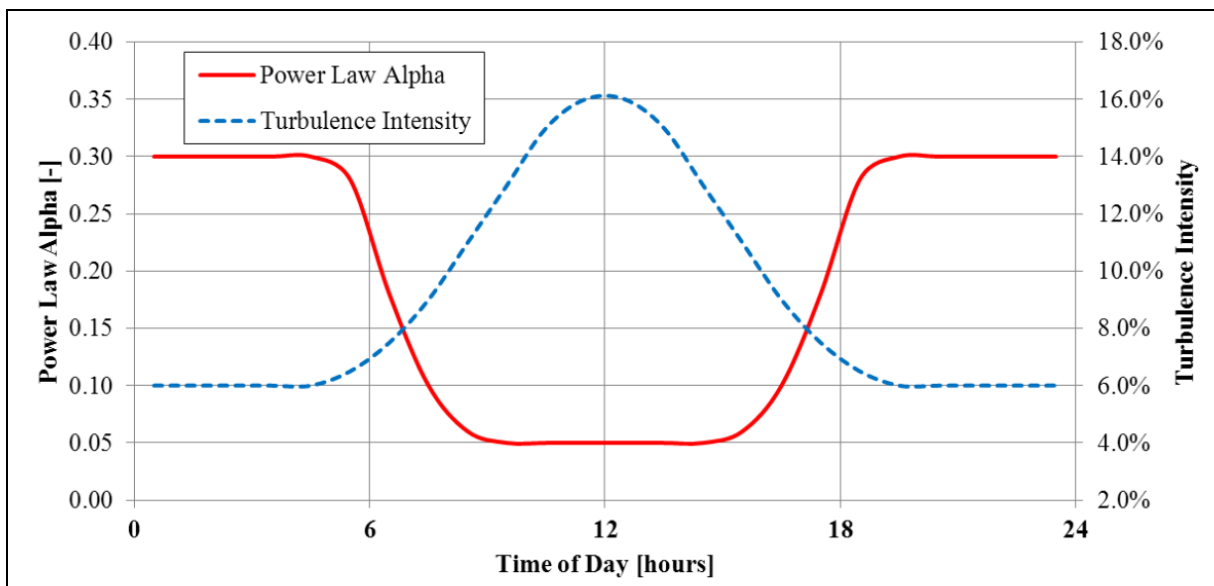


Figura 2.5 – Perfis diários teóricos de intensidade de turbulência e coeficiente de extrapolação vertical [Adaptado de Wenzel et al., 2014]

O comportamento diário apresentado na Figura 2.5 é verificável através de medições reais realizadas na área de interesse deste estudo. Utilizando os dados registrados pelas torres anemométricas “E” e “D”, os perfis diários de intensidade de turbulência e coeficiente de extrapolação vertical “ α ” foram calculados e são apresentados na Figura 4.8 e na Figura 4.9. As torres anemométricas instaladas no local do projeto são apresentadas em detalhes ao longo da seção 4.2.

Para cada torre anemométrica, os registros correspondentes a níveis relativamente elevados do coeficiente " α " e a níveis relativamente baixos de intensidade de turbulência foram classificados como "escoamento estável". Em contrapartida, os registros correspondentes a níveis relativamente baixos do coeficiente " α " e a níveis elevados de intensidade de turbulência foram classificados como escoamento "neuro" ou "instável". Estes níveis de corte específicos considerados para cada torre anemométrica são apresentados na Tabela 4.1

2.3 Perfil Vertical do Escoamento (Próximo do Solo)

Conforme descrito por Burton et al., 2011, a variação vertical da velocidade do vento entre altitudes relevantes para indústria eólica (até 200 m acima do nível do solo) é descrita pela lei logarítmica apresentada na Equação (2.2).

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) + \psi \right] \quad (2.2)$$

Onde:

- " u " é a componente horizontal de velocidade do vento [m/s];
- " u^* " é a velocidade de fricção (ou velocidade turbulenta) [m/s];
- " z " é a altitude em relação ao nível do solo [m];
- " κ " é a constante adimensional de Von Kármán;
- " z_0 " é o comprimento efetivo de rugosidade [m];
- " ψ " é o fator adimensional de correção para estabilidade do escoamento.

Esta formulação advém da teoria para formação da Camada Limite Turbulenta (CLT) e suas respectivas subcamadas. Alguns dos conceitos teóricos fundamentais para esta formulação são detalhados no Apêndice A.2, juntamente com a definição do termo "lei de parede". A equação (2.2) não deve ser empregada para região imediatamente próxima da superfície do solo ($z < z_0$). A velocidade de fricção (ou velocidade turbulenta) é definida na equação (A.19). A constante de Von Kármán para escoamentos sobre placas planas tipicamente assume o valor " $\kappa = 0,41$ ". Em geral adota-se este valor também para o escoamento do vento no interior da CLA.

Segundo Newman e Klein 2014, o fator de correção adimensional " ψ " é diretamente proporcional ao nível de estratificação térmica do escoamento e inversamente proporcional ao comprimento de Monin-Obukhov (" L_{MO} "), conforme indicado pela Equação (2.3).

$$\psi \propto \frac{z}{L_{MO}} \quad (2.3)$$

Onde:

- " L_{MO} " é a escala de comprimento de Monin-Obukhov [m].

A existência e a intensidade da estratificação térmica no escoamento dentro da subcamada superficial podem ser aferidas pela magnitude de " ψ " [Ross et al., 2004]:

- $\psi > 0$: Escoamento estável (característico da CLE);
- $\psi \leq 0$: Escoamento neutro ou instável (característico da CLC).

O comprimento " L_{MO} " advém da teoria de similaridade proposta por Monin e Obukhov, 1954. Trata-se de um parâmetro de comprimento para a subcamada superficial que se forma dentro da CLA (vide Figura 2.2). Este parâmetro caracteriza a altura a partir da qual a produção de energia cinética turbulenta por forças de empuxo é superior à produção de energia cinética turbulenta por cisalhamento. Sua formulação mais aceita no setor eólico é apresentada na Equação (2.4).

$$L_{MO} = - \frac{u^{*3} \cdot \theta_z}{g \cdot \kappa \cdot \overline{w' \cdot \theta'}} \quad (2.4)$$

Onde:

- " L_{MO} " é a escala de comprimento de Monin-Obukhov [m];
- " θ_z " é a temperatura potencial avaliada na altura de medição [K], definida conforme a Equação (2.1);
- " g " é a aceleração gravitacional, tipicamente adotada como 9,81 [m/s²];
- $\overline{w' \cdot \theta'}$ é o fluxo (turbulento) de energia térmica avaliado na superfície [$\frac{m}{s} \cdot K$];
 - w' é uma perturbação na componente "vertical" de velocidade [$\frac{m}{s}$];
 - θ' é uma perturbação na temperatura potencial [K].

Segundo Ross et al., 2004, a magnitude do comprimento de Monin-Obukhov " L_{MO} " também é um indicador da estratificação térmica camada superficial:

- $L_{MO} > 0$: Escoamento estável (característico da CLE);
- $L_{MO} \rightarrow \infty$: Escoamento neutro (característico da CLC);
- $L_{MO} \leq 0$: Escoamento instável (característico da CLC).

Ainda segundo a teoria de similaridade de Monin e Obukhov, 1954, a magnitude absoluta do módulo $|L_{MO}|$ representa o desvio do escoamento real em relação ao escoamento estaticamente neutro. Quanto menor o $|L_{MO}|$, maior o desvio. Em outras palavras, um escoamento atmosférico qualquer para o qual $L_{MO} = 100 \text{ m}$ apresenta estabilidade atmosférica mais intensa do que um outro escoamento ilustrativo para o qual $L_{MO} = 300 \text{ m}$.

Segundo Burton et al., 2011, para as escalas de comprimento relevantes ao setor eólico é comum que se considere que " ψ " seja pequeno se comparado com " $\ln(z/z_0)$ ", de forma que a Equação (2.2) possa ser aproximada a Equação (2.5).

$$u(z) \approx \frac{u^*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.5)$$

O significado físico da altura de rugosidade " z_0 " é ilustrado pela Figura 2.6. Trata-se de uma medida da rugosidade (ou aspereza) da cobertura de uma dada superfície, e, portanto, esta medida é diretamente proporcional à intensidade do atrito sofrido pelas primeiras camadas de escoamento em contato com tal superfície.

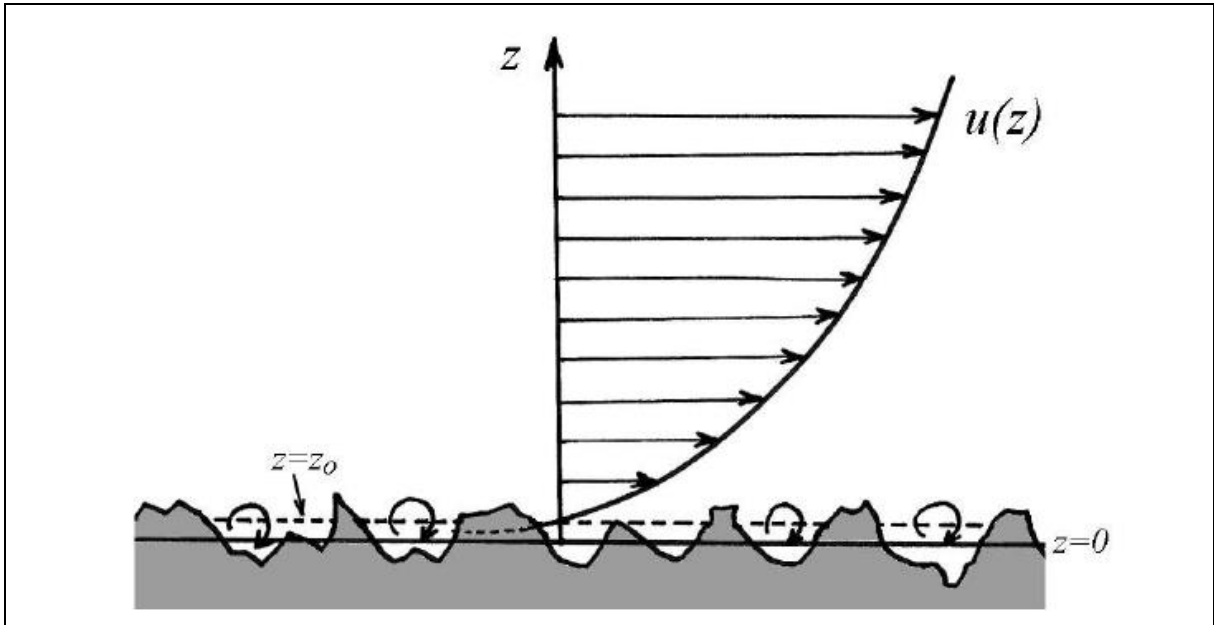


Figura 2.6 – Perfil vertical de velocidade teórico dentro da CLA segundo a lei logarítmica

No caso do escoamento atmosférico do vento a escala de comprimento da rugosidade superficial é aumentada em relação ao escoamento sobre uma placa plana. Diversos estudos já foram conduzidos para quantificar e categorizar diferentes tipos de cobertura do solo quanto à rugosidade. Valores tipicamente adotados pela indústria eólica são exibidos na Tabela 2-1 a seguir.

Tabela 2-1 Valores típicos para rugosidade (ou cobertura do solo)

Tipo de superfície	z_0 [m]	Referência
Corpos de água	0,00001	Draxler et al., 2001
Neve; Areia	0,001	Draxler et al., 2001
Solo exposto; Campos abertos	0,01 – 0,03	Davenport, 1963
Vegetação rasteira; Savana	0,05 – 0,1	Davenport, 1963
Arbustos; Caatinga	0,1 – 0,3	Davenport, 1963
Árvores (>5 m), Vilarejos	0,3 – 0,4	Davenport, 1963 e Garratt, 1992
Florestas densas, Zonas urbanas	0,5 – 1,0	Davenport, 1963

Um mapa com a cobertura de rugosidade para o local de interesse do presente estudo foi criado com base em imagens áreas publicamente disponíveis [Google Earth, 2017]. Este mapa é apresentado na Figura 4.2.

Para avaliações de recurso eólico é comum que se adote a “lei de potência” como aproximação para o perfil vertical do escoamento do vento [Burton et al., 2011]. Esta lei de potência é apresentada na Equação (2.6).

$$\frac{u(z_1)}{u(z_2)} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^\alpha \quad (2.6)$$

Onde:

- "u" é a componente horizontal de velocidade do vento [m/s];
- "z" é a altitude em relação ao nível do solo [m];
- "α" é o coeficiente adimensional de extrapolação vertical.

Em relação à lei logarítmica da Equação (2.5), a aproximação pela “lei de potência” possibilita derivar o perfil vertical para a posição de uma torre anemométrica através de duas (ou mais) medições de velocidade do vento em diferentes alturas, sem que seja necessário conhecimento do comprimento efetivo de rugosidade (z_0) ou da constante apropriada de Von Kármán (κ). Segundo Newman e Klein 2014, para altitudes até 20 m do solo a “lei logarítmica” apresenta extrapolações verticais mais precisa de velocidade. Entre 20 m e 100 m do solo ambas as “leis” apresentariam precisão equivalente. E entre 100 m e o final da CLA a “lei de potência” seria mais precisa para extrapolar verticalmente a velocidade do escoamento atmosférico. Para comparação, na Figura 4.7 as medições realizadas por anemômetros (tipo copo) instalados em três diferentes alturas na Torre Anemométrica “E” são sobrepostas com melhores ajustes segundo a “lei logarítmica” da Equação (2.5) e segundo a “lei de potência” da Equação (2.6). As torres anemométricas instaladas no local do projeto são apresentadas em detalhes ao longo da seção 4.2.

Conforme mencionado na seção 2.2, o coeficiente "α" da lei de potência também pode ser utilizado como indicador da presença de estabilidade no escoamento atmosférico. Segundo Burton et al., 2011, tradicionalmente condições de escoamento neutro são associadas com $\alpha = 1/7$. Valores mais elevados do coeficiente "α" seriam indicativos de regime de escoamento estável, e valores mais baixos seriam indicativos de escoamento instável. Perfis diários de variação do coeficiente "α" derivados a partir de medições reais, realizadas por duas torres anemométricas instaladas na área de interesse do presente estudo são apresentados na Figura 4.8 e Figura 4.9.

3 MODELAGEM DO ESCOAMENTO NO SETOR EÓLICO

A modelagem do escoamento do vento desempenha um papel importante nas avaliações pré-construtivas de produção de energia em parques eólicos. Conforme descrito na seção 1.1.1, tais avaliações são fundamentais para existência e desenvolvimento da indústria eólica como um todo.

As campanhas de medição de dados anemométricos realizadas nos locais dos projetos, e as etapas subsequentes de análise e tratamento dos dados permitem caracterizar o regime eólico de longo prazo na posição das medições realizadas. Os modelos de escoamento são responsáveis por transpor o regime eólico das posições de medição para as posições dos aerogeradores. Sem que houvesse esta previsão do recurso eólico para as posições propostas de aerogeradores não seria possível obter estimativas confiáveis de produção de energia para um parque eólico que ainda não exista.

Existe no setor eólico uma grande variedade de tipos de modelos para simulação do escoamento atmosférico. Modelos de “mesoescala” (média escala) tipicamente utilizam resoluções de malha superiores a 1 km e são frequentemente empregados para previsões meteorológicas, pois englobam as escalas de comprimento de sistemas climáticos locais, como tempestades e outros fenômenos [Cushman e Beckers, 2012]. Para simulação do escoamento atmosférico em parques eólicos são geralmente empregados modelos de microescala, com resoluções de malha entre 15 m e 200 m, pois estes modelos são capazes de simular com alta resolução as perturbações no escoamento causadas por características topográficas locais. Em alguns casos também são empregados acoplamentos de modelos de grandes escalas e de microescala, de forma que mais fenômenos físicos possam ser simultaneamente contemplados. Mais detalhes sobre as escalas do escoamento atmosférico são apresentados na seção 2 deste estudo.

Segundo Bleeg et al., 2014, os modelos de microescala para simulação do escoamento atmosférico podem ser genericamente subdivididos entre os modelos lineares e os modelos não-lineares. Os modelos lineares, como o WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*) são amplamente aplicados em avaliações de produção de energia no setor eólico, pois além de produzirem resultados úteis em curtos espaços de tempo também possuem uma extensa base de experiência. Contudo, segundo Bleeg et al., 2014, as hipóteses simplificadoras tipicamente

adotadas por modelos lineares podem ocasionar erros significantes nas previsões destes modelos.

Com a evolução contínua e exponencial dos recursos computacionais, as análises de produção de energia para parques eólicos têm evoluído para o uso de modelos não-lineares que possam ser utilizados dentro de um espaço de tempo comercialmente viável para este tipo de análise. Conforme descrito por Bechmann et al., 2011, neste quesito os modelos CFD (*Computer Fluid Dynamics*) do tipo RANS (*Reynolds-Averaged Navier–Stokes*) têm sido amplamente difundidos e adaptados para a modelagem do escoamento atmosférico em parques eólicos. O equacionamento RANS é apresentado detalhadamente ao longo Apêndice B.

3.1 Comparação entre modelos amplamente utilizados

O estudo comparativo realizado por Bechmann et al., 2011, avaliou resultados de simulações do escoamento atmosférico submetidos por 57 participantes diferentes para o mesmo problema: o escoamento do vento ao longo da pequena ilha *Bolund* localizada na costa da Dinamarca, cerca de 5 km ao norte da cidade de *Roskilde*. A Figura 3.1 e a Figura 3.2 ilustram a geografia da ilha, assim como a localização das 10 torres anemométricas instaladas pelos pesquisadores.



Figura 3.1 – Vista noroeste da ilha *Bolund*, Dinamarca [adaptado de Bechmann et al., 2011].

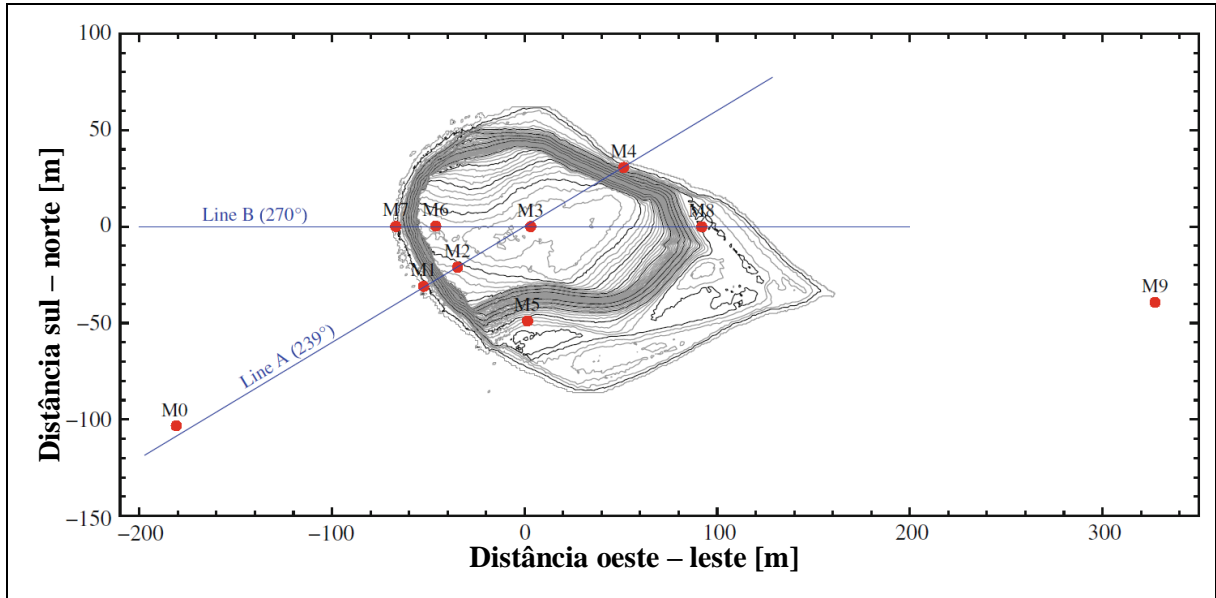


Figura 3.2 – Vista superior da ilha *Bolund*, Dinamarca. Contornos de elevação com intervalos de 0,25 m. Torres anemométricas representadas por pontos vermelhos [Adaptado de Bechmann et al., 2011]

A precisão dos resultados enviados pelos diferentes participantes foi avaliada majoritariamente através das medições anemométricas realizadas pelas 10 torres instaladas no local. A partir dessas medições foram calculados erros de previsão cruzada (modelo vs. medições) para velocidade média do escoamento, perfil vertical de velocidade e energia cinética turbulenta. A Tabela 3.1 apresenta os erros globais e os melhores resultados obtidos, setorizados por tipo modelo de escoamento.

Tabela 3.1 – Erros médios de previsão cruzada entre modelo e medições para o comparativo realizado por Bechmann et al., 2011.

Tipo de modelo	Número de participantes	Erro global para velocidade média [%]	Mínimo erro para velocidade média [%]	Erro global para energia cinética turbulenta [%]	Mínimo erro para energia cinética turbulenta [%]
CFD LES	6	16,0	13,5	35,9	34,6
CFD RANS 2eq.	27	13,6	10,2	36,9	21,6
CFD RANS 1eq.	8	16,3	12,2	36,4	32,4
Modelos lineares	10	21,0	18,5	58,8	54,6
Exp. Canal de água	1	16,1	16,1	63,4	63,4
Exp. Túnel de vento	1	13,3	13,3	59,4	59,4
Média		15,7	12,6	41,8	32,4

Dentre os 10 primeiros colocados no teste (aqueles com os menores erros), todos utilizaram simulações *CFD RANS* com modelo de turbulência tipo “ $k-\varepsilon$ ”. Entretanto, mesmo os menores erros obtidos apresentavam magnitudes elevadas, da ordem de 10% para velocidade e 22% para energia cinética turbulenta, o que sugere que ainda há muito espaço para melhoria nas metodologias aplicadas para modelagem numérica do escoamento da Camada Limite Atmosférica (CLA).

Diversos estudos publicados nos últimos anos abordam as deficiências dos modelos *RANS* tipo “ $k-\varepsilon$ ” tradicionalmente utilizados no setor eólico. Muitos destes estudos apontam para a estratificação térmica da camada limite atmosférica como uma das principais causas para imprecisão dos modelos tradicionais. Dentre estes estudos destacam-se experimentos com túnel de vento realizados por Ross et al., 2004, e as extensivas validações de simulações numéricas conduzidas por Corbett et al., 2014.

A partir dos estudos mencionados (que são corroborados por diversas outras publicações) é possível levantar a suspeita de que a maioria modelos *RANS* tipo “ $k-\varepsilon$ ” atualmente difundidos pelo setor eólico reproduzem de maneira satisfatória as condições meteorológicas características da camada limite convectiva. Entretanto, eles não têm capacidade para fornecer previsões precisas e confiáveis em relação ao escoamento atmosférico característico da camada limite estável.

3.2 Modelagem da Camada Limite (Atmosférica) Estável

Segundo Michalcová et al., 2017, modelos para a simulação do escoamento em microescala utilizados no setor eólico comumente adotam condições de contorno e de fechamento que desprezam tanto os efeitos da convecção térmica como os efeitos da produção de energia cinética turbulenta devido às forças de empuxo. Os autores demonstram ainda que tais modelos geralmente são incapazes de fornecer previsões precisas para condições atmosféricas que se aproximam da Camada Limite Estável (CLE), descrita na seção 2.1.1.

Bleeg et al., 2014, revisaram a abordagem do equacionamento RANS “*k-ε*” tradicionalmente utilizada para simulações com CFD no setor eólico. Foram testadas modificações que buscavam capacitar os modelos a simular com maior precisão o escoamento atmosférico típico da CLE. Os pesquisadores nomearam este modelo modificado de “*RANS estável*”. Esta terminologia também será empregada no presente estudo.

A principal diferença no equacionamento utilizado para o modelo proposto (“*RANS estável*”) se dá pela inclusão de forças de campo representando o efeito da gravidade e o efeito das forças de Coriolis (resultantes da rotação do planeta). O equacionamento foi formulado utilizando a aproximação de Boussinesq, ou seja, o escoamento foi considerado incompressível e os efeitos das variações de densidade na equação de balanço da quantidade de movimento são desprezados, exceto nos termos ligados as forças de campo. Segundo Bleeg et al., 2014, a aproximação de Boussinesq é aplicável quando a escala vertical de comprimento do escoamento é muito menor e a escala de variação de densidade, que no caso do escoamento atmosférico é da ordem de 8 km. Este critério é verificável na modelagem do escoamento dentro da CLE

A forma integral da equação para balanço da quantidade de movimento postulada por Bleeg et al., 2014, e utilizada no modelo “*RANS estável*” é exibida na Equação (3.1). Pressupõe-se escoamento incompressível, com viscosidade constante e em regime permanente.

$$\oint \rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} \cdot d\mathbf{a} = - \oint p \mathbf{I}_m \cdot d\mathbf{a} + \oint \boldsymbol{\tau} \cdot d\mathbf{a} + \int (\mathbf{F}_g + \mathbf{F}_C) dV \quad (3.1)$$

Onde:

- “ ρ ” é a massa específica [kg/m^3];
- “ \mathbf{v} ” é o campo vetorial de velocidade [m/s];
- “ $d\mathbf{a}$ ” é o elemento vetorial de área [m^2];

- " p " é a pressão aparente do fluido [Pa];
- " I_m " é a matriz identidade adimensional;
- " $\boldsymbol{\tau}$ " é o tensor de tensões viscosas [N/m^2];
- " \mathbf{F}_g " é o vetor para força de campo gravitacional [N/m^3];
- " \mathbf{F}_c " é o vetor para força de campo referente ao efeito Coriolis [N/m^3].

A força de campo gravitacional (\mathbf{F}_g) é definida na Equação (3.2).

$$\mathbf{F}_g = \rho\beta\mathbf{g}(\theta_{ref} - \theta) \quad (3.2)$$

Onde:

- " β " é o coeficiente de expansão térmica [K^{-1}];
- " \mathbf{g} " é o campo vetorial gravitacional [m/s^2];
- " θ " é a temperatura potencial [K].

A temperatura potencial foi definida na equação na Equação (2.1). Trata-se resumidamente da temperatura que uma parcela de fluido ("ar") teria se fosse expandida ou comprimida de forma adiabática desde seu estado real de pressão e temperatura para uma pressão padrão, tipicamente definida como 100 kPa.

O vetor força de campo relativo ao efeito Coriolis (" \mathbf{F}_c ") é definido na Equação (3.3). Segundo Bleeg et al., 2014, sem o termo de Coriolis, um escoamento homogêneo não poderia ser mantido sobre terreno plano e uniforme desde o solo até o topo da Camada Limite Atmosférica (CLA). Adicionalmente, segundo os autores, a inclusão do termo de Coriolis permite que o modelo capture a formação de um jato por cisalhamento na interface da camada limite e a formação de uma espiral de Ekman pronunciada, ambos efeitos tipicamente associados com a Camada Limite Estável (CLE).

$$\mathbf{F}_c = \rho f v (\hat{i}) - \rho f u (\hat{j}) + 0 (\hat{k}) \quad (3.3)$$

Onde:

- " f " é a frequência de Coriolis associada à rotação do planeta [s^{-1}];
- " u " é a componente do vetor velocidade na direção \hat{i} [m/s];
- " v " componente do vetor velocidade na direção \hat{j} [m/s].

O parâmetro (ou frequência) de Coriolis (" f ") por sua vez é definido por Burton et al., 2011, conforme a Equação (3.4).

$$f = 2 \cdot \Omega \cdot \text{sen}(|\phi|) \quad (3.4)$$

Onde:

- " Ω " é a velocidade de rotação da Terra, equivalente a $7,29 \cdot 10^{-5}$ [rad/s]
- " ϕ " é a latitude geográfica [graus].

Conforme mencionado na seção 2.1.1, a estratificação térmica que ocorre dentro da CLE reduz a intensidade de turbulência do escoamento livre e aumenta o gradiente das componentes horizontais de velocidade com a altitude. Segundo Bleeg et al., 2014, estes efeitos podem ser capturados através da adição de termos de produção associados ao empuxo (ou forças hidrostáticas) nas equações de balanço para energia cinética turbulenta (" k ") e para taxa de dissipação turbulenta (" ε "), conforme apresentado nas Equações (3.5) e (3.6), respectivamente.

$$\oint \rho k v \cdot da = \oint \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \cdot da + \int (P_k + P_b - \rho \varepsilon + S_k) dV \quad (3.5)$$

Onde:

- " k " é a energia cinética turbulenta [$J \cdot kg^{-1}$];
- " μ " é a viscosidade dinâmica [$Pa \cdot s$];
- " μ_t " é a viscosidade aparente ou "turbulenta" [$Pa \cdot s$];
- " σ_k " é o número de Prandtl " k " (razão entre difusão de quantidade de movimento turbulenta e difusão de " k ");
- " P_k " é um termo associado à produção de " k " por cisalhamento [$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-3}$];
- " P_b " é um termo associado à produção de " k " por empuxo [$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-3}$];
- " ε " é a taxa de dissipação turbulenta" [$J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$];
- " S_k " é o termo de "fonte" [$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-3}$].

$$\oint \rho \varepsilon \mathbf{v} \cdot d\mathbf{a} = \oint \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \cdot d\mathbf{a} + \int \left(\frac{\varepsilon}{k} [C_{\varepsilon 1} (P_k + C_{\varepsilon 3} P_b) - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon] + S_\varepsilon \right) dV \quad (3.6)$$

Onde:

- " σ_ε " é o número de Prandtl "ε" (razão entre difusão de quantidade de mov. turbulenta e difusão de "ε");
- " C_ε " são coeficientes da equação de "ε" (valores adotados são apresentados na Tabela 3.2);
- " S_ε " é o termo de "fonte" [$J \cdot s^{-2} \cdot m^{-3}$].

O termo de produção associado às forças de empuxo é definido na Equação (3.7).

$$P_b = \beta \frac{\mu_t}{\sigma_t} (\nabla \theta \cdot \mathbf{g}) \quad (3.7)$$

Onde:

- " σ_t " é o número de Prandtl turbulento (razão entre difusão da quantidade de movimento turbulenta e difusão térmica).

A equação para viscosidade turbulenta (ou "aparente") conforme o modelo "k-ε" é apresentada na Equação (3.8).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.8)$$

Onde:

- " C_μ " é o coeficiente da equação para viscosidade parente (o valor adotado é apresentado na Tabela 3.2).

A temperatura potencial é uma variável adicional que aparece nos termos associados à gravidade e ao empuxo nas equações para o balanço de quantidade de movimento e para o balanço de "k" e "ε". Desta forma, torna-se necessário que a equação para o balanço de energia seja simultaneamente resolvida pelo modelo. A forma integral para a equação de balanço de energia, conforme foi implementada no modelo, é apresentada na Equação (3.9).

$$\oint \rho \left(h_s + \frac{|v|^2}{2} \right) \mathbf{v} \cdot d\mathbf{a} = \oint \dot{q} \cdot d\mathbf{a} + \oint \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{v} d\mathbf{a} + \int (\mathbf{F}_g + \mathbf{F}_c) \cdot \mathbf{v} dV \quad (3.9)$$

Onde:

- " h_s " é a entalpia específica [J/kg];
- " \dot{q} " é o vetor fluxo de energia térmica (ou "fluxo de calor") [$J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$].

Transições de fase e a entalpia latente associada a mudanças de fase não foram consideradas no equacionamento utilizado no presente estudo.

Finalmente, para obter o fechamento do problema, Bleeg et al., 2014, utilizaram uma equação de transporte para temperatura potencial, apresentada na forma da Equação (3.10). Através de uma derivação análoga à aproximação de Boussinesq, os autores demonstraram que para escoamento incompressível e com dissipação "irrisória", a Equação (3.10) é automaticamente satisfeita quando a Equação (3.9) é resolvida. Para escoamentos atmosféricos, a ordem de grandeza do termo dissipativo é de magnitude muito inferior aos outros termos do balanço de energia, de forma que este possa ser considerado "irrisório".

$$\oint \rho \theta \mathbf{v} \cdot d\mathbf{a} = \oint \left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla \theta \cdot d\mathbf{a} \quad (3.10)$$

Onde:

- " λ " é a condutividade térmica [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$].

O equacionamento apresentado ao longo desta seção [Equação (3.1) até Equação (3.10)] compõe a metodologia empregada no presente estudo para as simulações com o modelo "*RANS estável*". Os resultados e validações apresentados ao longo da seção 4 foram obtidos através da aplicação destas equações.

Não há consenso entre pesquisadores sobre as constantes a serem utilizadas no modelo "*k-ε*" quando o assunto é simulação do escoamento atmosférico. As tradicionais constantes propostas por Launder e Spalding, 1974, ainda são utilizadas para muitas aplicações de "*RANS k-ε*", porém vários estudos recentes têm proposto constantes modificadas para a simulação da camada limite atmosférica. Cabezón et al., 2007, investigaram o uso de diversos conjuntos de constantes para simulações do escoamento atmosférico sobre terreno complexo. Os valores utilizados no presente estudo são os mesmos que foram utilizados por Mandas et al., 2004, e

por Bleeg et al., 2014. Esses valores são apresentados na Tabela 3.2, juntamente com as constantes propostas por Launder e Spalding, 1974.

Tabela 3.2 – Constantes para o modelo de turbulência “ k - ε ”

Estudo	σ_k	σ_ε	C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
Launder e Spalding, 1974.	1,0	1,3	0,09	1,44	1,920
Mandas et al., 2004 e Bleeg et al., 2014.	1,0	1,3	0,03	1,44	2,223

As constantes “ $C_{\varepsilon 3}$ ” e “ σ_t ” são exclusivas do equacionamento modificado que resultou no modelo “*RANS estável*”, pois aparecem junto ao termo de produção de empuxo “ P_b ” definido na Equação (3.7). Elas não estão presentes no modelo RANS “ k - ε ” tradicional. Não há consenso na literatura para os valores apropriados para essas constantes.

Sumner e Masson, 2012, sugerem que “ $C_{\varepsilon 3}$ ” não deve ser considerado constante, mas sim variar de acordo com condições locais. Bleeg et al., 2014, adotaram “ $C_{\varepsilon 3}$ ” constante e utilizaram simulações de escoamento atmosférico sobre terreno plano e com rugosidade constante para otimizar iterativamente valores para “ $C_{\varepsilon 3}$ ” que mantivessem as condições de entrada homogêneas sobre todo o domínio computacional. Esta otimização mostrou que os valores ideais de “ $C_{\varepsilon 3}$ ” variam de $-0,6$ até $-1,5$, dependendo das condições de entrada. Processos de otimização similares foram empregados no presente estudo, chegando no valor de $-0,71$ para o caso que é apresentado na seção 4.

Na literatura frequentemente se assume que o número de Prandtl turbulento “ σ_t ” seja igual a 1,0 em simulações da camada limite atmosférica, no entanto trabalhos recentes, como o de Venayagamoorthy e Stretch, 2010, têm demonstrado que “ σ_t ” pode assumir valores mais elevados quando o campo de escoamento é termicamente estratificado. Segundo Bleeg et al., 2014, o principal efeito decorrente do acréscimo de “ σ_t ” na modelagem do escoamento atmosférico seria um acréscimo no gradiente vertical de temperatura potencial enquanto o gradiente de velocidade permanece aproximadamente constante. No presente estudo manteve-se $\sigma_t = 1,0$.

3.2.1 Testes utilizando túnel de vento

Em um experimento utilizando túnel de vento, Ross et al., 2004, simularam o efeito da estabilidade no escoamento do vento sobre terreno complexo. Foram realizadas medições com várias condições de escoamento sobre uma colina 2D com elementos de rugosidade. As diferentes condições testadas incluíram escoamentos afetados por estratificação térmica, que foi induzida através do aquecimento controlado do fluxo de ar na entrada do túnel. A configuração básica do túnel de vento utilizado por Ross et al., 2004, é exibida na Figura 3.3.

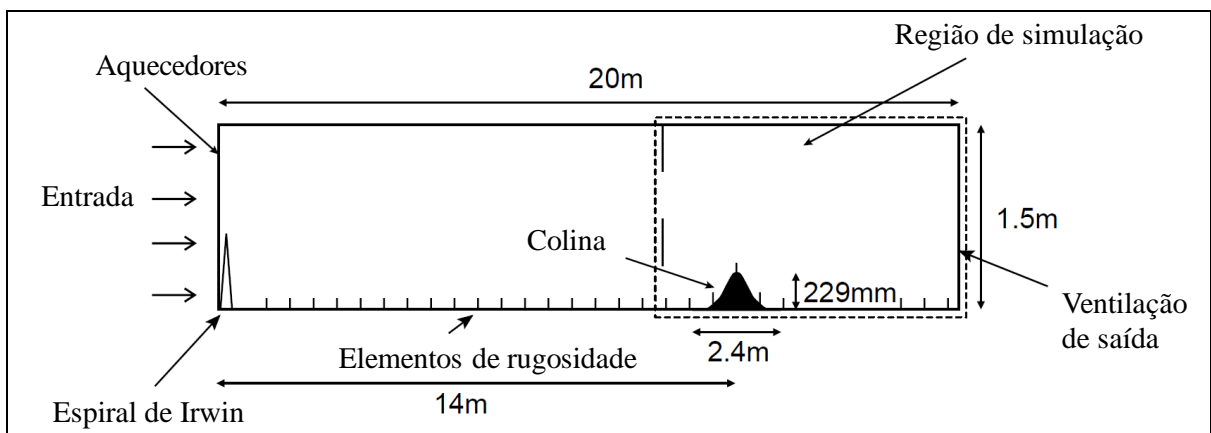


Figura 3.3 – Diagrama ilustrativo do túnel de vento utilizado nos experimentos de Ross et al., 2004.

Através do uso de elementos de rugosidade e de sistemas de resfriamento nas paredes, os autores buscaram reproduzir realisticamente as condições de escoamento dentro da Camada Limite Atmosférica (CLA), incluindo perfis realistas de velocidade, temperatura e turbulência, de forma que os resultados do experimento pudessem ser representativos (em escala) do escoamento na superfície da Terra. Segundo Ross et al., 2004, a razão de escala do experimento seria tal que 0,1 m acima da superfície inferior do túnel de vento representariam 100 m acima do nível do solo em escala real.

Além da colina “rasa” exibida na Figura 3.3., utilizaram também uma versão de colina “íngreme”, com mesma altura máxima de 229 mm, mas com base de 1,0m de largura. Através do sistema de controle térmico na entrada do túnel, os pesquisadores simularam uma condição de escoamento neutro, e duas condições de escoamento termicamente estratificado para cada versão da colina.

O túnel foi instrumentado com diversos anemômetros de fio quente, transdutores de pressão e sensores de temperatura tipo termopar. As medições realizadas por Ross et al., 2004 foram comparadas com simulações numéricas RANS realizadas pelos próprios autores, considerando modelos de fechamento a uma-e-meia equações e modelos de fechamento a duas equações. Os resultados deste trabalho sugerem que as simulações numéricas produziram resultados em concordância com as medições do túnel de vento para os casos onde o escoamento não apresentava estratificação térmica. Para as simulações onde havia estratificação térmica os resultados experimentais e numéricos divergiram mais significativamente.

Bleeg et al., 2014, tiveram acesso aos dados registrados nos experimentos com túnel de vento realizados por Ross et al., 2004. Utilizando a modelagem “RANS estável” proposta ao longo da seção 3.2, Bleeg et al., 2014, reproduziram através de simulações computacionais os testes realizados com a colina “rasa” no túnel de vento para duas condições diferentes de estratificação térmica. Os resultados destas simulações são apresentados na Figura 3.4.

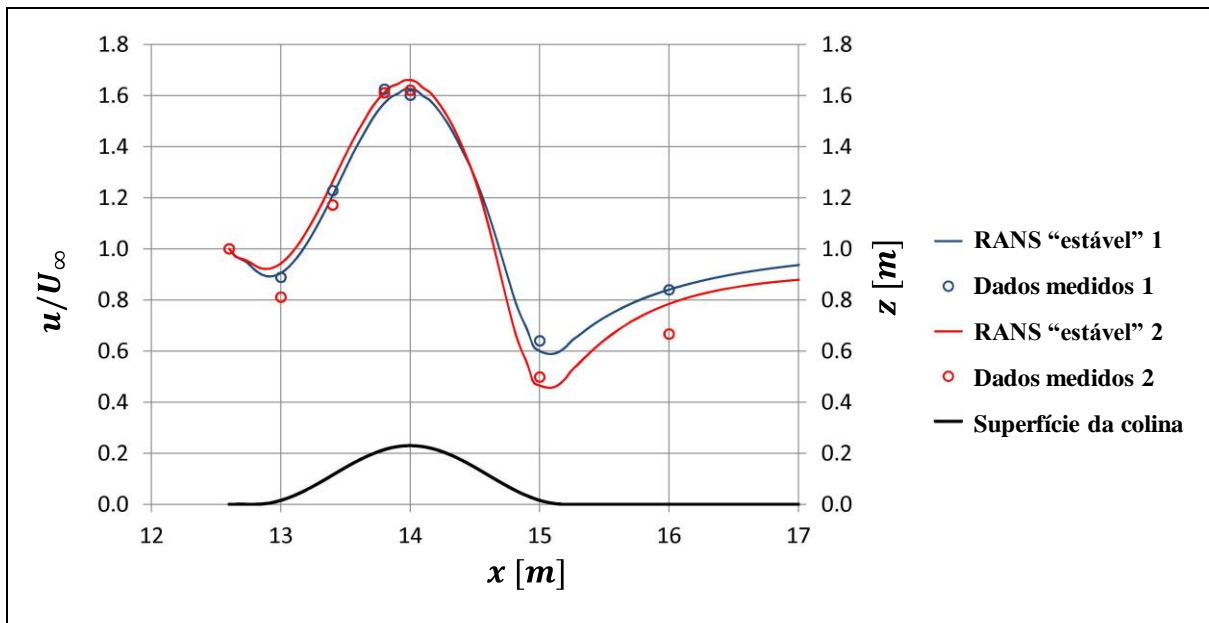


Figura 3.4 – Medições experimentais em túnel de vento realizadas por Ross et al., 2004, e resultados numéricos obtidos por Bleeg et al., 2014 usando modelo RANS estável.

A simulação denominada “RANS *estável* 1” na Figura 3.4 corresponde a uma velocidade de corrente livre (U_{∞}) de 1,0 m/s e a uma taxa de estratificação térmica vertical de

40 K/m. A simulação “*RANS estável 2*” corresponde a uma velocidade de corrente livre (U_∞) de 1,3 m/s e a uma taxa de estratificação térmica vertical de 50 K/m.

As condições do escoamento na estrada do domínio computacional para as simulações com modelo “*RANS estável*” foram definidas através dos perfis verticais de velocidade medidos experimentalmente a montante da colina. A parede inferior do domínio foi dotada de rugosidade aerodinâmica variável para simular os elementos de rugosidade presentes no solo do túnel de vento.

Medições do perfil vertical da componente horizontal de velocidade (“ u ”) foram realizadas para diversas distâncias horizontais (direção “ x ”) a partir da entrada do túnel de vento. Estes resultados experimentais são apresentados juntamente com as simulações numéricas realizadas por Bleeg et al., 2014 para o caso “*RANS estável 1*” na Figura 3.5.

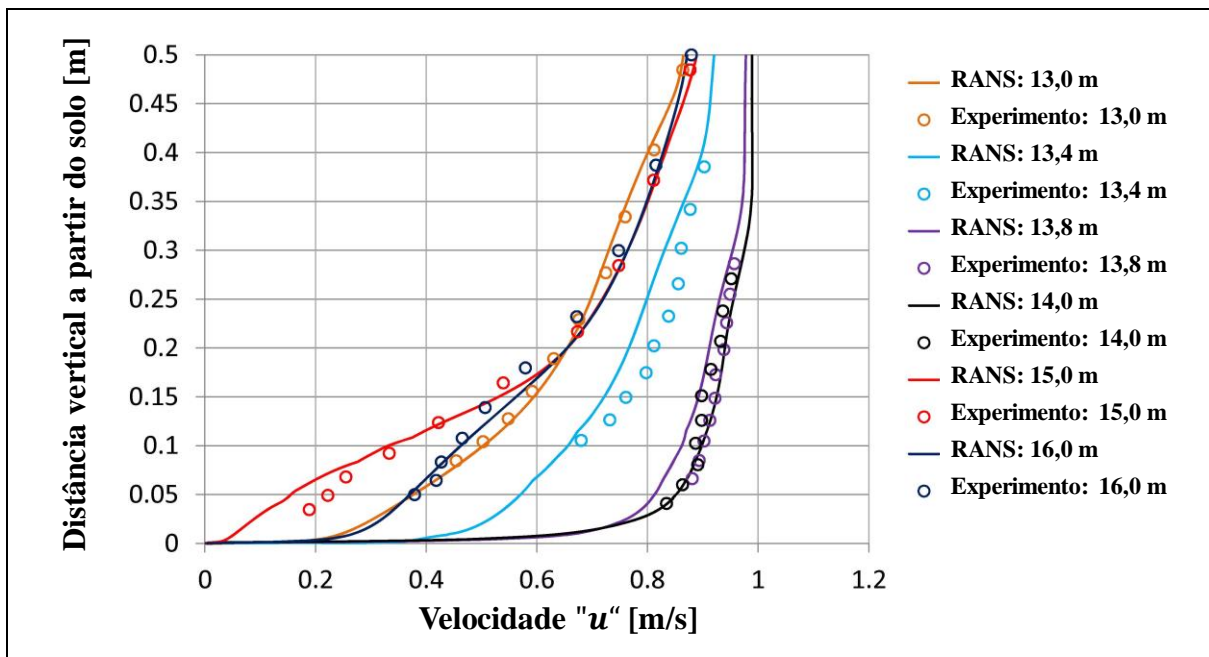


Figura 3.5 – Perfis verticais de velocidade medidos por Ross et al., 2004, para várias distâncias em relação à entrada do túnel e resultados numéricos obtidos por Bleeg et al., 2014 usando modelo RANS estável.

Os resultados obtidos com as simulações numéricas “*RANS estável*” (cujo equacionamento é detalhado ao longo da seção 3.2) estão em concordância com as medições experimentais realizadas em túnel de vento, conforme ilustrado pela Figura 3.4 e Figura 3.5. Estes resultados positivos servem de pré-avaliação para o modelo de escoamento “*RANS*

estável”. Ao longo da seção 4 deste estudo será apresentada uma validação em escala real, utilizando dados registrados por cinco torres anemométricas instaladas em um local de topografia complexa no Brasil.

4 RESULTADOS E VALIDAÇÃO

O modelo “*RANS estável*” é descrito ao longo da seção 3.2. O equacionamento apresentado compõe a metodologia empregada no presente estudo para as simulações com o modelo “*RANS estável*”. Para validação deste modelo utilizou-se uma área situada no Brasil, onde 5 torres anemométricas foram instaladas. Estas torres foram montadas e instrumentadas conforme as melhores práticas internacionais [IEC, 2005 e EPE, 2014]. O estudo de caso e a validação das simulações numéricas foram realizados tendo em vista principalmente os erros de previsões cruzadas verificados entre os resultados dos modelos de escoamento testados e os dados reais medidos entre torres.

4.1 Local

A Figura 4.1 apresenta um mapa da área de interesse do presente estudo onde é possível ver a localização relativa de cada torre anemométrica e as características topográficas do terreno.

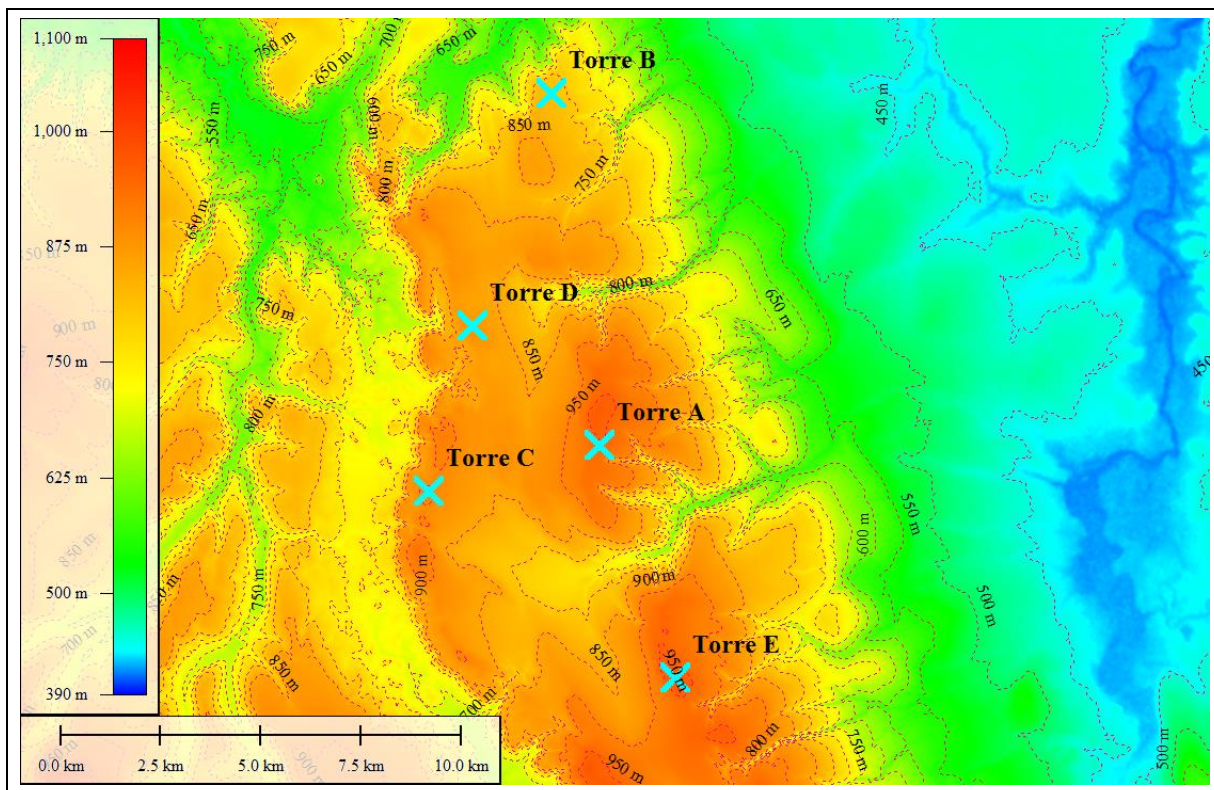


Figura 4.1 – Posição relativa das torres anemométricas e topografia do local

Para caracterização topográfica do local foi utilizado mapeamento topográfico SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) publicamente disponível com resolução horizontal de 1 arc-second (aproximadamente 30 metros). De acordo com este mapeamento, a área de interesse está situada em uma serra com altitude média de 850 m acima do nível do mar. A área circundante é composta por planícies a norte e a leste, com altitude variando entre 450 m e 550 m acima do nível do mar. No Sul e a Oeste há montanhas, com altitudes variando entre 650 e 1000 m acima do nível do mar. A topografia do local pode ser considerada como moderadamente complexa, uma vez que existem diversas zonas de declive elevado.

Através da análise de imagens áreas publicamente disponíveis [Google Earth, 2017] um mapa com a cobertura do solo para o local foi criado. Este mapa é apresentado na Figura 4.2. Os valores típicos considerados para a rugosidade base de cada tipo de vegetação e cobertura do solo são apresentados na Tabela 2-1.

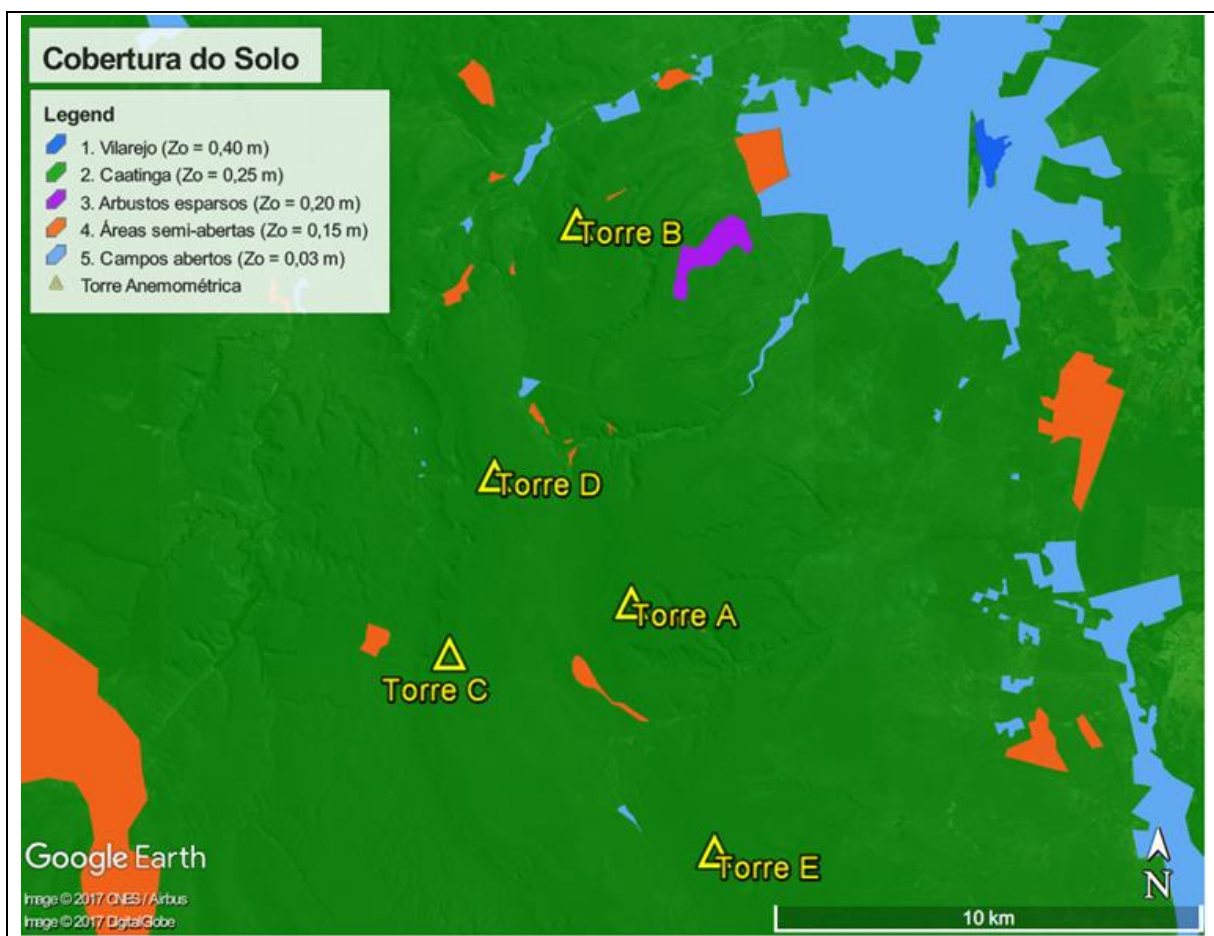


Figura 4.2 – Cobertura do solo (rugosidade) no local do estudo

A cobertura do solo no local é constituída predominantemente por vegetação nativa (caatinga). A encosta da serra, localizada a leste da área de interesse é coberta predominantemente por mata nativa.

4.2 Torres Anemométricas no Local

Na Figura 4.3 são apresentadas médias mensais para os dados de velocidade registrados pelas torres anemométricas instaladas na área de interesse para o presente estudo. No total, as torres registram aproximadamente 60 meses de dados anemométricos consecutivos. As médias foram aplicadas após a realização de controle de qualidade com os dados originais e contemplam apenas os registros válidos. A posição relativa das torres é apresentada na Figura 4.1. Todas as torres anemométricas estão bem montadas e instrumentadas segundo as melhores práticas recomendadas pela Empresa de Pesquisa Energética [EPE, 2014], conforme apresentado no Apêndice C.

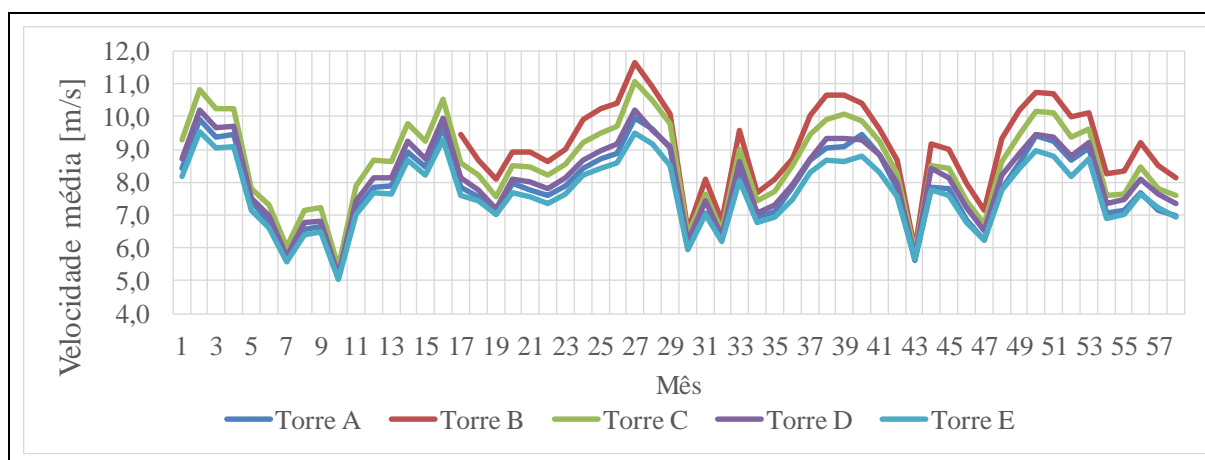


Figura 4.3 – Velocidades médias mensais do vento registradas pelas torres anemométricas a 80 m acima do solo

Conforme descrito na seção 1.1.2, a distribuições de frequências de velocidade e de direção do vento são métricas fundamentais para caracterização do recurso eólico. A última é também frequentemente chamada de “rosa dos ventos”. Estas distribuições são derivadas a partir dos dados medidos pela Torre Anemométrica E são apresentadas na Figura 4.3 e na Figura 4.4, respectivamente.

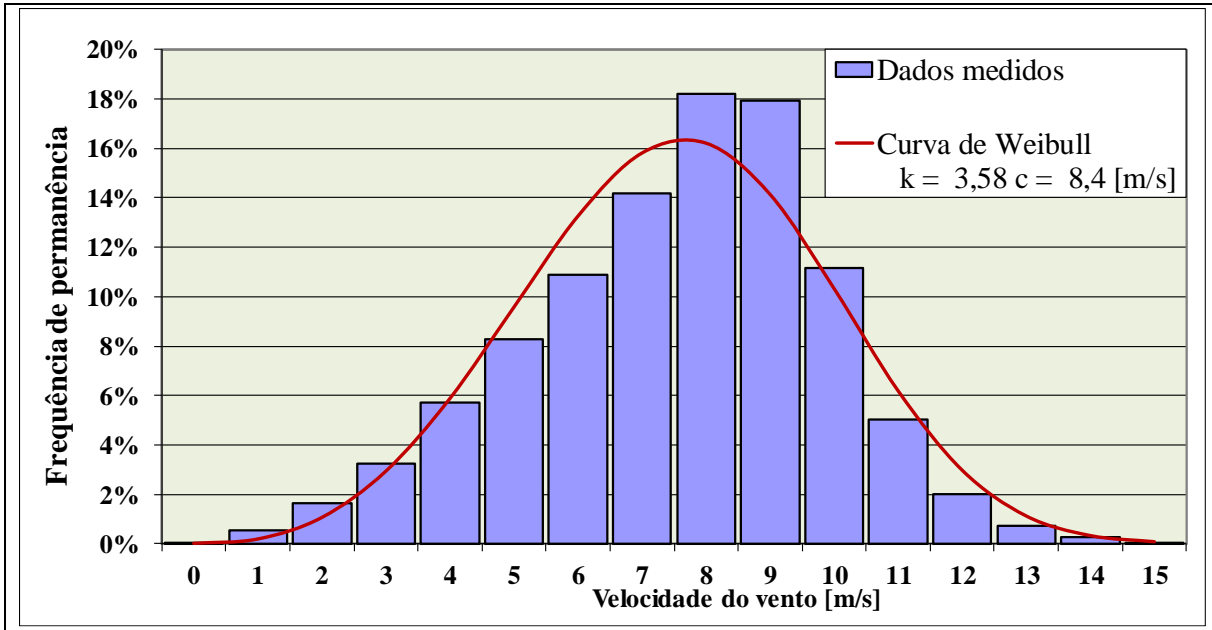


Figura 4.4 – Distribuição de frequências de velocidade do vento para Torre E a 80 m do solo

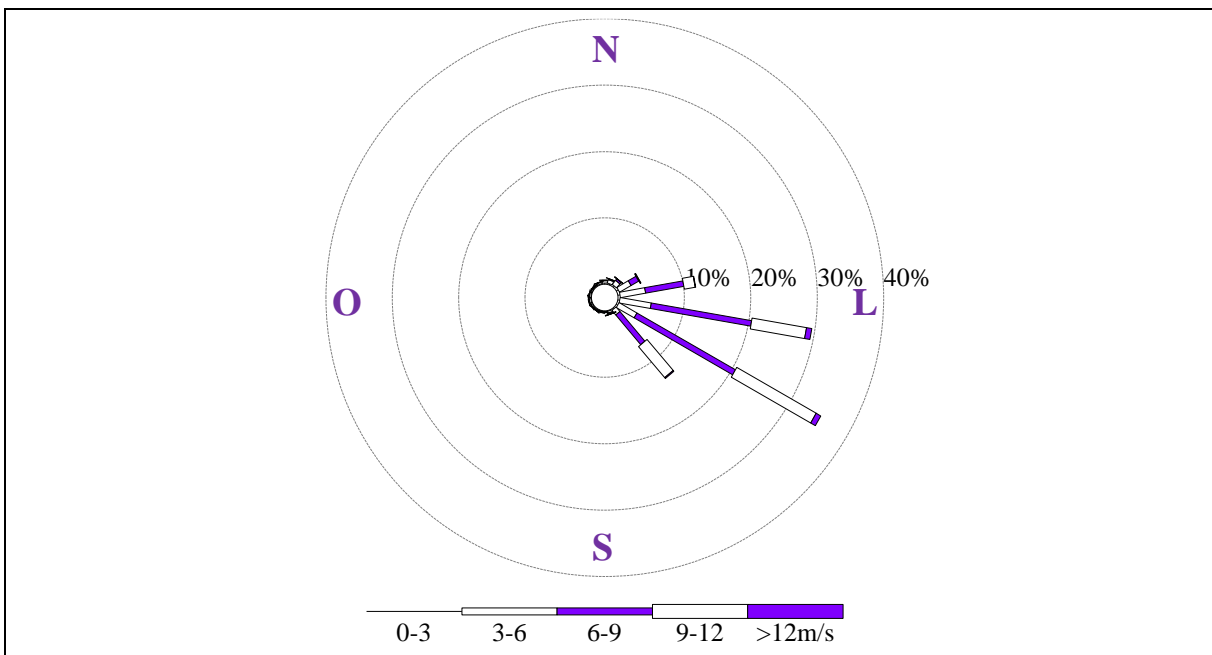


Figura 4.5 – Distribuição de frequências de direção do vento para Torre E (considerando norte geográfico)

A rosa dos ventos para torre E (Figura 4.5) apresenta prevalência do escoamento nos setores Leste e Sudeste. Esta rosa dos ventos é representativa de todas as torres anemométricas do projeto.

A intensidade de turbulência avaliada na posição das torres anemométricas instaladas no local do estudo é apresentada na Figura 4.6.

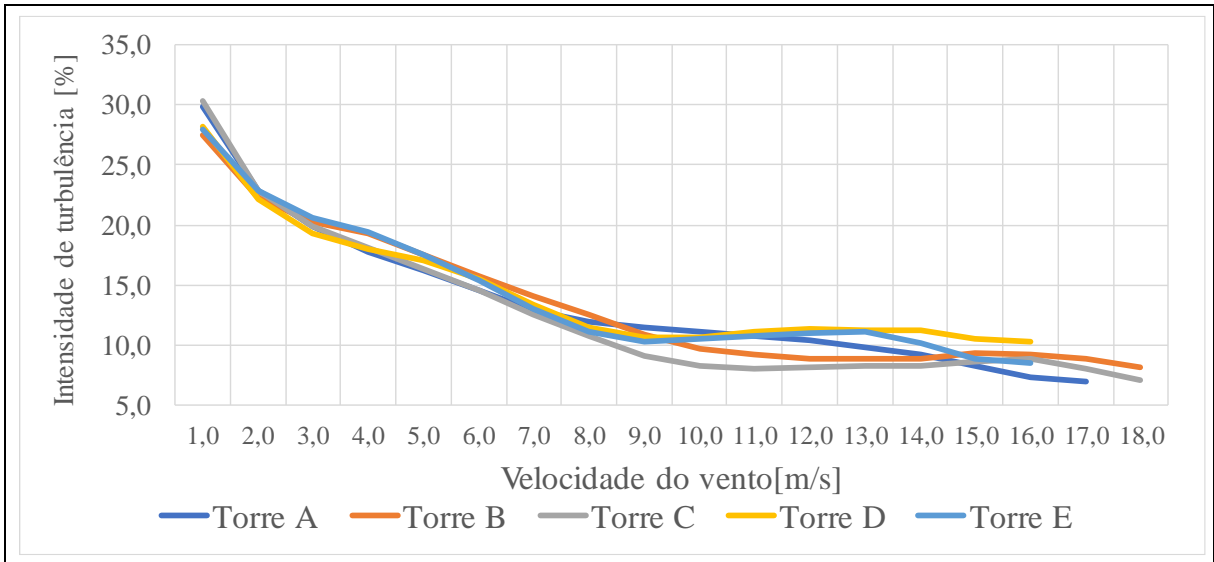


Figura 4.6 – Variação da intensidade de turbulência com a velocidade do vento para as torres anemométrica as 80 m do solo

Na Figura 4.7 as medições realizadas por anemômetros (tipo copo) instalados em três diferentes alturas na Torre Anemométrica “E” são sobrepostas com melhores ajustes segundo a “lei logarítmica” da Equação (2.5) e segundo a “lei de potência” da Equação (2.6).

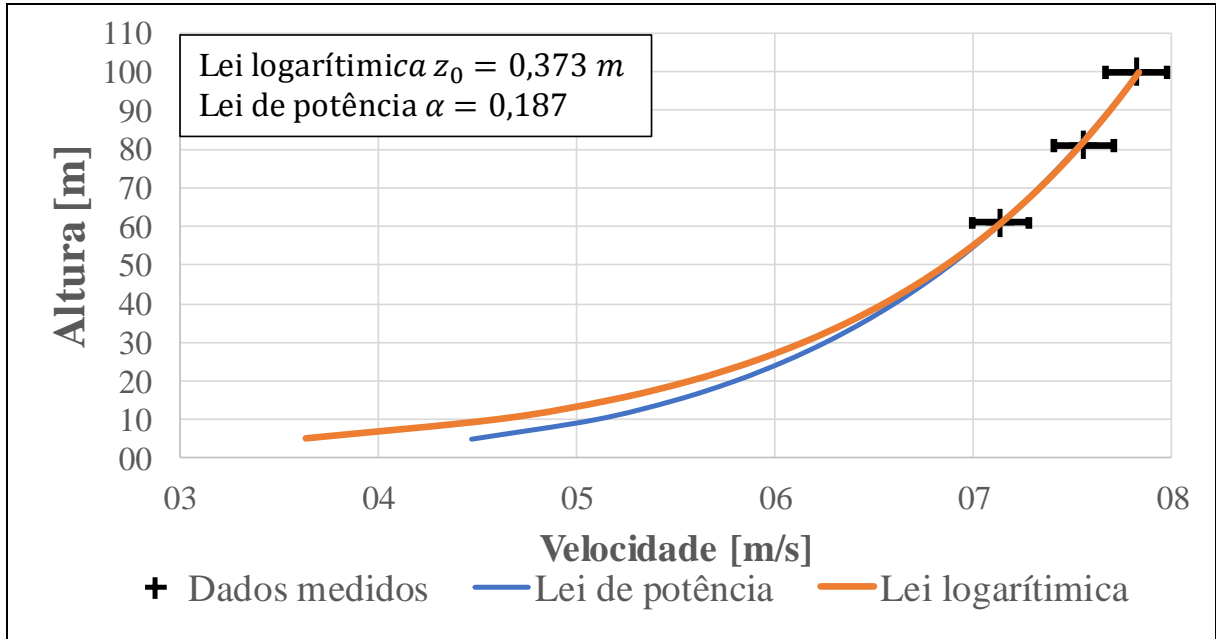


Figura 4.7 – Perfis verticais de velocidades derivados para a Torre “E” a partir das medições de três anemômetros

Perfis de variação diária para intensidade de turbulência e coeficiente da lei de potências (" α ") derivados a partir das medições realizadas para a torre anemométrica E são apresentados na Figura 4.8.

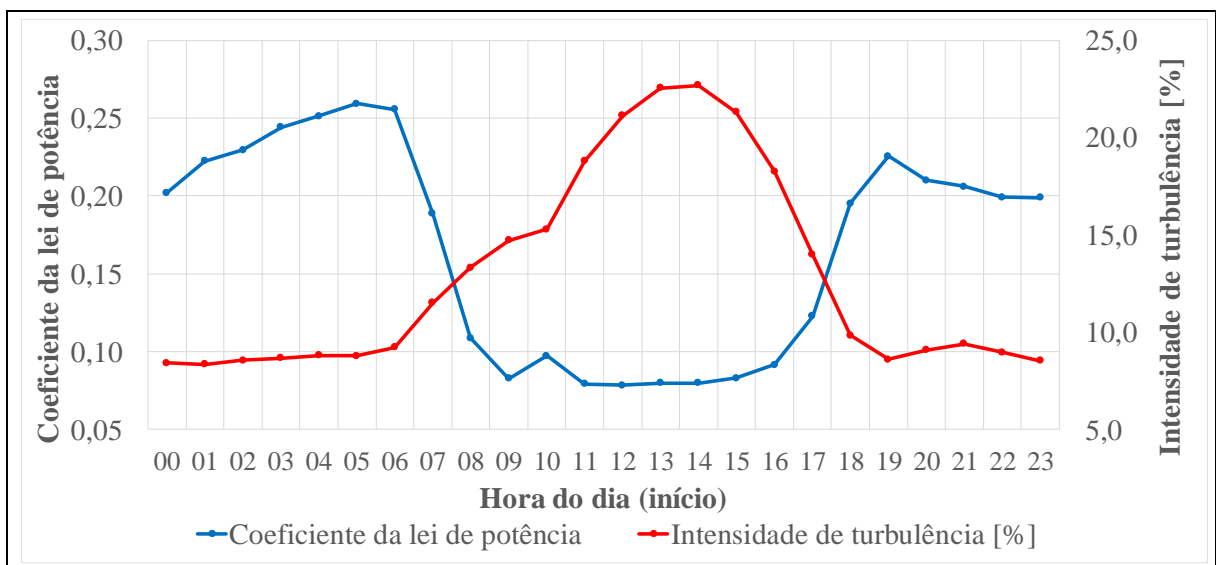


Figura 4.8 – Variação diária de intensidade de turbulência e coeficiente da lei de potências (" α ") para a Torre “E” a 80 m do solo

O comportamento dos ciclos diários de variação de intensidade de turbulência e coeficiente da lei de potências (" α ") é observável em todas as torres anemométricas do projeto. Como exemplo, estes mesmos ciclos considerando as medições da Torre D são apresentados na Figura 4.9.

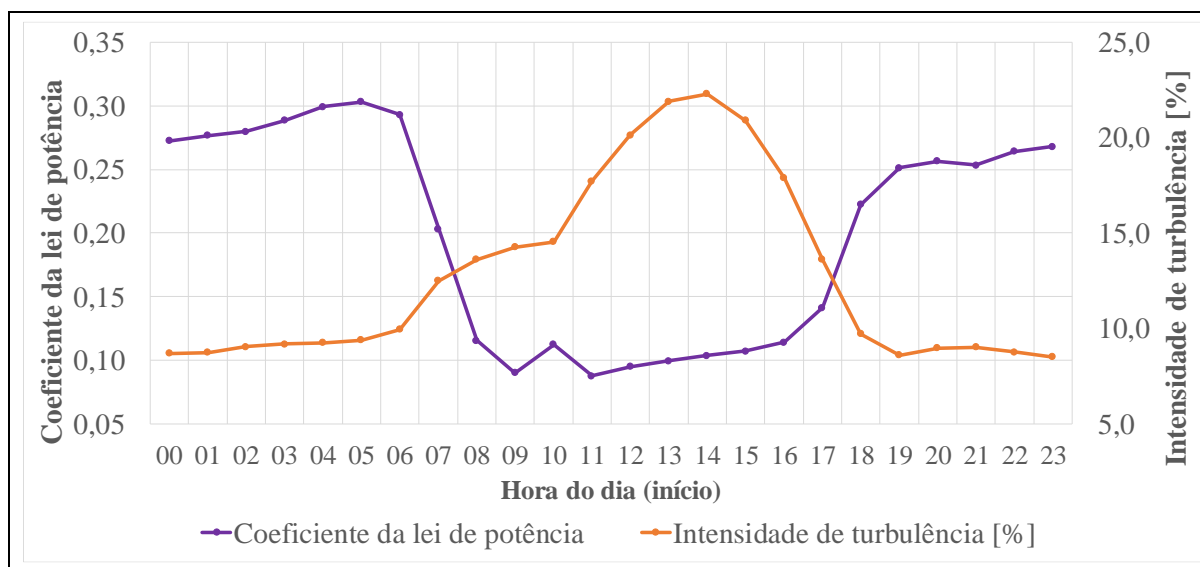


Figura 4.9 – Variação de intensidade de turbulência e coeficiente da lei de potências (" α ") para a Torre "D" a 80 m do solo.

A partir das variações diárias de intensidade de turbulência e coeficiente da lei de potências (" α ") calculadas para todas as torres anemométricas, foi possível estimar as durações dos períodos de escoamento atmosférico estável. Para cada torre anemométrica, os registros correspondentes a níveis relativamente elevados do coeficiente " α " e a níveis relativamente baixos de intensidade de turbulência foram classificados como "escoamento estável". Em contrapartida, os registros correspondentes a níveis relativamente baixos do coeficiente " α " e a níveis elevados de intensidade de turbulência foram classificados como escoamento "neutro" ou "instável". Estes níveis de corte específicos considerados para cada torre anemométrica são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros de corte para escoamento estável / neutro para cada torre anemométrica

Parâmetros	Torre A	Torre B	Torre C	Torre D	Torre E	Média das Torres
Intensidade de turbulência	11,5%	10,0%	9,0%	11,0%	10,0%	10,3%
Coeficiente da lei de potência:	0,14	0,15	0,15	0,17	0,15	0,15

Tendo em vista os parâmetros “de corte” apresentados na Tabela 4.1., as séries de dados registrados por cada torre foram analisadas visando estabelecer o percentual de tempo durante o qual o escoamento pode ser caracterizado como estável. Esta análise foi realizada direcionalmente; considerando 12 setores direcionais avaliados conforme os sensores de direção de cada torre. Os resultados desta na análise para a Torre Anemométrica “E” são apresentados na Figura 4.10. Visando realizar um processo paralelo de validação, considerou-se também a “hora do dia” como uma métrica alternativa para o escoamento atmosférico estável: registros realizados entre o pôr-do-sol (18h00min) o amanhecer (06h00min) e foram classificados como escoamento “estável”. Esses resultados também são apresentados na Figura 4.10.

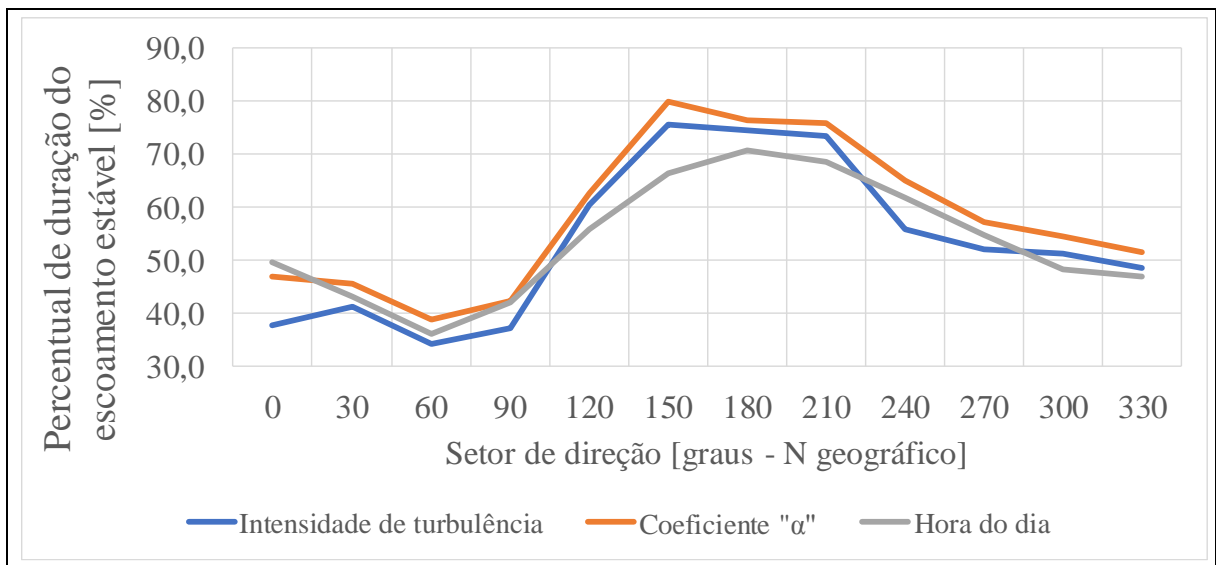


Figura 4.10 – Duração do escoamento estável para cada direção na Torre Anemométrica “E” considerando três diferentes parâmetros

Nota-se pela Figura 4.10 que não há grandes divergências entre as diferentes métricas consideradas para o escoamento estável. No âmbito do presente estudo, o parâmetro (ou “métrica”) final selecionado para definir a duração do escoamento estável em cada setor direcional foi a média dos resultados obtidos considerando os parâmetros de corte apresentados na Tabela 4.1 para todas as torres anemométricas. Este resultado é apresentado na Figura 4.11.

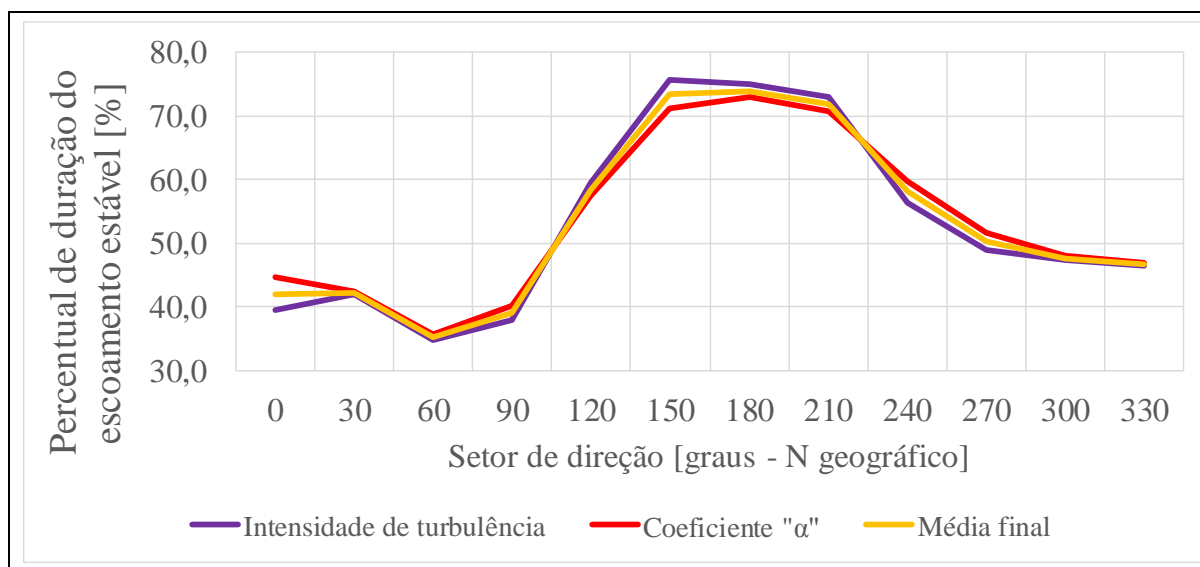


Figura 4.11 – Duração média do escoamento estável para cada direção considerando todas as torres anemométricas

4.3 Domínio Computacional e Condições de Contorno dos Modelos CFD

Nesta seção será descrita a metodologia prática que foi empregada para validação do modelo proposto, CFD “*RANS estável*”, utilizando as torres anemométricas e o local descritos na seção 4.1.

Todos os modelos CFD citados neste estudo foram aplicados através do software Star CCM+ (licenciado para UFRGS). Foram utilizados domínios computacionais retangulares, com dimensões de 46 km por 55 km. Seguindo as recomendações de Bleeg et al., 2014, as fronteiras laterais foram posicionadas a no mínimo 15 km de distância das torres anemométricas. A Figura 4.12 ilustra a vista superior de um dos domínios computacionais considerados. Foram aplicadas suavizações nas declividades do terreno situado entre 12 km das torres anemométricas e as

fronteiras externas do domínio computacional. Estas regiões suavizadas amortecem perturbações topográficas indesejáveis causadas no fluxo de escoamento na entrada do domínio.

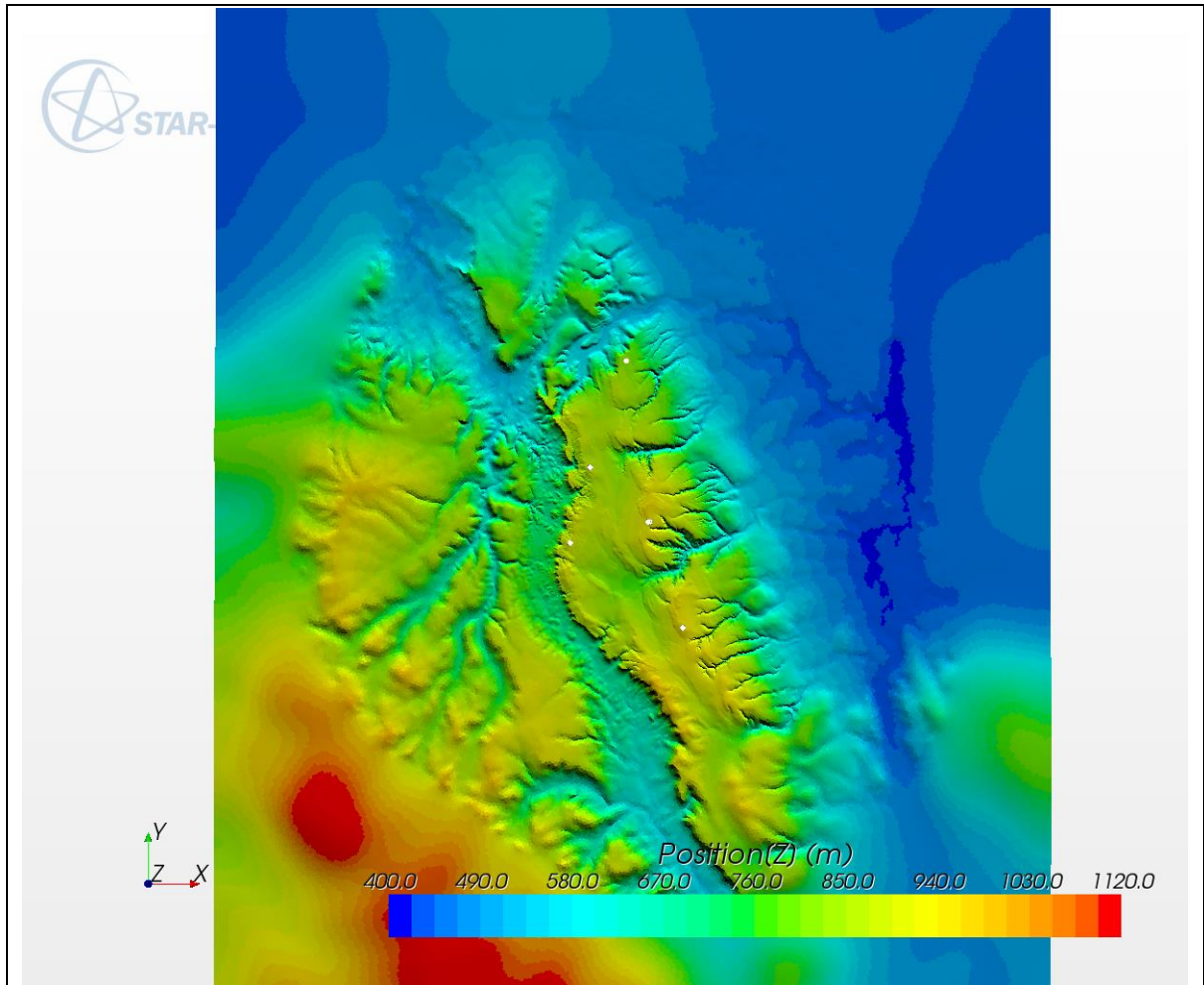


Figura 4.12 – Vista superior do domínio computacional e da topografia do terreno.

Foram utilizadas malhas não estruturadas, baseadas em elementos poliédricos com resolução horizontal variando entre 25 m e 200 m, dependendo da proximidade aos pontos de interesse (torres anemométricas). A Figura 4.13 ilustra uma vista superior ampliada de uma região do domínio, próxima da Torre “C”, onde é possível perceber o refinamento progressivo dos elementos poliédricos. A região situada a leste da escarpa (onde estão posicionadas as torres anemométricas) possui resolução horizontal progressivamente mais refinada do que a região situada a oeste da escarpa.

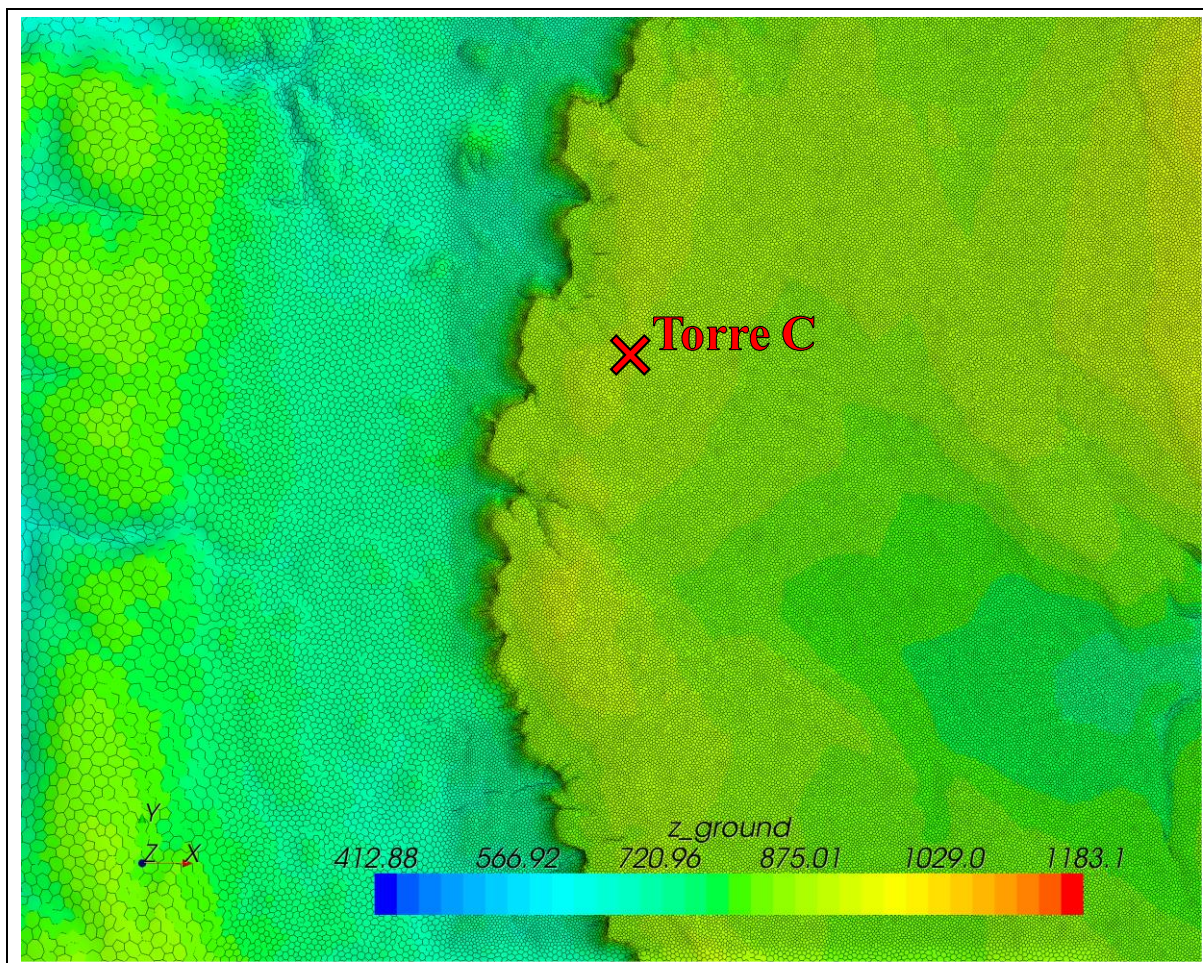


Figura 4.13 – Vista superior ampliada da malha para uma região central do domínio

Na região da Camada Limite Atmosférica (CLA) foi utilizada uma camada prismática com prismas de tamanho crescente (desde a parede inferior), estendendo-se até cerca de 2000 m de altitude. Na Figura 4.14 é apresentada uma vista em corte dos elementos de malha para um dos tamanhos de domínio considerados no estudo, com 20,5 milhões de células (elementos).

Além do domínio descrito computacional nesta seção, análises de qualidade de malha foram realizados pelo menos para um setor de direção para cada modelo testado de forma a assegurar convergência de malha. Os resultados destas análises de qualidade de malha não detalhados na seção 4.6.

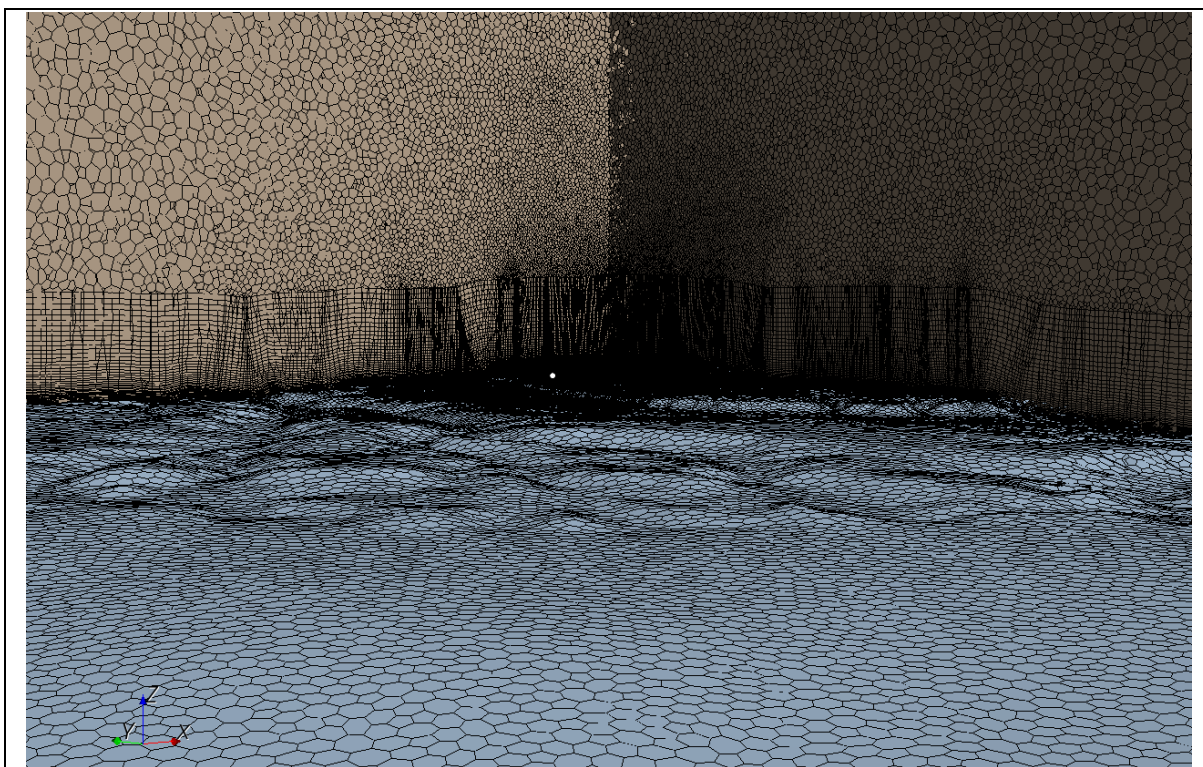


Figura 4.14 – Vista em corte da malha no centro de um dos domínios computacionais considerados com 20,5 milhões de células

A fronteira superior do domínio (“tampa”) é deslizante, e se situa aproximadamente 10 km acima nível do terreno. A fronteira inferior (“solo”) possui condição de não deslizamento com rugosidade. As “funções de parede” tradicionais disponíveis no código CFD foram modificadas para considerar rugosidade variável partir de um “mapa de rugosidades”. Este mapa é apresentado na Figura 4.2. A vegetação local e cobertura do terreno foram categorizadas em diferentes comprimentos aerodinâmicos de rugosidade (“ z_0 ”). Os valores altura de rugosidade aerodinâmica foram traduzidos em comprimentos de rugosidade tipo “grão de areia” (*sand grain roughness*), segundo a implementação padrão das funções de parede no software STAR-CCM+. A Figura 4.15 apresenta uma vista superior de um dos domínios computacionais considerados (com 20,5 milhões de células) onde é possível ver o comprimento de rugosidade do terreno (“ z_0 ”). Para as regiões localizadas entre 10 km das torres e as fronteiras externas do domínio foi utilizada rugosidade base constante.

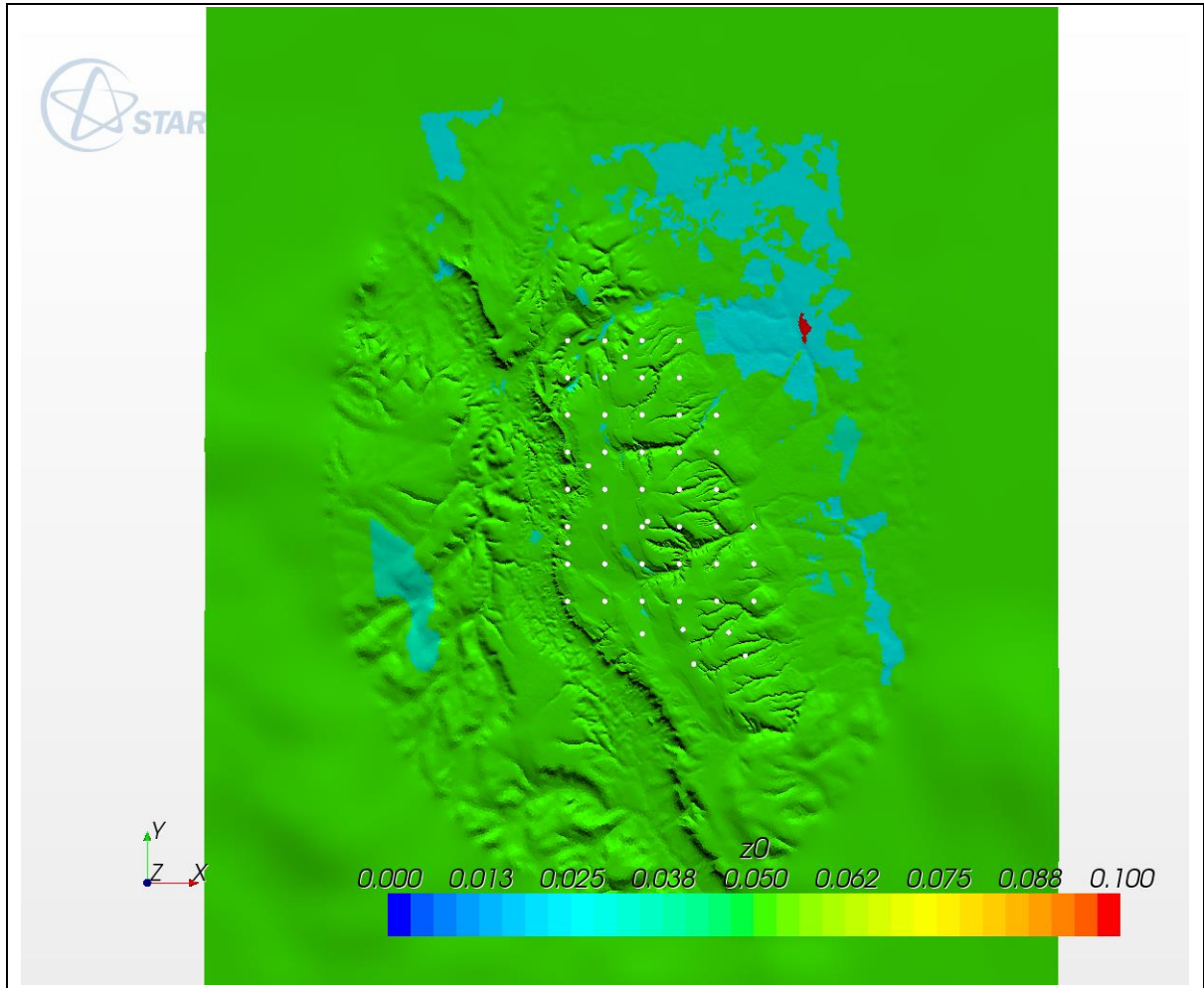


Figura 4.15 – Vista superior do domínio e da rugosidade do terreno (" z_0 ")

As fronteiras de saída do domínio possuem pressão e temperatura potencial definidas. O perfil vertical de temperatura potencial considerado como condição de contorno é apresentado na Figura 4.16, juntamente com a pressão atmosférica.

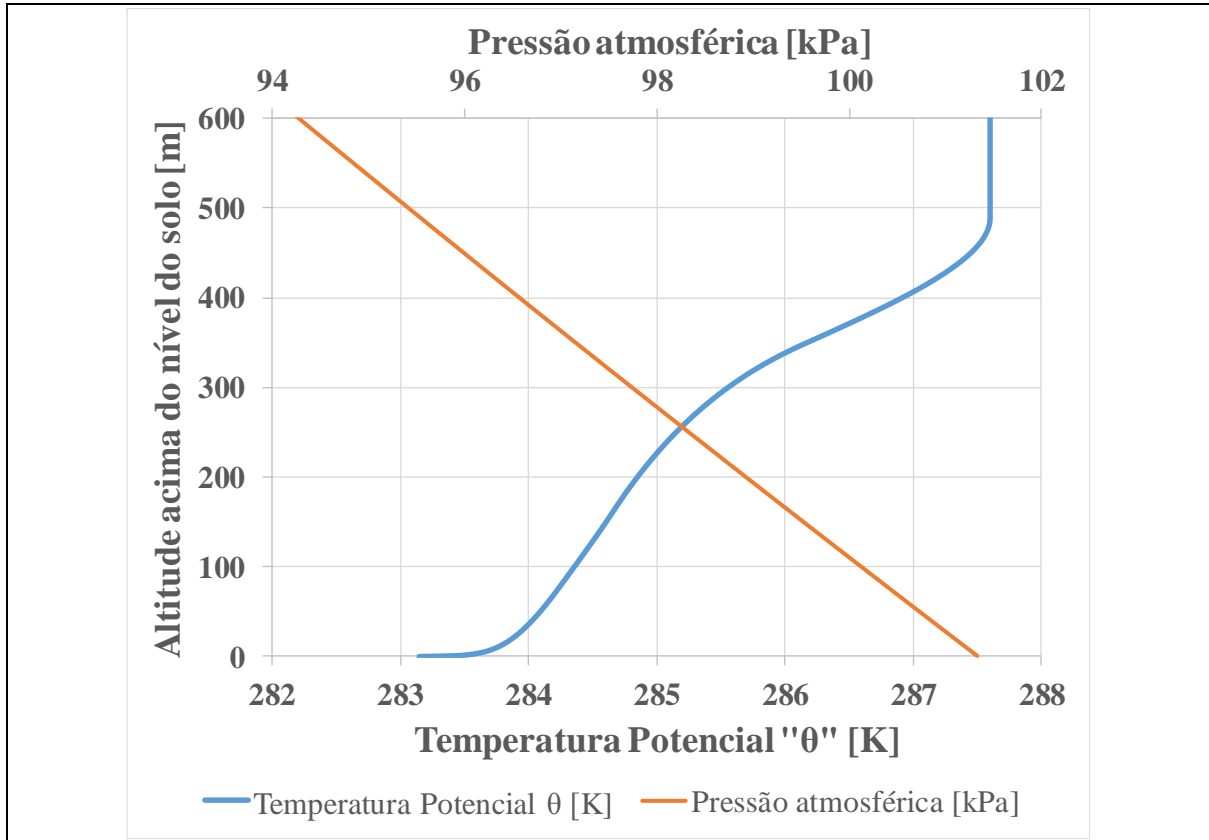


Figura 4.16 – Perfil de temperatura potencial (" θ ") utilizado para modelagem "*RANS estável*"

Nas fronteiras de entrada do escoamento no domínio computacional foram utilizados como condição de contorno perfis verticais de velocidade, temperatura, pressão, energia cinética turbulenta (" k ") e taxa de dissipação turbulenta (" ε "). No presente estudo estes perfis foram construídos a partir das teorias existentes para o equilíbrio da Camada Limite Estável (CLE).

Seguindo a metodologia descrita por Bleeg et al., 2014, a espessura máxima da CLE é determinada a partir da formulação postulada por Zilitinkevich, 1972. A teoria de Monin e Obukhov, 1954, foi utilizada para definir os perfis de entrada dentro da subcamada superficial. Fora desta subcamada a referida teoria não é válida. A teoria proposta por Nieuwstadt, 1984, foi considerada para a região entre a subcamada limite superficial e o topo da camada limite estável. Foram adicionadas regiões de transição entre a subcamada superficial, a região de Nieuwstadt, o topo da camada limite e a camada residual uniforme externa. Esta configuração é exemplificada pelo perfil da componente de velocidade horizontal (" u_i ") na Figura 4.17. Nesta mesma figura são apresentados o perfil de velocidade na entrada e no centro do domínio.

Conforme mencionado na seção 3.2, antes da simulação em terreno “real” e com rugosidade e topografia variáveis, foram realizadas simulações em terreno plano com rugosidade constante com objetivo de derivar um valor para a constante " $C_{\varepsilon 3}$ " que melhor preservasse a homogeneidade dos perfis de entrada quando reavaliados no centro do domínio computacional. A solução exibida na Figura 4.17 corresponde a um comprimento de Monin-Obukhov (" L_{MO} ") de 170 m e $C_{\varepsilon 3} = -0,71$. O parâmetro " L_{MO} " é utilizado tanto na teoria de similaridade de Monin e Obukhov, 1954, como na teoria de Nieuwstadt, 1984.

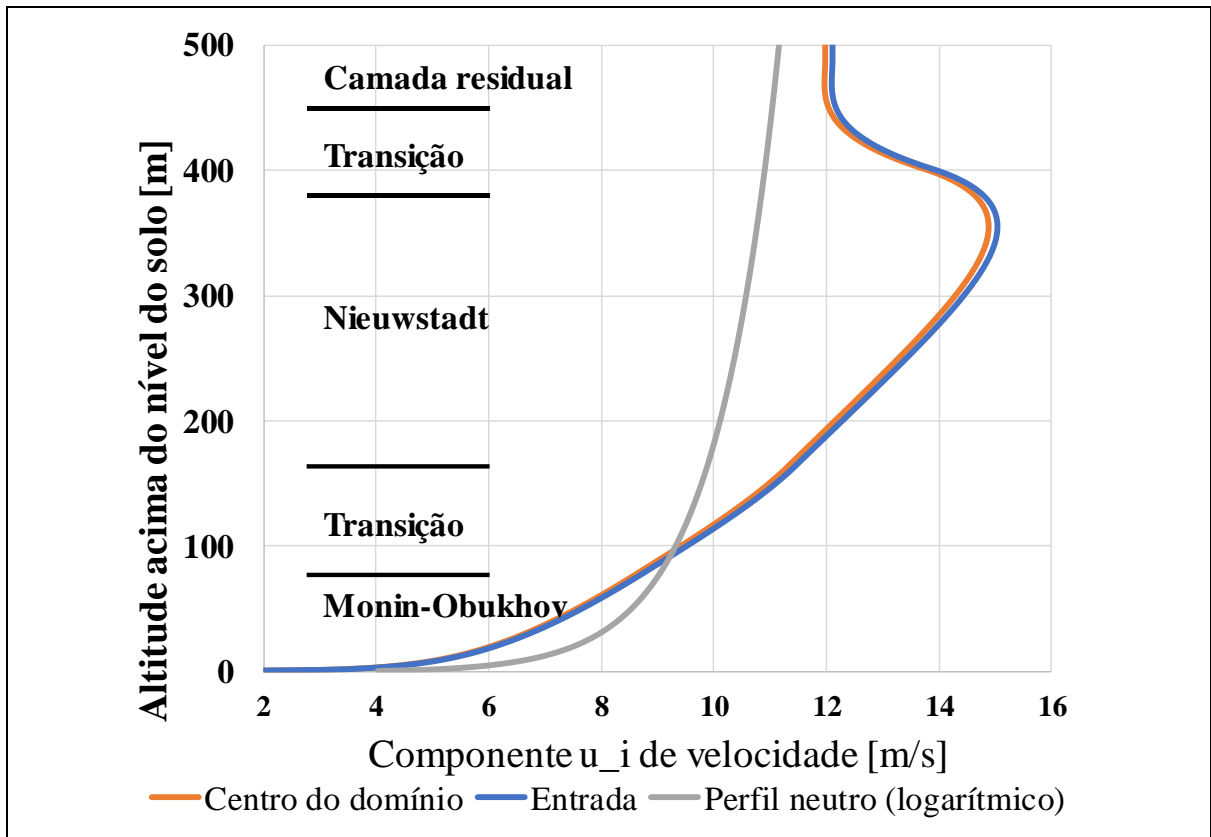


Figura 4.17 – Perfil da componente de velocidade horizontal (" u_i ") utilizado para modelagem “*RANS estável*” e perfil logarítmico

A Figura 4.17 demonstra as grandes diferenças que existem entre o perfil construído segundo as teorias de equilíbrio para a CLE e o perfil logarítmico de velocidade do vento, tradicionalmente utilizado em modelagens *RANS* no setor eólico. Pode-se notar ainda pela Figura 4.17 a formação de um jato por cisalhamento na interface entre a camada limite e a camada residual, fenômeno tipicamente associado com o escoamento atmosférico estável e

previsto na teoria proposta por Nieuwstadt, 1984. Conforme descrito na seção 3.2, a inclusão deste “jato” nas condições de contorno juntamente com a inclusão da força de Coriolis (“ F_c ”) permitem que o modelo capture a formação de uma espiral de Ekman pronunciada na interface externa da CLE.

4.4 Testes e Simulações

Para a simulação do escoamento dentro da CLC foram utilizados o modelo linear WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*) e um modelo CFD “*RANS k-ε neutro*”. Dentro do escopo deste estudo o termo “*RANS neutro*” refere-se à modelagem “*k-ε*” tradicionalmente utilizada no setor eólico que não considera o perfil estratificado de temperatura potencial, não considera os efeitos das forças hidrostáticas e não resolve as equações para o balanço de energia [Equação (3.9)] e para o transporte de temperatura potencial [Equação (3.10)].

Fica implícito pelo uso das equações RANS que todas as simulações CFD testadas consideram regime permanente de escoamento.

Para simulação do escoamento característico da CLE utilizou-se a metodologia “*RANS estável*” proposta neste estudo. Ambos os modelos CFD foram aplicados através do software Star CCM+. Foram utilizadas 36 simulações direcionais para cada modelo, cada uma correspondente a incrementos de 10 graus no fluxo de entrada do escoamento. Para a etapa de pós processamento e análise dos dados, os resultados destas simulações foram ponderados para 12 setores direcionais espaçados de 30 graus. As frequências de distribuição de velocidade direcionais medidas nas torres anemométricas foram os parâmetros considerados para estas ponderações.

Os dois grupos de resultados para 12 setores direcionais (“*RANS neutro*” e “*RANS estável*”) foram então combinados para produzir um único conjunto de 12 “fatores de aceleração” direcionais entre cada par possível de torres anemométricas. Estes “fatores” representam a razão entre as velocidades médias previstas por um dado modelo de escoamento para duas posições diferentes dentro do domínio computacional, conforme apresentado na Equação (4.1).

$$\text{Fator de aceleração} = \frac{\text{Velocidade na posição alvo}}{\text{Velocidade na posição de referência}} \quad (4.1)$$

Os “fatores de aceleração” são um dos resultados mais importantes provenientes dos modelos de escoamento de microescala para uso no setor eólico, pois são eles que transpõem o recurso eólico medido na posição das torres para as posições desejadas dos aerogeradores.

A Figura 4.18 ilustra de forma resumida as etapas de pós-processamento realizadas com os resultados das simulações direcionais (com os modelos CFD) tendo em vista produzir resultados médios globais, considerando 12 setores de direção.

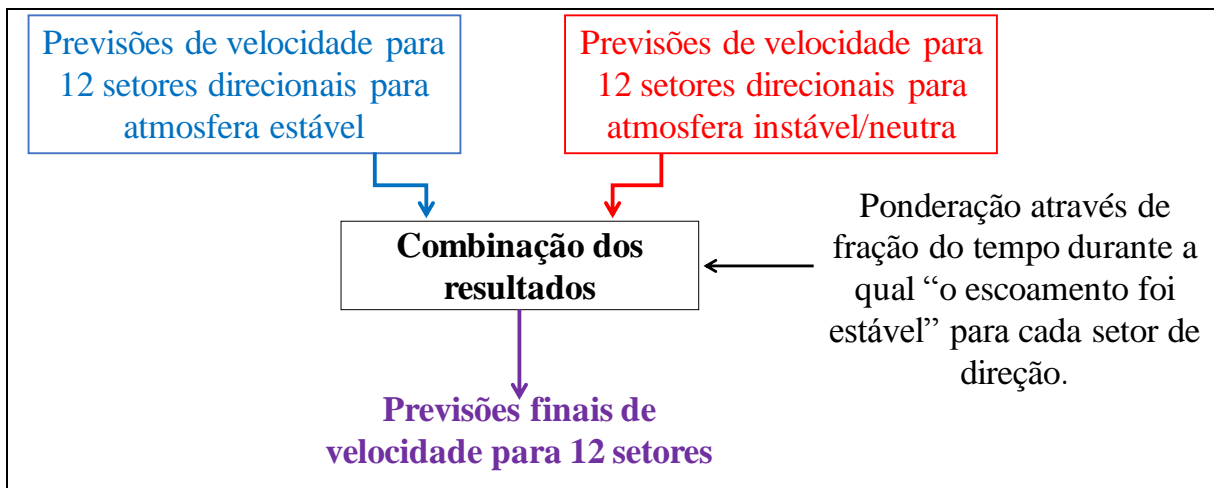


Figura 4.18 – Etapas de pós-processamento utilizadas para combinar os resultados das simulações direcionais realizadas com os modelos CFD

A combinação supracitada entre os resultados para os dois modelos foi realizada através de ponderação utilizando “pesos para estabilidade do escoamento”. No presente estudos estes “pesos” representam a parcela média de tempo durante a qual o escoamento atmosférico apresentou características que permitam categorizá-lo como estável. A metodologia considerada para derivar estes “pesos” (ou “métricas”) é apresentada na seção 2.2 do presente estudo. Os valores médios destes “pesos” derivados para cada torre anemométrica são apresentados na Figura 4.11.

Estudos de qualidade de qualidade de malha também foram conduzidos pelo menos para um setor de direção para cada modelo testado de forma a assegurar convergência de malha. Os resultados destas análises de qualidade de malha são detalhados na seção 4.6.

4.5 Convergência das Simulações

Como critérios de convergência para todos os modelos CFD testados considerou-se erro mínimo da ordem de 10^{-4} para os resíduos numéricos finais. A Figura 4.19 apresenta estes resíduos, em função da direção de entrada do escoamento, para as simulações realizadas com o modelo “*RANS neutro*” com domínio computacional de 20,5 milhões de células. São apresentados também o número de iterações necessárias para que cada simulação direcional atingisse o critério de convergência. Todos os casos convergiram em menos de 1200 iterações.

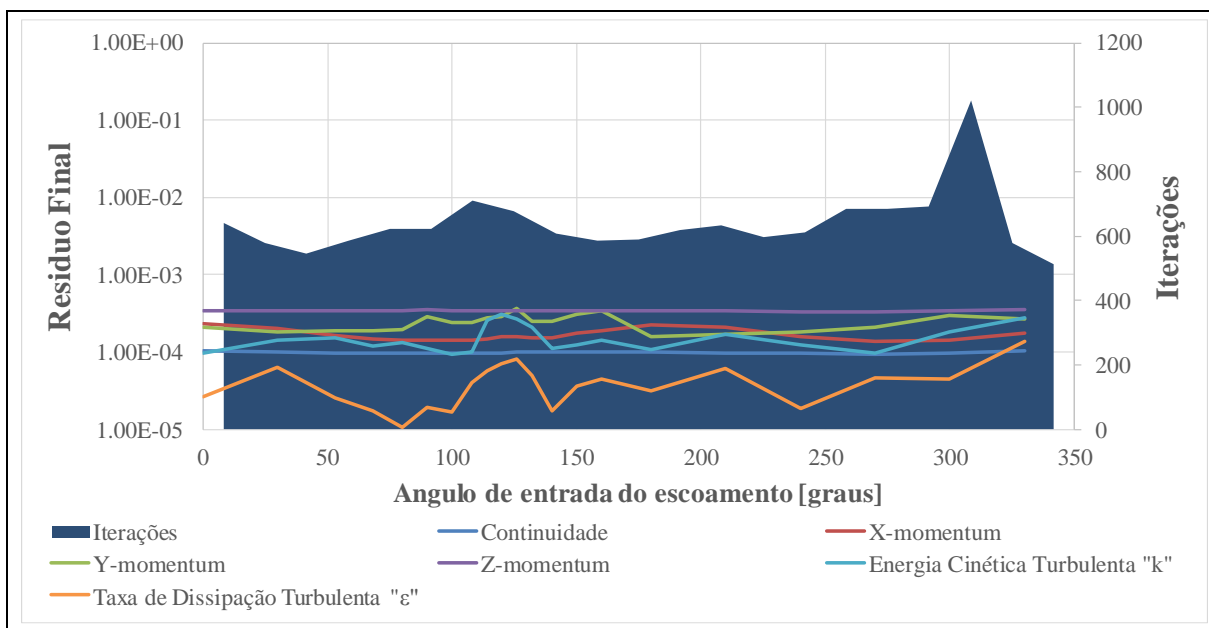


Figura 4.19 – Resíduos para o modelo “*RANS neutro*” por setor direcional

Analogamente, a Figura 4.20 apresenta estes resíduos, em função da direção de entrada do escoamento, para as simulações realizadas com o modelo “*RANS estável*” com domínio de 20,5 milhões de células. Todos os casos convergiram em menos de 1400 iterações.

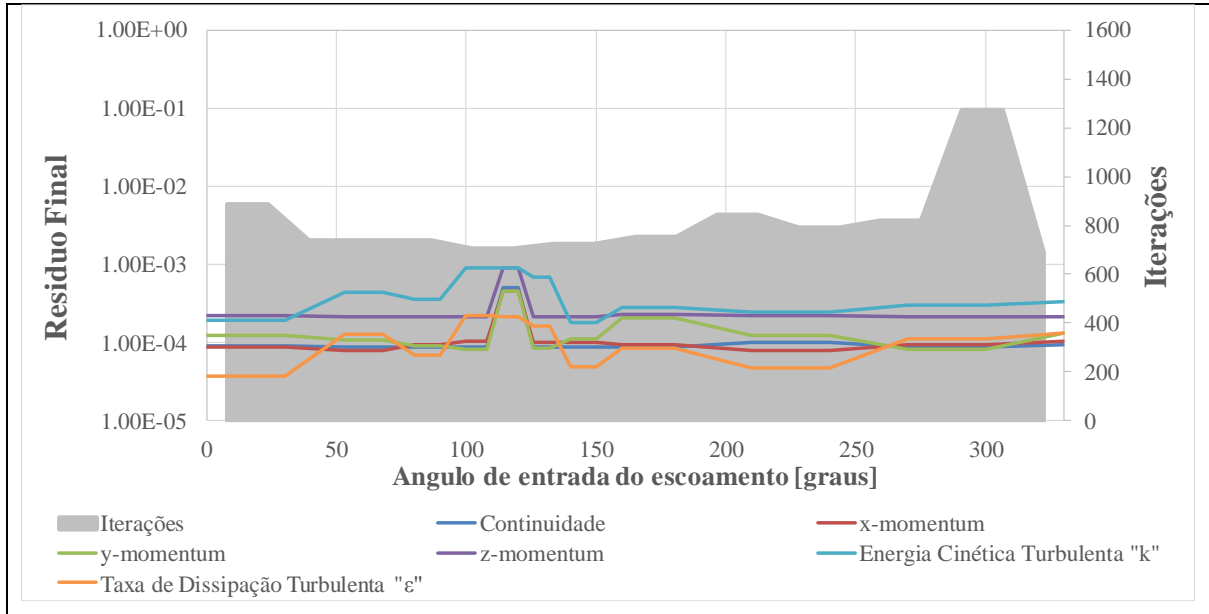


Figura 4.20 – Resíduos para o modelo “*RANS estável*” por setor direcional

Comparando os resíduos dos modelos “*RANS neutro*” e “*RANS estável*” nota-se que o último apresenta resíduos finais marginalmente superiores ao primeiro. Isso é explicável pelo maior número de equações resolvidas a cada interação para o modelo “*RANS estável*”. A convergência ocorreu de maneira satisfatória para todas as simulações direcionais testadas.

Além dos critérios de convergência supracitados, para cada simulação realizada verificou-se ainda que a componente horizontal resultante de velocidade (“ V_{xy} ”) avaliada na posição das torres anemométrica tivesse convergido para um valor constante, característico do regime permanente de escoamento. Esta análise é exemplificada pela Figura 4.21 para uma das simulações direcionais com o modelo “*RANS estável*”.

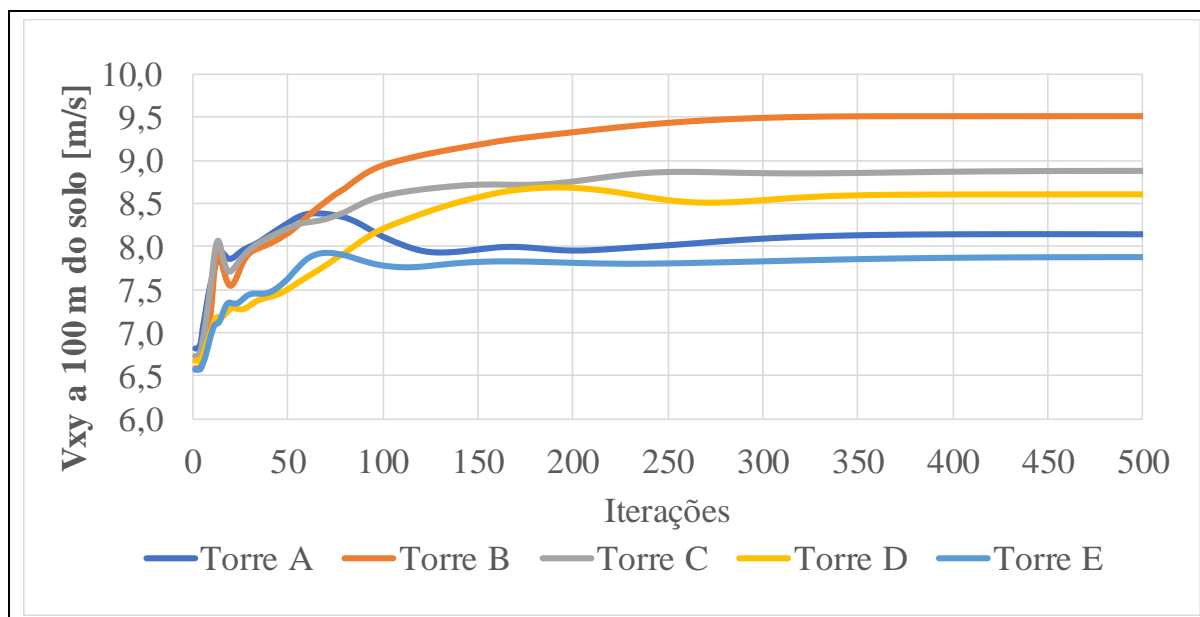


Figura 4.21 – Velocidade horizontal resultante " V_{xy} " avaliada nas torres para a simulação com ângulo de entrada de 110 graus (Modelo "*RANS estável*")

4.6 Análises de Qualidade de Malha

Nesta seção serão apresentadas as análises de qualidade de malha que foram realizadas para os testes e simulações numéricas descritos na seção 4.2.

Tendo em vista a extensão avantajada dos domínios computacionais necessários para modelagem apropriada do escoamento atmosférico livre (em parques eólicos), para cada grupo de simulações numéricas com CFD (modelos "*RANS neutro*" e "*RANS estável*") foram realizados estudos de qualidade de malha considerando apenas a direção predominante do escoamento do vento na região. Conforme ilustrado pela Figura 4.5, cerca de 80% do tempo o escoamento é oriundo dos setores leste e sudeste (entre 90 graus e 120 graus), de forma que as análises de qualidade de malha aqui descritas foram realizadas considerando o setor de direção de 110 graus para o escoamento de entrada no domínio.

Para as simulações com o modelo CFD "*RANS neutro*" foram testados três domínios computacionais com as mesmas proporções geográficas (46 km x 55 km x 10 km) porém com diferentes resoluções de malha. A metodologia na seção 4.3, referente ao uso de malha poliédrica não estruturada e com resolução progressiva foi mantida para todos os domínios

investigados. O tamanho “computacional” de cada um dos domínios é resumido na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Diferentes domínios computacionais analisados

Domínio Computacional	Proporções da Malha Computacional	
	Células [$\times 10^6$]	Faces [$\times 10^6$]
I	16,0	74,0
II	20,5	97,6
III	28,1	126,0

Para as simulações com o modelo CFD “*RANS estável*” foram testados os mesmos três domínios computacionais listados na Tabela 4.2.

A componente horizontal da velocidade média do escoamento (“ V_{xy} ”) foi selecionada como parâmetro para avaliação da qualidade de malha. Para tanto, esta variável foi avaliada a 100 m do solo para 45 posições dentro da área de interesse do estudo. Essas posições são apresentadas na Figura 4.22.

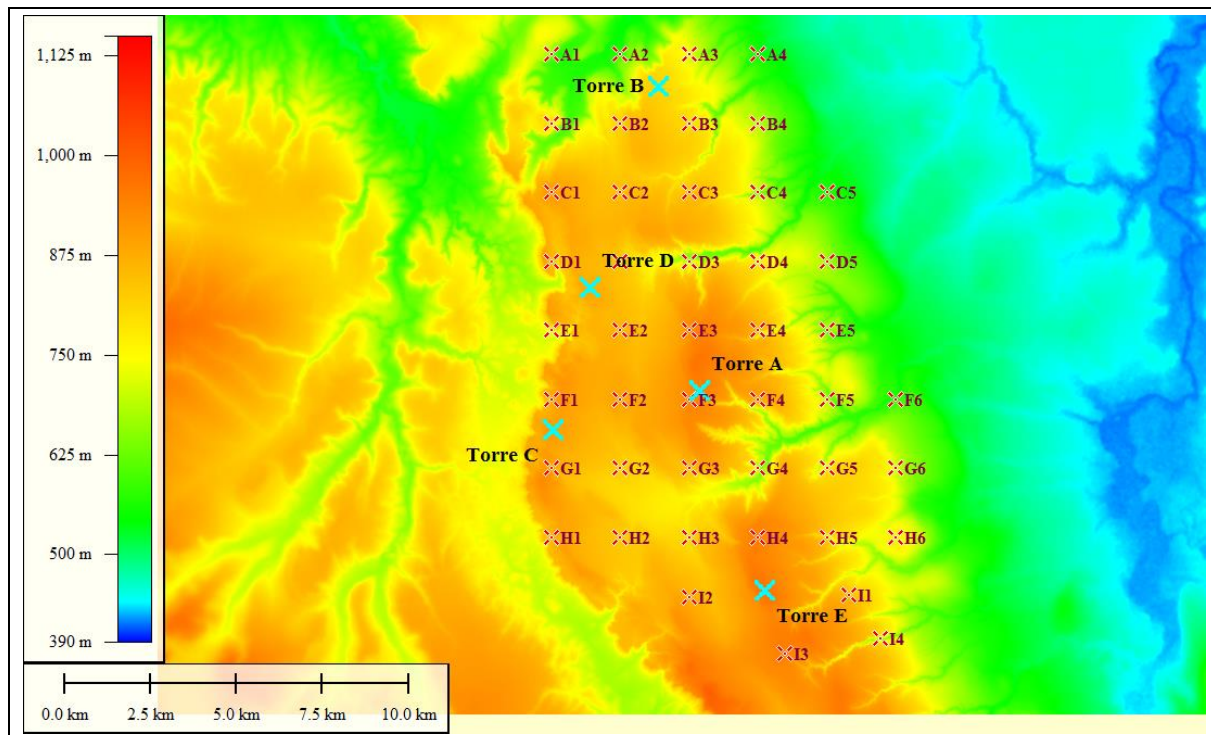


Figura 4.22 – Posições para avaliação da componente horizontal de velocidade (“ V_{xy} ”) a 80 m do solo

Os valores obtidos para os três domínios testados com o modelo “*RANS neutro*” são apresentados na Figura 4.23.

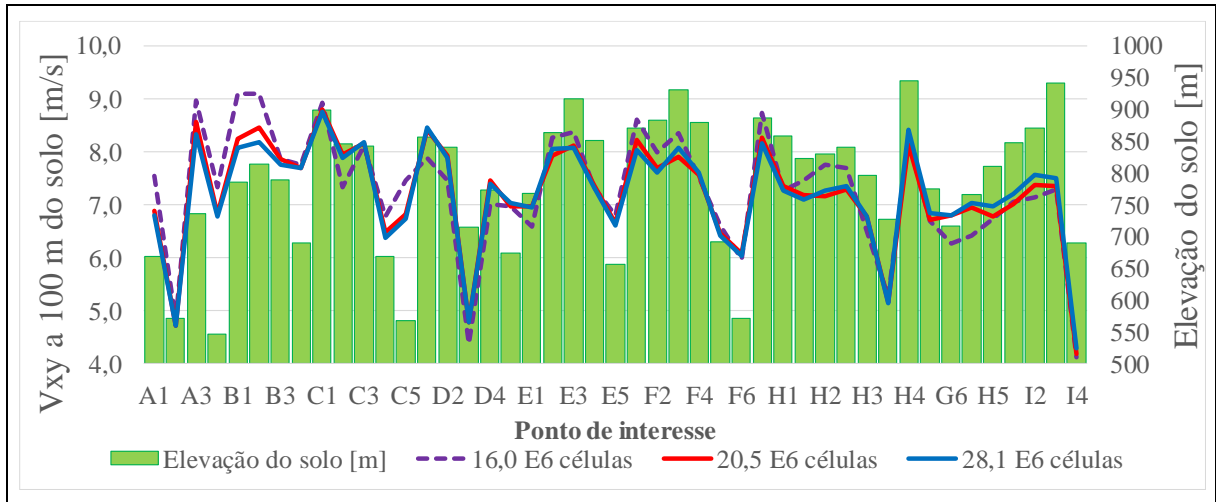


Figura 4.23 – “ V_{xy} ” a 100 m do solo avaliada em 45 posições para os três domínios considerados considerando modelo “*RANS neutro*”

As magnitudes da componente horizontal de velocidade (“ V_{xy} ”) apresentados na Figura 4.23 para cada domínio computacional foram correlacionados entre si e os resultados destas correlações são apresentados na Figura 4.24 e na Figura 4.25.

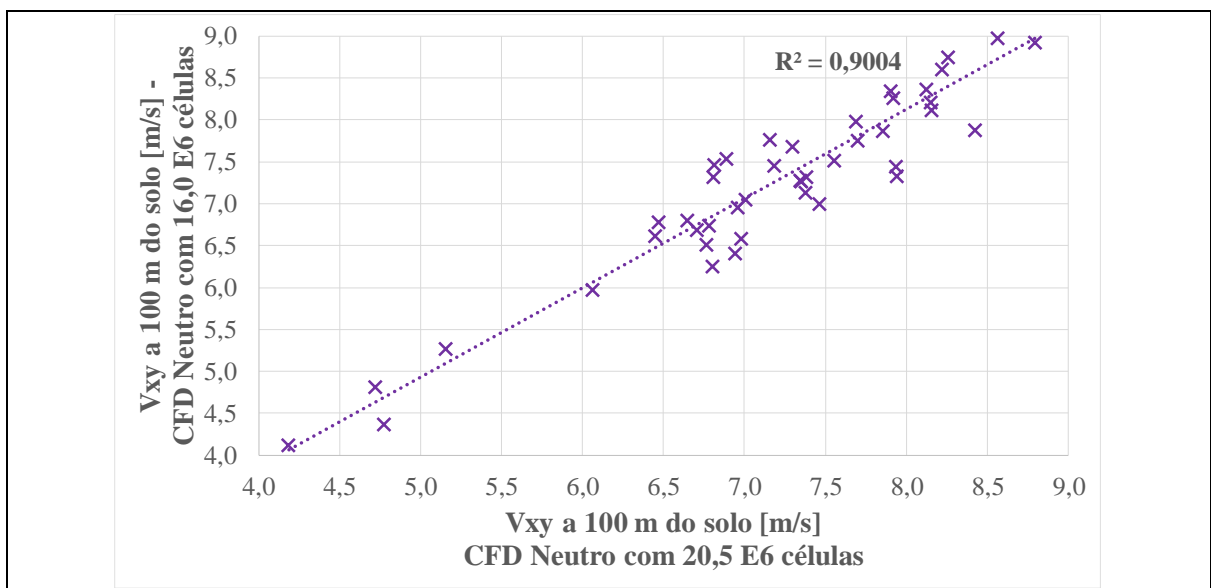


Figura 4.24 – Correlação entre " V_{xy} " a 100 m para malha computacional com 20,5 E6 células e com 16,0 E6 células considerando modelo "*RANS neutro*"

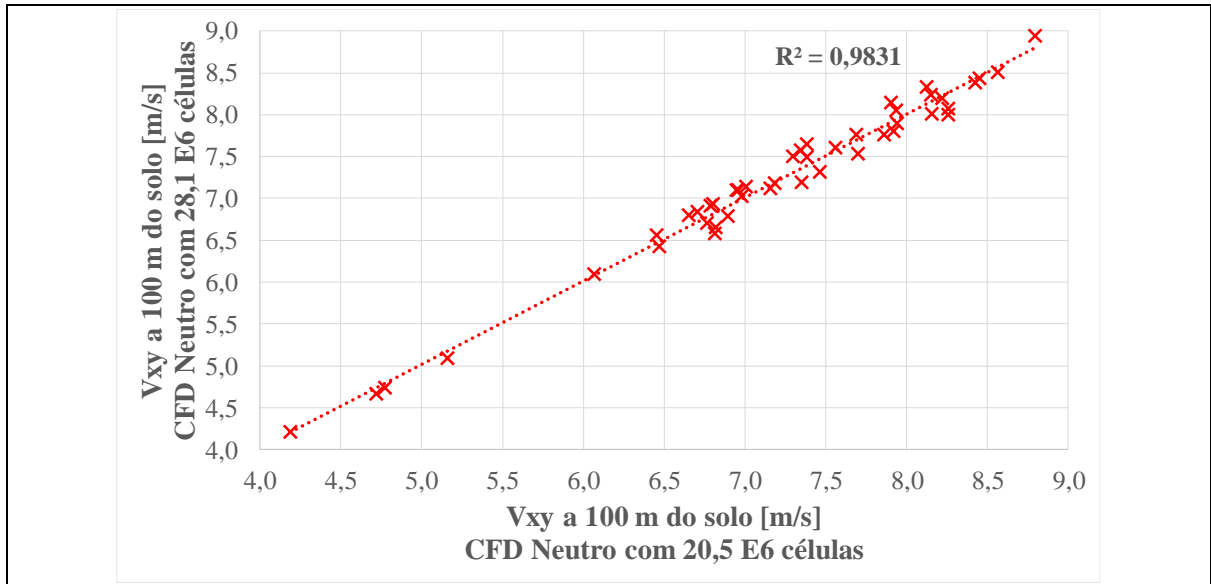


Figura 4.25 – Correlação entre " V_{xy} " a 100 m para malha computacional com 20,5 E6 células e com 28,1 E6 células considerando modelo "*RANS neutro*"

Conforme indicado pela Figura 4.25, é notório que os resultados obtidos com domínio computacional "II" (20,5 E6 células) apresentam elevado coeficiente de correlação ($R^2=0,98$) com os resultados obtidos com domínio computacional "III" (28,1 E6 células).

Os valores obtidos para a componente horizontal de velocidade (" V_{xy} ") considerando os três domínios testados com o modelo "*RANS estável*" são apresentados na Figura 4.26.

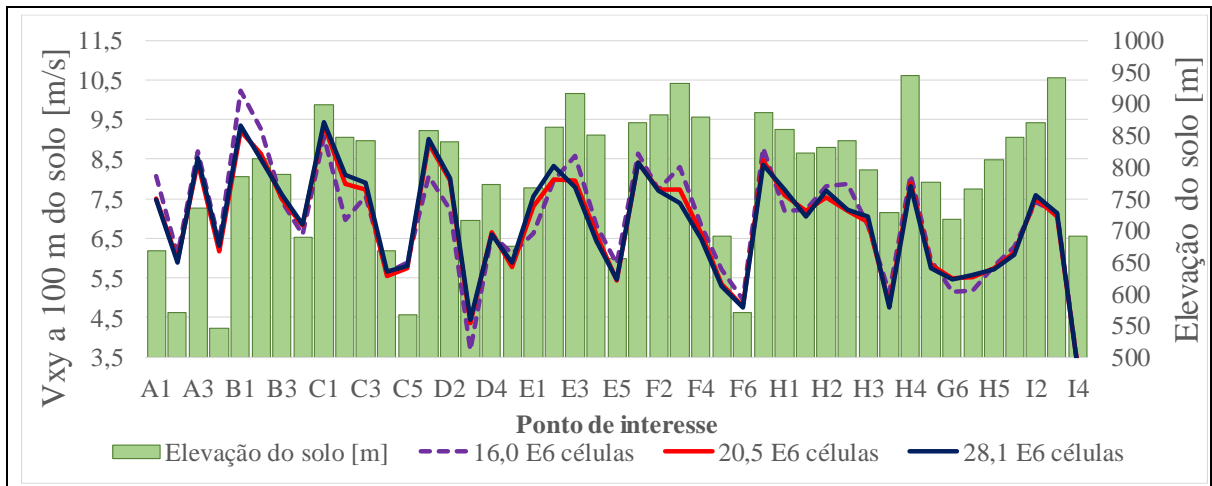


Figura 4.26 – " V_{xy} " a 100 m do solo avaliada em 45 posições para os três domínios considerados considerando modelo "*RANS estável*"

Os erros globais de previsão cruzada entre as torres anemométricas para cada um dos modelos testados são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Erro global de previsão cruzada entre torres anemométricas considerando simulações com escoamento orientado a 110 graus na entrada.

Domínio Computacional	Células [$\times 10^6$]	Erro global de previsão cruzada entre torres anemométricas [%]	
		Modelo <i>RANS neutro</i>	Modelo <i>RANS estável</i>
I	16,0	6,53	5,06
II	20,5	5,44	3,98
III	28,1	5,36	3,89

As relevantes discrepâncias observadas entre os resultados obtidos com domínio computacional "I" (16,0 E6 células) e com os demais domínios testados sugerem que o uso do domínio computacional "I" seria inadequado para o presente estudo no que diz respeito à resolução e à "convergência da malha".

As pequenas diferenças observadas entre os resultados obtidos com domínio computacional "II" (20,5 E6 células) e com o domínio "III" (28,1 E6 células) sugerem que ambos se situam dentro região de "convergência de malha". Tendo em vista o custo computacional e o tempo necessário para cada simulação direcional, o domínio computacional

“II” (com 20,5 E6 células) foi selecionado como favorito para uso no presente estudo. Os resultados apresentados ao longo da seção 4.7 consideram este domínio.

4.7 Resultados

Os resultados apresentados nesta seção são oriundos das simulações do escoamento atmosférico realizadas para o local descrito na seção 4.1.

Conforme descrito na seção 4.6, análises de qualidade de malha foram realizadas para cada um dos modelos de escoamento testados considerando diferentes domínios computacionais, tendo em vista assegurar convergência de malha. Os resultados descritos nesta seção são referentes as simulações realizadas com o domínio computacional “II” (com 20,6 milhões de células).

Para as simulações visando o escoamento atmosférico “neutro” característico da Camada Limite Convectiva (CLC) utilizou-se o modelo linear WAsP e um modelo CFD “*RANS $k-\varepsilon$ neutro*”. Conforme mencionado na seção 4.4, dentro do escopo deste estudo o termo “*RANS neutro*” refere-se à modelagem “ $k-\varepsilon$ ” tradicionalmente utilizada no setor eólico, que não considera o perfil estratificado de temperatura potencial, não considera os efeitos das forças hidrostáticas e não resolve as equações para o balanço de energia e para o transporte de temperatura potencial. A Figura 4.27 ilustra uma das simulações direcionais realizadas com o modelo “*RANS neutro*” considerando escoamento na entrada do domínio orientado a 110 graus (setor Sudeste). O mapa de cores observado nesta figura é proporcional a magnitude da componente horizontal de velocidade (“ V_{xy} ”). Para fins de comparação, um mapa de “velocidades” obtido através do modelo linear WAsP é apresentado no Apêndice D.

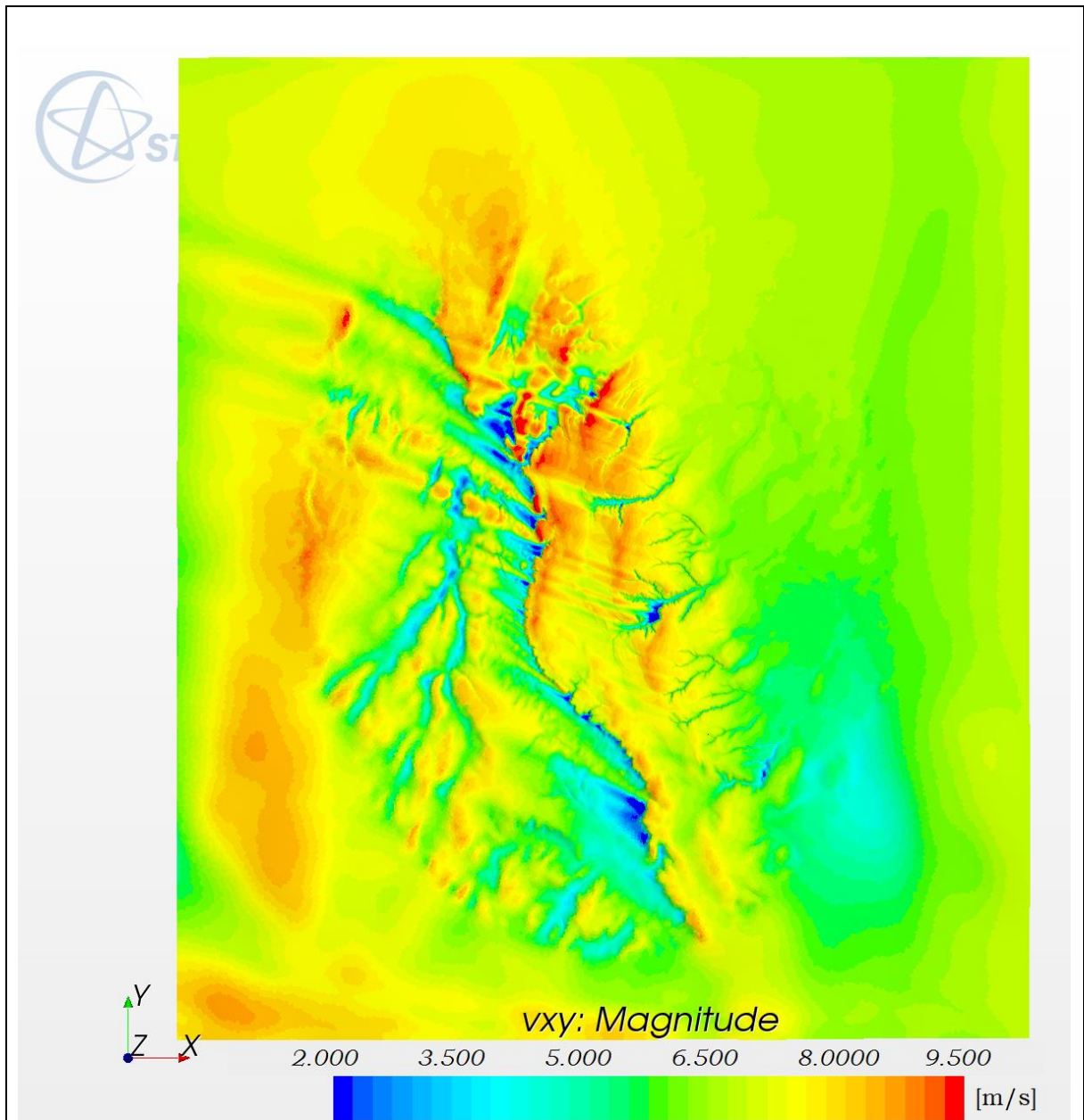


Figura 4.27 – Magnitude da componente horizontal de velocidade (V_{xy}) a 80 m do solo para simulação com modelo “*RANS neutro*” e escoamento orientado a 110 graus na entrada

Para as simulações considerando o escoamento atmosférico “estável” característico da Camada Limite Estável (CLE) utilizou-se a metodologia “*RANS estável*” proposta neste estudo. A Figura 4.28 ilustra uma das simulações direcionais realizadas com o modelo “*RANS estável*” considerando escoamento na entrada do domínio orientado a 110 graus (setor Sudeste). Conforme ilustrado pela Figura 4.5, o setor Sudeste é o setor predominante (de maior frequência) para o escoamento atmosférico na região de interesse do presente estudo.

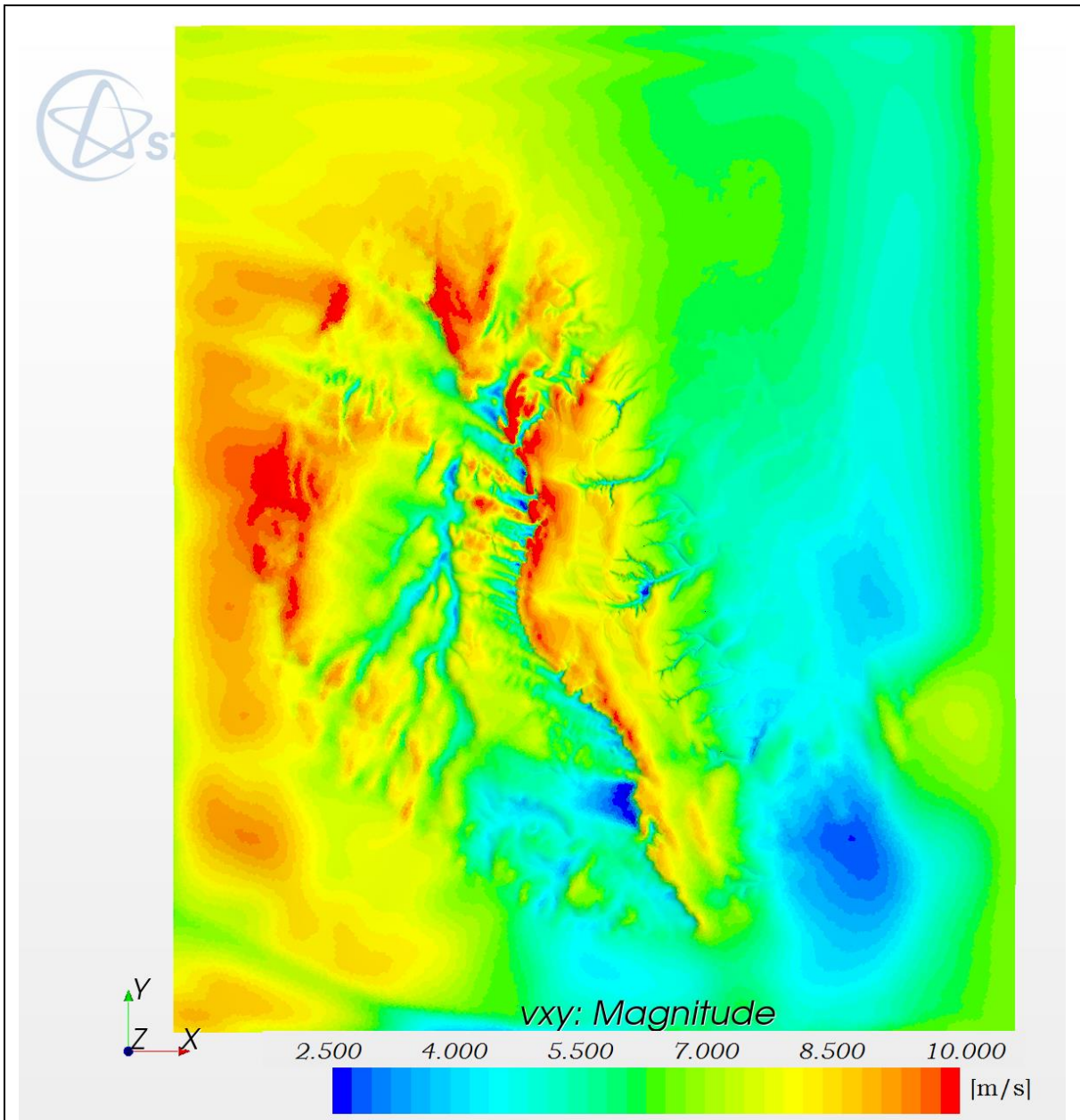


Figura 4.28 – Magnitude da componente horizontal de velocidade (V_{xy}) a 80 m do solo para simulação com modelo “*RANS estável*” e escoamento orientado a 110 graus na entrada

Foram realizadas múltiplas simulações direcionais para cada modelo CFD considerando incrementos de 10 graus no fluxo de entrada do escoamento. Os resultados finais advêm de ponderações realizadas com as simulações direcionais e posteriormente da composição dos resultados obtidos com os modelos CFD “*RANS neutro*” e “*RANS estável*”. A metodologia

empregada para a ponderação direcional e para a composição entre os modelos é apresentada na seção 4.4.

A definição física dos “fatores de aceleração” foi introduzida na seção 4.4. Eles representam a razão entre as velocidades médias previstas por um dado modelo de escoamento para a posição de cada torre anemométrica. Na Figura 4.29 são apresentados os fatores de aceleração obtidos através dos modelos de escoamento testados para um dos pares de torres anemométricas disponível (Torres C e D). Eles foram divididos em 12 setores médios de direção do escoamento. Para comparação são apresentados também os fatores de aceleração derivados a partir dos dados medidos por ambas as torres considerando 12 setores de direção.

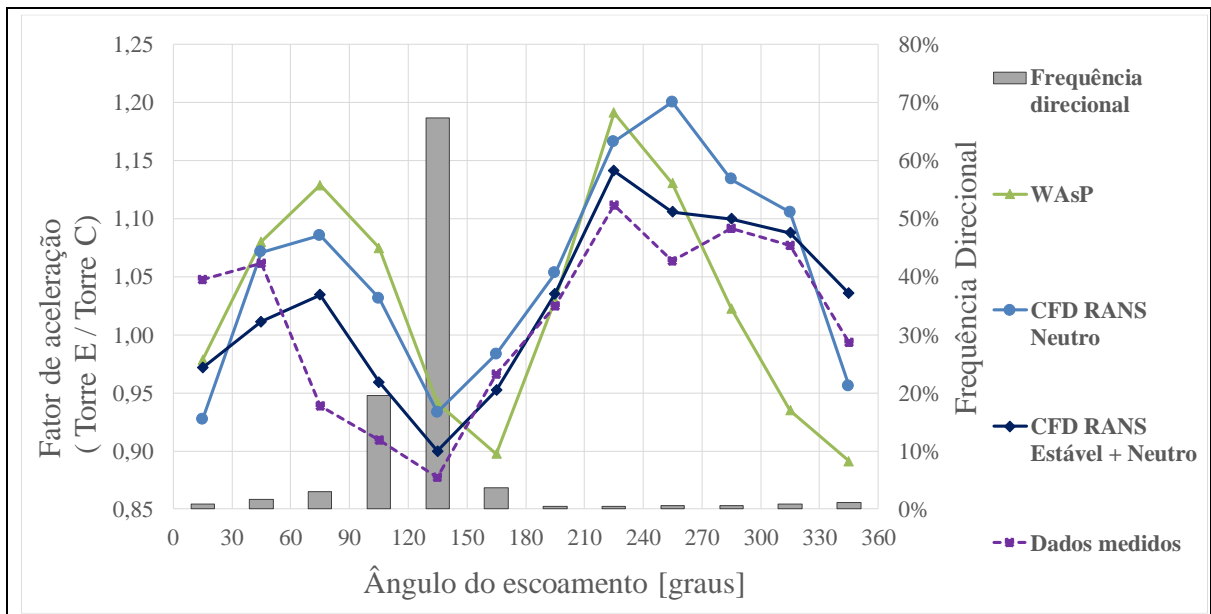


Figura 4.29 – Fatores de aceleração direcionais entre as Torres “C” e “E”

A composição dos modelos CFD RANS “*estável + neutro*” proposta neste estudo é a que mais se aproxima dos dados medidos, em especial para os setores direção que vão de 90 graus até 150 graus. Estes setores relevantes, pois segundo os dados anemométricos medidos eles concentram juntos cerca de 85% da frequência direcional do escoamento. Este par de torres foi escolhido para este exemplo, mas o mesmo comportamento dos erros é observável também para os outros possíveis pares de torres anemométricas. Na Figura 4.30 são apresentados os fatores de aceleração derivados entre as torres “A” e “C”

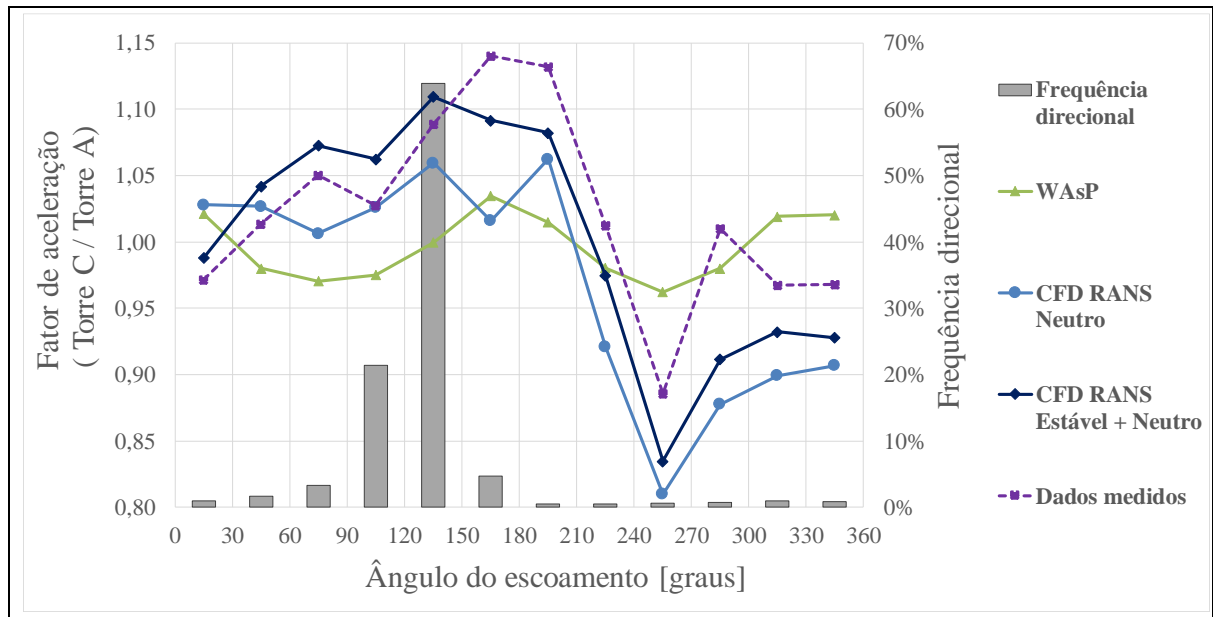


Figura 4.30 – Fatores de aceleração direcionais entre as Torres “A” e “C”

Na Figura 4.31 são apresentados os perfis verticais para componente horizontal de velocidade (V_{xy} próxima do solo), obtidos com ambos os modelos CFD, para a posição da Torre “A”. Tendo em vista facilitar a comparação, para a altura do anemômetro superior desta torre (instalado a 80 m solo) todos os perfis apresentados possuem a mesma velocidade, que coincide com a velocidade média registrada por aquele anemômetro. O erro médio associado às medições anemométricas realizadas para as três alturas foi estimado em $\pm 2,0\%$, conforme ilustra a Figura 4.31. A curva teórica obtida através da “lei de potências” [Equação (2.6)] que melhor “acerta” as velocidades para as três alturas de medição também é apresentada para comparação.

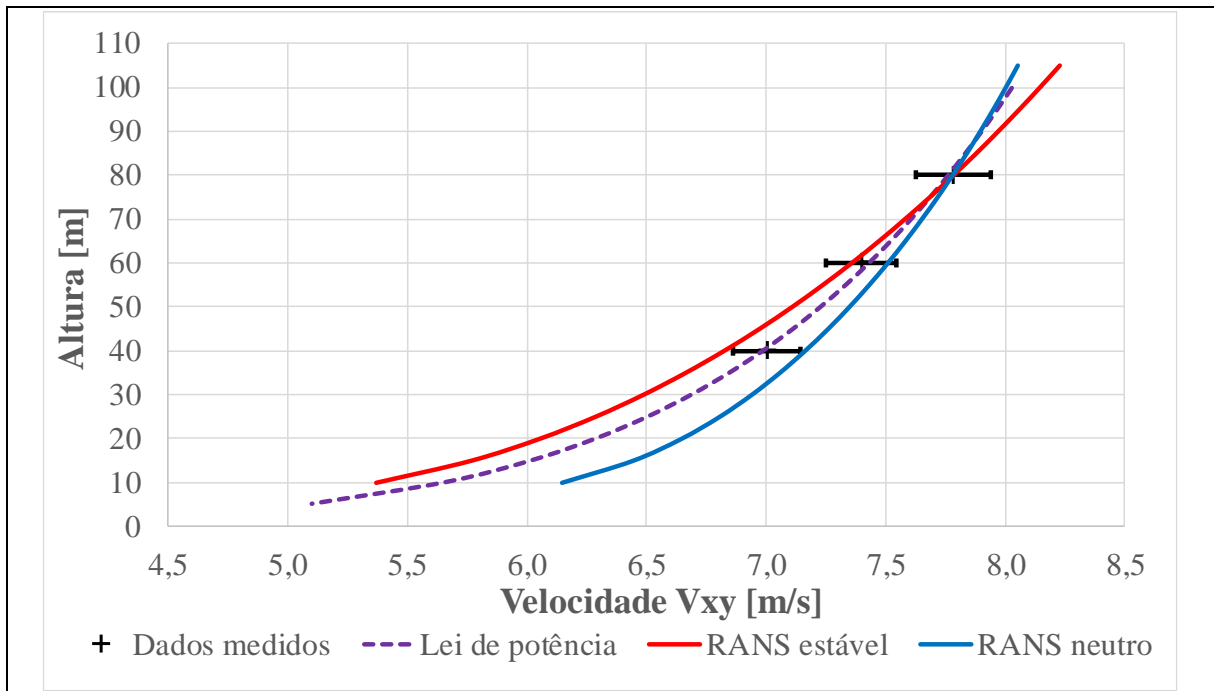


Figura 4.31 – Perfis verticais de velocidade para a posição da “Torre A” normalizados pela velocidade média registrada na altura do anemômetro superior

Analogamente na Figura 4.32 são apresentados os perfis verticais para a componente horizontal de velocidade (" V_{xy} " próxima do solo), obtidos com ambos os modelos CFD, para a posição da Torre Anemométrica “E”.

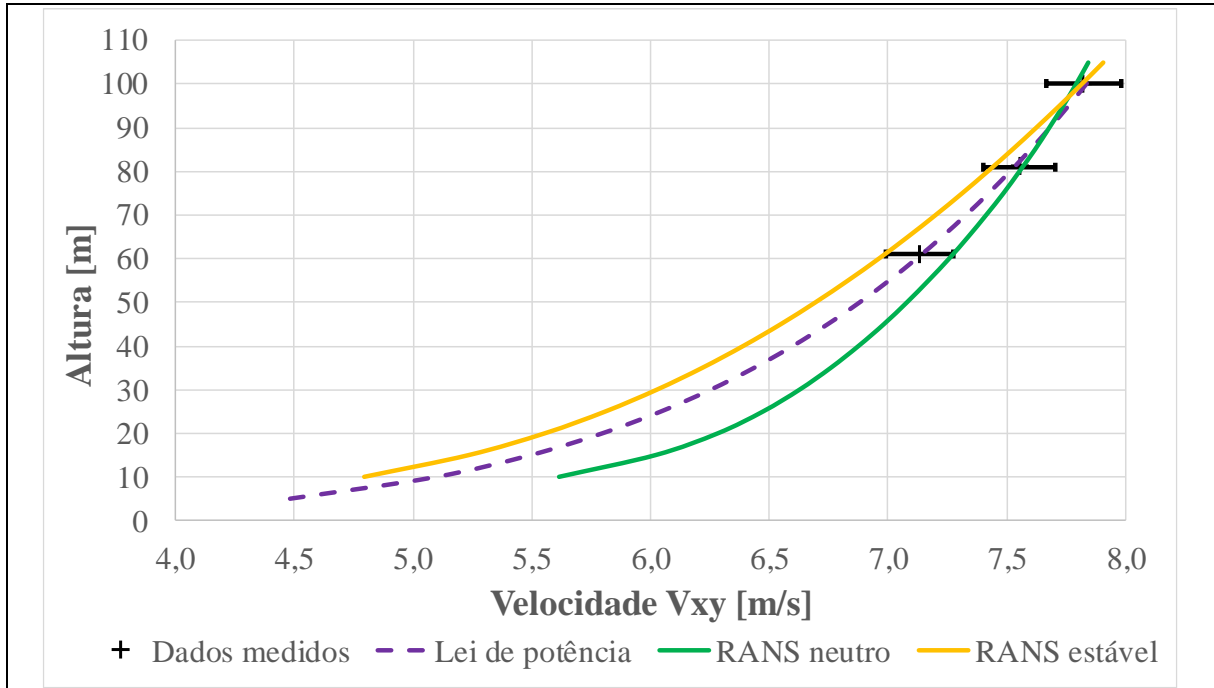


Figura 4.32 – Perfis verticais de velocidade para a posição da “Torre E” normalizados pela velocidade medida pelo anemômetro superior

Para o cálculo dos erros de previsão cruzada dos modelos, são comparados os fatores de aceleração medidos com os fatores de aceleração simulados pelos modelos de escoamento estudados. A definição do termo “fator de aceleração” foi apresentada na Equação (4.1). Na Tabela 4.4 são apresentados os erros médios globais obtidos pela previsão cruzada desde uma torre anemométrica, tendo como alvo as quatro outras torres anemométricas adjacentes.

Tabela 4.4 – Erros médios globais de previsão cruzada a partir de cada torre

Modelo	Torre de inicialização					Média
	Torre A	Torre B	Torre C	Torre D	Torre E	
WAsP	7,2%	7,8%	6,7%	6,6%	7,4%	7,1%
CFD RANS $k-\varepsilon$ “neutro”	5,6%	6,7%	3,2%	7,2%	3,4%	5,2%
CFD RANS $k-\varepsilon$ “estável + neutro”	2,8%	5,7%	2,5%	5,1%	3,0%	3,8%

A composição dos modelos “CFD RANS estável+ neutro” é a alternativa testada que apresenta o menor erro médio para o conjunto das cinco torres anemométricas. Esta composição apresentou redução no erro médio de 3,3% em relação ao WAsP e de 1,4% em relação ao modelo “CFD RANS neutro”. A redução de erro foi verificável para inicializações a partir de

todas as cinco torres, e no caso da torre A, por exemplo, a redução no erro médio foi de 4,4% em relação ao WAsP e 2,8% em relação ao modelo “CFD RANS neutro”.

5 CONCLUSÕES

5.1 Discussão Ampliada

As principais etapas técnicas que constituem um estudo de avaliação de produção de energia eólica foram apresentadas detalhadamente na seção 1.1.1. Tendo em vista os resultados apresentados ao longo do presente estudo, é possível validar a afirmação postulada por Burton et al., 2011. Os autores sugerem que dentre todas as categorias de incertezas associadas as previsões de produção de energia para um projeto de parque eólico, na maioria dos casos, a incerteza associada à modelagem do escoamento atmosférico representa a categoria de maior magnitude e relevância. Essa percepção tem se tornado um consenso entre diversos pesquisadores e no setor eólico como um todo.

O recurso eólico característico de um dado local pode apresentar variações de grande magnitude para distâncias relativamente curtas, da ordem de algumas centenas de metros. Isso ocorre porque além dos fenômenos meteorológicos de grande escala, as características locais (de microescala) como topografia e vegetação também impactam o escoamento do vento, em especial na região da subcamada superficial que é mais relevante para o setor eólico. É neste contexto que os modelos para o escoamento atmosférico se tornam úteis para extrapolar espacialmente o recurso eólico desde as posições de medição até as áreas de interesse nos projetos de parques eólicos. Conforme o exemplo apresentado na seção 1.1.1, para um projeto de parque eólico com 100 MW de potência nominal e fator de capacidade de 40%, erros nas previsões de velocidade da ordem de 5%, introduzidos pelo mau desempenho do modelo de escoamento, podem se traduzir em incertezas na receita anual do projeto que variam entre 2,1 e 3,6 milhões de reais.

A partir da pesquisa realizada para este trabalho e da literatura disponível pode-se afirmar que ainda existem muitos desafios no uso de modelos CFD RANS para simulações do escoamento atmosférico livre sobre terreno complexo. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 3.1, Bechmann et al., 2011, demonstraram através de seu estudo comparativo, que entre 27 participantes diferentes com modelos CFD RANS usando fechamento a duas equações, o menor erro médio global obtido em relação aos dados anemométricos medidos foi da ordem de 10%. Ross et al., 2004, afirmam que uma das maiores

incertezas e dificuldades no uso de CFD RANS (2 eq.) para simulação do escoamento atmosférico são os valores adotados para as parametrizações das equações de fechamento.

Os trabalhos analisados também sugerem que o uso de CFD LES (*Large Eddy Simulation*) em simulações do escoamento atmosférico ainda não é viável para aplicações comerciais no setor eólico. Segundo Ross et al., 2004, a alta resolução de malha e o tempo necessários para a coleta de resultados estatisticamente relevantes tornam os modelos CFD LES ainda inviáveis para o escoamento atmosférico. Segundo Bechmann et al., 2011, o maior desafio no uso de CFD LES está associado à determinação e controle de condições de contorno transientes que reproduzam realisticamente o escoamento livre dentro da Camada Limite Atmosférica (CLA). Os resultados apresentados pelos autores para o teste comparativo na ilha de “Bolund” sugerem que modelos CFD RANS (2 eq.) são ainda o estado da arte para a modelagem em microescala do escoamento do vento com foco no setor eólico.

O modelo “*RANS estável*” requer consideravelmente menos recursos computacionais se comparado com modelos LES, embora tenha um equacionamento ligeiramente mais robusto do que modelos “*RANS k-ε*” tradicionais. O estudo de validação descrito ao longo da 4 demonstrou que a aplicação do modelo “*RANS estável*” é uma alternativa viável para aplicações no setor eólico.

Os mapas de cores para a componente horizontal de velocidade (V_{xy}), apresentados na Figura 4.27 (modelo “*RANS neutro*”) e na Figura 4.28 (modelo “*RANS estável*”) ilustram a existência de diferenças significantes entre os resultados obtidos com cada modelo, mesmo para o escoamento mais próximo do solo (dentro da subcamada superficial). No caso do modelo “*RANS estável*” a supressão da intensidade de turbulência das correntes livres e a intensificação do coeficiente da “lei de potências” torna o modelo mais sensível às características topográficas do local e às características de rugosidade do terreno. Pode-se notar pela Figura 4.28 (“*RANS estável*”) que as regiões mais elevadas e mais próximas de escarpas (declives acentuados) apresentam velocidades mais altas do que aquelas exibidas na Figura 4.27 (“*RANS neutro*”). Analogamente, as regiões de menor altitude e as regiões a jusante de obstáculos apresentam velocidades mais baixas no modelo “*RANS estável*” do que no modelo “*RANS neutro*”. Este comportamento é consistente com a realidade física dos ciclos diários de estratificação térmica dentro da CLA, descritos ao longo da seção 2.1. Os dados medidos pelas torres anemométricas instaladas no local também corroboram este comportamento, conforme ilustram a Figura 4.8 e a Figura 4.9.

A composição dos modelos *RANS* “*estável + neutro*” é uma alternativa versátil e promissora para capturar os ciclos diurnos e noturnos de estabilidade atmosférica utilizando modelos em regime permanente para o escoamento atmosférico. Os erros apresentados na Tabela 4.4 sugerem que para a modelagem do escoamento atmosférico sobre terreno complexo, a composição *RANS* “*estável + neutro*” é, em geral, mais precisa do que modelos como WAsP e CFD “*RANS neutro*”, ambos amplamente utilizados no setor eólico. Considerando um projeto de parque eólico genérico qualquer, com potência instalada total de 100 MW e fator capacidade de 40%. Seguindo a lógica dos resultados apresentados na Tabela 4.4, uma redução nos erros médios de previsão cruzada do modelo de escoamento de 7,1% (com WAsP) para 3,8% (com *RANS* “*estável + neutro*”) poderia se traduzir em uma redução no fator incerteza associada à receita anual líquida do projeto de cerca de R\$ 1.200.000,00 (considerando uma remuneração contratada de R\$ 100/MWh). Este exemplo demonstra o quão sensíveis os projetos de parques eólicos são em relação à pequenas variações nos modelos de escoamento atmosférico.

Os fatores de aceleração direcionais apresentados na Figura 4.29 e na Figura 4.30 também corroboram o desempenho superior do modelo *RANS* “*estável + neutro*” frente aos outros modelos testados. Pode-se notar que para os setores de direção do escoamento com maior frequência de incidência, os fatores de aceleração derivados através da composição dos modelos *RANS* “*estável + neutro*” compõe a alternativa testada que melhor se aproxima dos resultados obtidos através dos dados medidos pelas torres anemométricas.

Os perfis verticais da componente horizontal de velocidade (V_{xy}), obtidos com os modelos de escoamento analisados, são apresentados para as posições de duas torres anemométricas na Figura 4.31 e na Figura 4.32. Pode-se notar que o modelo “*RANS estável*” apresenta desaceleração mais intensa nas camadas de fluido mais próximas do solo e aceleração mais intensa nas camadas de fluido mais distantes do solo, se comparado com o modelo “*RANS neutro*”. Conforme mencionado na seção 2.1, este comportamento é consistente com os ciclos de estabilidade atmosférica característicos do local de interesse. Durante os períodos de estabilidade atmosférica é esperado que o escoamento atmosférico seja menos turbulento (com menos mistura vertical) e que os gradientes verticais da componente horizontal de velocidade sejam mais intensos.

Outros autores realizaram experimentos e testes com variações de modelos do tipo “*RANS estável*” similares àquela proposta ao longo da seção 3.2. Os resultados obtidos por estes autores confirmam o bom desempenho observado com o modelo “*RANS estável*” no

presente estudo. Bleeg et al., 2014, realizaram testes de validação com cerca de 40 torres anemométricas distribuídas por 8 parques eólicos distintos, e verificaram que o modelo “*RANS estável*” apresentou reduções significantes de erros (da ordem de 3%) para cerca de 90% dos pares de torres anemométricas investigados. Herbert-Acero et al., 2017, utilizaram uma variação do modelo “RANS estável” que apresentou erros de previsão cruzada entre torres anemométricas inferiores aos erros obtidos com WAsP para dois parques eólicos situados em locais com topografia complexa no México. As validações adicionais apresentadas na seção 3.2.1 utilizando os experimentos realizados em túnel de vento por Ross et al., 2004, também ilustram o bom desempenho do modelo “*RANS estável*” para situações de estabilidade atmosférica.

No presente estudo as condições de entrada do escoamento foram definidas utilizando teorias existentes para o equilíbrio da Camada Limite Estável (CLE). Alternativamente estas condições poderiam ter sido derivadas a partir de simulações meteorológicas de grande escala. Diversos autores, incluindo Bleeg et al., 2014, apontam o acoplamento entre simulações de grande escala e as simulações com “*RANS estável*” como um campo de estudo futuro com potencial para trazer melhorias adicionais à precisão dos modelos de escoamento. Van der Laan et al, 2017, também publicaram uma variação do modelo “*RANS $k-\epsilon$* ” customizada para o escoamento atmosférico afetado pela estratificação térmica. Segundo os autores, o modelo proposto também se beneficiaria de possíveis acoplamentos com modelos de macro escala, em especial para definição das condições de contorno do problema.

5.2 Conclusões Resumidas

Tendo em vista todos os resultados do presente estudo, assim como todas as discussões associadas a estes resultados (apresentadas na seção 5.1), é possível concluir de maneira resumida que:

- Ainda há muitos desafios associados à performance dos modelos disponíveis para simulação do escoamento dentro da camada limite atmosférica, tendo em vista aplicações comerciais no setor eólico como por exemplo para avaliações de produção de energia em parques eólicos. Mesmo modelos CFD tipo “*RANS $k - \epsilon$* ”, que são considerados por muitos como o “estado da arte” para simulações atmosféricas em microescala, podem apresentar erros médios nas velocidades previstas da ordem 10%.

Para um parque eólico de médio porte (100 MW), estes erros se traduzem em um fator de incerteza associado à receita anual do projeto que pode ultrapassar R\$ 3.000.000,00/ano;

- A maioria dos modelos de escoamento amplamente empregados no setor eólico (incluindo as aplicações tradicionais dos modelos RANS $k - \varepsilon$) não consideram os efeitos da estabilidade atmosférica sobre o escoamento livre. Modelos capazes de considerar os efeitos térmicos e a estratificação térmica para o escoamento do vento dentro da camada limite atmosférica em geral apresentam desempenho superior quando comparados com modelos que não dispõem desta capacidade;
- O modelo “RANS estável” proposto no presente trabalho apresenta grande potencial para reduzir a incerteza associada à modelagem do escoamento do vento em parques eólicos afetados por ciclos de estabilidade atmosférica, extremamente comuns no interior da região Nordeste do Brasil. Considerando o estudo de caso e as validações apresentadas na seção 4, quando comparado com os demais modelos testados, o modelo “RANS estável” foi a opção que apresentou:
 - Os menos erros globais médios para as previsões cruzadas de velocidade entre as posições das torres anemométricas;
 - O melhor desempenho em base direcional. Os fatores de aceleração direcionais obtidos com o modelo “*RANS estável*” foram os que melhor se aproximaram dos dados medidos;
 - Os perfis verticais de velocidade que mais se aproximaram dos perfis medidos nas posições das torres anemométricas;
- O principal ponto fraco do modelo “RANS estável” consiste na definição de condições de contorno que sejam fisicamente consistentes com o escoamento atmosférico para o local de interesse. Seguindo esta lógica, o desempenho do modelo “RANS estável” poderia ser melhorado através do acoplamento com modelos meteorológicos de mesoescala, como por exemplo modelos tipo WRF (*Weather Research and Forecasting*). Como aprimoramento futuro, estes modelos meteorológicos poderiam ser utilizados para inferir condições de contorno para simulações em microescala com o modelo “RANS estável”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEólica. **Associação Brasileira de Energia Eólica: Boletim anual de geração eólica 2016**. Publicado em 15 de fevereiro de 2017.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Manual do Acati: Procedimentos para alteração de características técnicas de empreendimentos que comercializaram energia no Ambiente de Contratação Regulado** Versão: 01/16. <http://www2.aneel.gov.br/>. Fevereiro 2016. Web.

Armenio, V.; Sarkar, S.; **The Atmospheric Boundary Layer**. Environmental Stratified Flows, Springer, pp. 179–232. Year 2005.

Bechmann, A.; Sørensen, N.; Berg, J.; Mann, J.; Rethore, P. E.; Mann, J. **The Bolund Experiment, Part II: Blind Comparison of Microscale Flow Models**. Boundary Layer Meteorology; vol. 141: pp. 245-271. 11 Aug. 2011.

Blasius, H. **The Boundary Layers in Fluids with Little Friction**, Zeitschrift für Mathematik und Physik, Band 56, Heft 1, 1908, pp. 1-37; English translation available as NACATM 1256, February 1950.

Bleeg, J.; Digraskar, D.; Woodcock, J.; Corbett, J. F. **Modeling Stable Thermal Stratification and Its Impact on Wind Flow over Topography**. Wind Energy, Wiley Online, 14 Jan. 2014, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/we.1692/>.

Bleeg, J.; Digraskar, D.; Horn, U.; Corbett, J. F. **Modelling stability at microscale, both within and above the atmospheric boundary layer, substantially improves wind speed predictions**. Proceedings from EWEA, Paris, France, 2015.

Burton, Tony, et al. **Wind Energy Handbook**. 2nd ed., Wiley, 2011.

Cabezón, D.; Sanz, J.; Van Beeck, J. **Sensitivity analysis on turbulence models for the ABL in complex terrain**. Scientific. Proceedings of EWEC, Milan, Italy, 2007.

Corbett, J. F.; Horn, U.; Bleeg, J.; Dnyanesh, D.; Whiting, R. **A systematic validation of CFD flow modelling for commercial wind farms sites**. Proceedings from EWEA, Barcelona, Spain. 2014.

Cushman-Roisin, B.; Beckers, J. M. **Introduction to Geophysical Fluid Dynamics: Physical and Numerical Aspects**. Elsevier: Academic Press. 2012. Print.

Davenport, A. G. **The relationship of wind structure to wind loading**. Proc. Symposium N.16 on Wind Effects on Buildings and Structures, National Physical Laboratory, Teddington, England, 26–28 June 1963.

Draxler, R. R.; Gillette, D. A.; Kirkpatrick, J. S.; Heller, J. **Estimating PM10 air concentrations from dust storms in Iraq, Kuwait and Saudi Arabia**. *Atmospheric Environment*, vol. 35, pp. 4315–4330. 11 Feb. 2001.

Duffie, John A.; Beckman, William A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. Wiley, 2013. Print.

EPE. Empresa De Pesquisa Energética. **Leilões De Energia: Instruções Para as Medições Anemométricas E Climatológicas Em Parques Eólicos**. Nota Técnica DEA 08/14. <http://www.epe.gov.br/>. Maio 2014. Web.

EPE. Empresa De Pesquisa Energética. **Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à participação nos Leilões de Energia Elétrica**. Nota Técnica EPE-DEE-017/2009-r14. <http://www.epe.gov.br/>. Agosto 2017. Web.

Garratt, J. R. **The Atmospheric Boundary Layer**. Cambridge University Press, 316 pp. 1992.

Google earth V 7.3.0.3832. Brazil. Digital Globe 2017. <http://www.earth.google.com>. Web.: August 28th, 2017.

GWEC. **Global Wind Energy Council: Global Wind Statistics 2016**. Publicado em 10 de fevereiro de 2017.

Hayes, C; Tchou, J.; Tanenhaus, S.; Bleeg, J.; Walter, K. **Atmospheric stability and its effects on wind speed correlations**. Presented at CanWEA, Toronto, Canada, 2012.

Herbert-Acero, J. F.; et al. **Wind Flow Assessments in Complex Terrain through Computational Fluid Dynamics Simulations**. Mexico Wind Power Conference and Exhibition 2017. DNV GL – Energy. March 2017.

Holtslag, A. A. M.; et al. **Stable Atmospheric Boundary Layers and Diurnal Cycles: Challenges for Weather and Climate Models**. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 94, no. 11, 2013, pp. 1691–1706. Year 2013.

IEC. International Electrotechnical Commission. **IEC 61400-12-1: Power Performance measurements of Electricity Producing Wind Turbines**. First Edition, Annex G, pp. 66-73. 2005.

Launder, B. E.; Spalding, D. B. **The numerical computation of turbulent flows**. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*; vol. 3: pp. 269–289. 1974.

Mandas, N.; Cambuli, F.; Crasto, G.; Cau, G. **Numerical simulation of the Atmospheric Boundary Layer (ABL) over complex terrains**. Proceedings from EWEC, London, UK, 2004.

Michalcová, V.; et al. **Computational Simulations of the Thermally Stratified Atmospheric Boundary Layer above Hills**. *Procedia Engineering*, vol. 190, pp. 134–139., 2017. doi:10.1016/j.proeng.2017.05.318

Monin, A.S.; Obukhov. A.M. **Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere**. *Tr. Akad. Nauk SSSR Geophys. Inst.*; vol. 24: pp. 163–187. 1954.

Newman, J.; Klein, P. **The Impacts of Atmospheric Stability on the Accuracy of Wind Speed Extrapolation Methods**. *Resources*, vol. 3, no. 1, pp. 81–105. 2014. doi:10.3390/resources3010081.

Nieuwstadt, F. T. M. **The Turbulent Structure of the Stable, Nocturnal Boundary Layer**. *Journal of Atmospheric Sciences*; vol. 41: pp. 2202-2216. 1984.

Obukhov, A. M. **Turbulence in an Atmosphere with a Non-Uniform Temperature**. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 2, no. 1, pp. 7–29. 1971. doi:10.1007/bf00718085.

OpenWind. **Theoretical Basis and Validation**. Version 1.3. AWSTruepower, LLC. Albany, NY, April 2010.

Prandtl, L. **Fluid Motion with Very Small Friction**, Proceedings of the Third International Congress on Mathematics, Heidelberg, 1904; English translation available as NACA TM 452, March 1928.

Reynolds, O. **An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels**. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 174, pp. 935–982. 1883.

Ross, A.; Arnold, S.; Vosper, S.; Mobbs, S.; Dixon, N.; Robins, A. **A Comparison of Wind-Tunnel Experiments and Numerical Simulations of Neutral and Stratified Flow over a Hill**. *Boundary-Layer Meteorology*; vol. 113 : pp 427-459. 2004.

Schlichting, H. **Boundary-Layer Theory**, 7th ed. New York: McGraw-Hill, 1979.

SRTM. **Shuttle Radar Topography Mission: 1 Arc-Second Global**. USGS - U.S. Geological Survey. EarthExplorer. <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Web.: May 2016.

STAR-CCM+. **User Guide and Theory Manual**. 9th Edition. CD-adapco, 2014.

Stokes, George Gabriel. **On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums**, *Cambridge Philosophical Transactions*, IX, 8, 1851.

Sumner, J.; Masson, C. **The Apsley and Castro Limited-Length-Scale $k - \epsilon$ model revisited for improved performance in the atmospheric surface layer**. *Boundary Layer Meteorology*. 2012. DOI: 10.1007 /s10546-012-9724-7

UCAR. **Layers of Earth's Atmosphere**. Center for Science Education, University Corporation for Atmospheric Research. 11 Nov 2017. <https://scied.ucar.edu/atmosphere-layers>.

Van der Laan, M. P.; Kelly, M. C.; Sørensen, N. **A New k-Epsilon Model Consistent with Monin-Obukhov Similarity Theory**. *Wind Energy*, vol. 20, no. 3, pp. 479–489. 2017. doi:10.1002/we.2017.

Venayagamoorthy, S. K.; Stretch, D. D. **On the turbulent Prandtl number in homogeneous stably stratified turbulence**. *The Journal of Fluid Mechanics*; vol. 644: pp. 359–369. 2010.

WASP 10 Help Facility. **Wind Atlas Analysis and Application Program**. Roskilde: DTU Wind Energy, 2011.

Wenzel, G.; Bleeg, J.; Tilman, F., Marco, J. M. **Impact of Atmospheric Stability on Wind Energy Predictions**. Presented at Brazil Wind Power, Rio de Janeiro, Brazil, 2014.

WindPro. **User Guide and Theory Manual**. Version 3.2. EMD International A/S. Aalborg, Denmark. April 2017.

WindFarmer. **User Guide and Theory Manual**. Version 5.3. DNV GL - Energy. Bristol, UK. April 2014.

Zilitinkevich, S. **On the Determination of the Height of the Ekman Boundary Layer**. *Boundary-Layer Meteorology*; vol. 3: pp. 141–145. 1972.

Apêndice A – Camada Limite

No caso do escoamento potencial (ideal) de ar sobre uma placa plana infinita, o fluido apresenta velocidade nula junto à interface sólida e velocidades baixas nas imediações da parede, como consequência da rugosidade da placa e do atrito. A velocidade do escoamento dentro da camada limite que se forma aumenta com a distância em relação a parede, até que fora da “camada limite ideal” os efeitos da viscosidade são desprezíveis e efetivamente não há mais efeitos de cisalhamento por atrito entre as camadas de fluido.

A.1 Camada Limite Laminar (CLL)

A solução para a camada limite laminar formada pelo escoamento sobre uma placa plana infinita foi postulada por Blasius, 1950. (Blasius foi aluno de Pradtl, 1928). A Figura A.1 ilustra a geometria do problema.

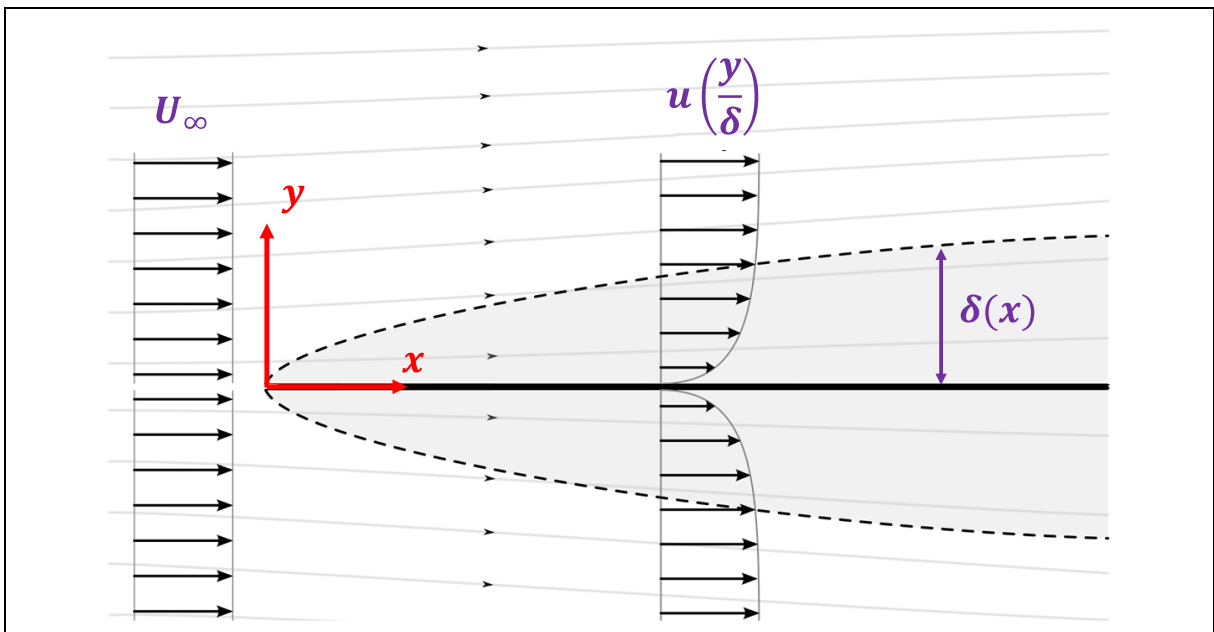


Figura A.1 – Camada limite laminar formada sobre uma placa plana

Para escoamentos em regime permanente, bidimensionais, incompressíveis e sem gradientes de pressão, Blasius, 1950, demonstrou que as equações de Navier Stokes para quantidade de movimento e a equação da continuidade poderiam ser resumidas a:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{A.2})$$

Onde:

- "u" e "v" são componentes do vetor velocidade, com dimensão [m/s];
- "μ" é a viscosidade dinâmica, com dimensão [Pa. s];
- "ρ" é a densidade ou massa específica, com dimensão [kg/m³];

As condições de contorno válidas para o problema seriam:

$$\begin{aligned} \text{em } y = 0 &\rightarrow u = 0 \text{ e } v = 0 \\ \text{em } y = \infty &\rightarrow u = U_{\infty} \text{ e } \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

Para iniciar sua solução, Blasius, 1950, assumiu que o perfil vertical de velocidade " $u(x, y)$ " deveria ser similar para todos os valores de " x ". Para avaliar tal perfil, o autor definiu um comprimento adimensional a partir da "parede":

$$u = u(\eta) \text{ onde } \eta \propto \frac{y}{\delta} \quad (\text{A.4})$$

Baseado na solução obtida por Stokes, 1851, Blasius considerou que:

$$\delta \propto \sqrt{\nu \cdot t} \cong \sqrt{\nu \cdot \frac{x}{U_{\infty}}} \quad (\text{A.5})$$

Onde:

- "δ" é a espessura teórica da CLL, com dimensão de comprimento [m];
- "t" é uma medida de tempo, com dimensão [s];
- "ν" é a viscosidade cinemática, com dimensão [m²/s];

Sendo assim, Blasius, 1950, utilizou as equações (A.4) e (A.5) e postulou que:

$$\eta = y \sqrt{\frac{U_{\infty}}{\nu \cdot x}} \quad (\text{A.6})$$

Utilizando uma função de corrente " ψ " tal que:

$$\psi = \nabla \times \vec{V} \quad (\text{A.7})$$

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad e \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (\text{A.8})$$

Blasius também postulou uma forma adimensional desta função de corrente:

$$f(\eta) = \frac{\psi}{\sqrt{U_{\infty} \cdot \nu \cdot x}} \quad (\text{A.9})$$

Através de um longo desenvolvimento matemático, Blasius formulou um problema de valor de contorno para o escoamento ideal sobre uma placa plana infinita utilizando a função de corrente adimensional exibida na equação (A.9). A equação diferencial governante obtida a partir deste extenso desenvolvimento foi:

$$2 \frac{\partial^3 f}{\partial \eta^3} + f \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial \eta^2} = 0 \quad (\text{A.10})$$

As condições de contorno válidas para o problema seriam:

$$\begin{aligned} \text{em } \eta = 0 & \rightarrow f = 0 \quad e \quad \frac{\partial f}{\partial \eta} = 0 \\ \text{em } \eta = \infty & \rightarrow \frac{\partial f}{\partial \eta} = 1 \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Não é possível resolver o problema de valor de contorno descrito pela equação (A.10) usando métodos analíticos. Blasius utilizou uma expansão em séries de potência para derivar uma solução aproximada. Os resultados obtidos por Blasius já foram confirmados por diversos outros pesquisadores. Na Tabela A-1 são apresentados valores obtidos através de integração numérica utilizando método Runge-Kutta.

Tabela A-1 Resultados de Blasius, 1908, para a CLL ao longo de uma placa plana

η	$f(\eta)$	$\frac{\partial f}{\partial \eta} = \frac{u}{U_\infty}$	$\frac{\partial^2 f}{\partial \eta^2}$
0,0	0,000	0,000	0,332
0,5	0,042	0,166	0,331
1,0	0,166	0,330	0,323
1,5	0,370	0,487	0,303
2,0	0,650	0,630	0,267
2,5	0,996	0,751	0,217
3,0	1,397	0,846	0,161
3,5	1,838	0,913	0,108
4,0	2,306	0,956	0,064
4,5	2,790	0,980	0,034
5,0	3,283	0,992	0,016
5,5	3,781	0,997	0,007
6,0	4,280	0,999	0,002
6,5	4,779	1,000	0,001

O perfil de velocidade dentro da camada limite laminar, em sua forma adimensional, é similar ao ilustrado pela Figura A.2.

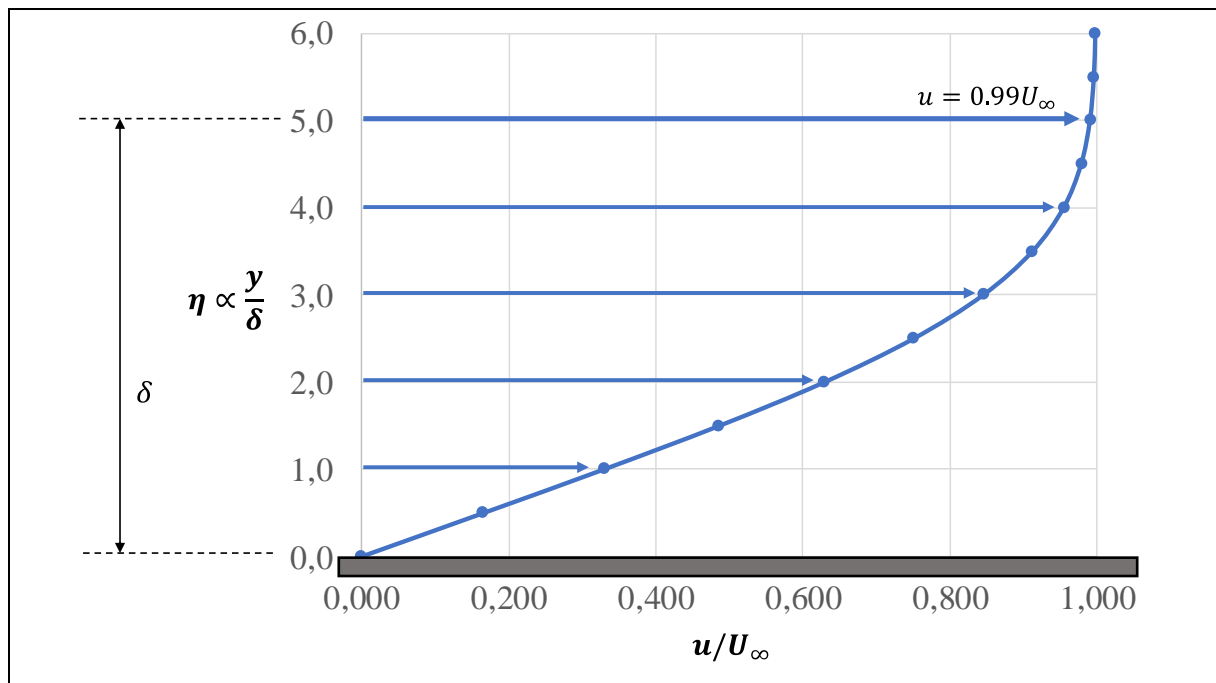


Figura A.2 – Perfil de velocidade adimensional dentro da CLL sobre uma placa plana

Pode-se notar pelos resultados da Figura A.2, que para " $\eta \cong 5$ " a velocidade dentro da CLL aproxima-se assintoticamente da velocidade da corrente livre na região externa à CLL, onde os efeitos da viscosidade sobre o escoamento são desprezíveis. É possível então estabelecer uma equação para a espessura teórica da CLL que se forma sobre uma placa plana ideal, em função da distância em relação à borda de ataque " x ":

$$\delta(x) \cong \frac{5,0}{\sqrt{\frac{U_\infty}{\nu \cdot x}}} = \frac{5,0 \cdot x}{\sqrt{Re_x}} \quad (\text{A.12})$$

Onde:

- " Re " é o número adimensional de Reynolds.

A.2 Camada Limite Turbulenta (CLT)

No Apêndice A.1 foi apresentado um breve resumo sobre as teorias para a formação da Camada Limite Laminar (CLL) no escoamento livre sobre uma placa plana. Conforme observado por Osborne Reynolds, 1883, a medida que o número de Reynolds (" Re_x ") característico do escoamento aumenta, observa-se a transição do escoamento "laminar" para o escoamento dito "turbulento". Este fenômeno ocorre também para o escoamento dentro da camada limite. Conforme ilustrado pela Figura A.3, a CLL que se forma sobre uma placa plana deverá transacionar para Camada Limite Turbulenta (CLT) quando o número de Reynolds for suficientemente elevado.

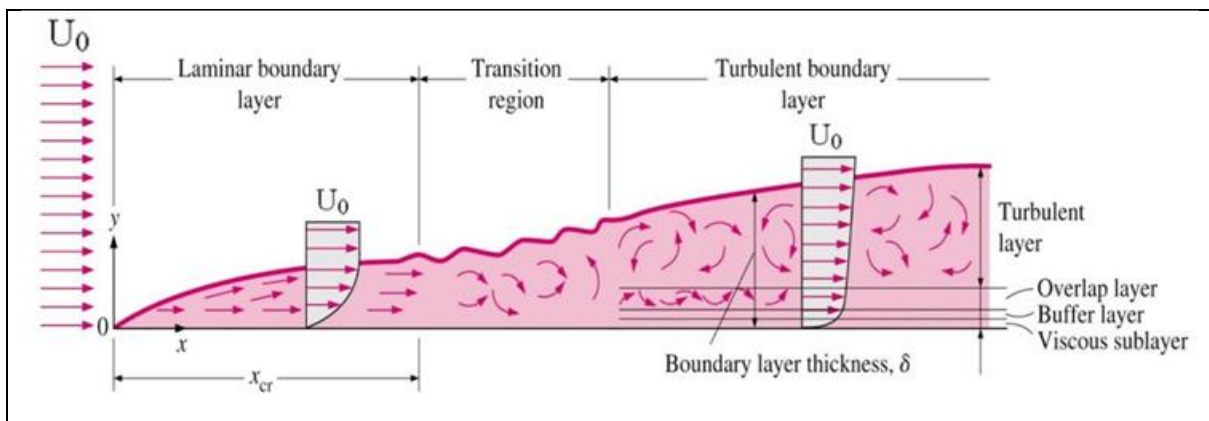


Figura A.3 – Camada limite laminar formada sobre uma placa plana [adaptado de Fox et al., 2015].

A definição do número adimensional de Reynolds para o escoamento sobre uma placa plana é apresentada na Equação (A.13).

$$Re_x = \frac{\text{forças inerciais}}{\text{forças viscosas}} = \frac{\rho \cdot u \cdot x}{\mu} \quad (\text{A.13})$$

Pode-se notar pela figura Figura A.3 dentro da Camada Limite Turbulenta (CLT) se forma uma sub-região delgada situada mais próxima à parede. Esta sub-região é frequentemente chamada de Subcamada Viscosa, e dentro dela as forças viscosas predominam sobre as forças inerciais ocasionando a "dissipação viscosa" da turbulência.

A “lei de Newton” para os escoamentos é apresentada em sua forma simples (considerando fluido Newtoniano e incompressível) na Equação (A.19).

$$\tau_{ij} = \mu \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{A.14})$$

Onde:

- $i, j = 1, 2, 3$;
- " u_i " é a componente do vetor velocidade na direção “ i ” [m/s];
- " τ_{ij} " é a tensão de cisalhamento [Pa];
- " μ " é a viscosidade dinâmica, com dimensão [Pa. s].

Para a geometria do escoamento livre sobre uma plana ideal apresentado na Figura A.3, a Equação (A.19) pode ser reescrita como:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} \quad (\text{A.15})$$

Supondo que a espessura da subcamada viscosa seja tão fina que a tensão de cisalhamento permaneça constante ao longo de toda sua extensão, a Equação (A.20) pode ser integrada:

$$\int du = \int \left(\frac{\tau}{\mu} \right) dy \quad (\text{A.16})$$

$$u(y) = \frac{\tau_w}{\mu} \cdot y + C_1 \quad (\text{A.17})$$

- " τ_w " é a tensão de cisalhamento junto à parede [Pa].

Devido a condição de não deslizamento, " $u(0) = 0$ ". Dessa maneira constante de integração " C_1 " se anula e a Equação (A.17) pode ser escrita como:

$$u(y) = \frac{\tau_w}{\mu} \cdot y \quad (\text{A.18})$$

A seguir serão postuladas três variáveis que auxiliam no equacionamento voltado para a CLT que se forma sobre uma placa plana. Trata-se da velocidade de atrito (u_*), da velocidade adimensional (u^+) e do comprimento adimensional (y^+).

Velocidade de atrito:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (\text{A.19})$$

Onde:

- " τ_w " é a tensão cisalhante na interface, ou parede, com dimensão $\left[\frac{N}{m^2}\right]$;
- " ρ " é a densidade ou massa específica, com dimensão $[kg/m^3]$;
- " u_* " é a velocidade de atrito, com dimensão $[m/s]$;

Velocidade adimensional:

$$u^+ = \frac{u}{u_*} \quad (\text{A.20})$$

Comprimento adimensional:

$$y^+ = y \cdot \frac{u_*}{\nu} \quad (\text{A.21})$$

Onde:

- " y " é o comprimento medido a partir da parede, com dimensão $[m]$;
- " ν " é a viscosidade cinemática, com dimensão $[m^2/s]$;

Através do uso destas variáveis auxiliares, a Equação (A.18) pode ser reescrita como:

$$u(y) = \frac{(u^*)^2}{\nu} \cdot y = u_* \cdot y^+ \quad (\text{A.22})$$

$$\frac{u(y)}{u_*} = y^+ \quad (\text{A.23})$$

Finalmente:

$$u^+ = y^+ \quad (\text{A.24})$$

Devido à condição de tensão constante que foi assumida, a relação exibida na Equação (B.8) é válida apenas dentro da delgada subcamada viscosa que se forma dentro da CLT. Segundo Schlichting, 1979, a espessura máxima da subcamada viscosa desenvolvida sobre uma placa plana é cerca de $y^+ \cong 5$. Sendo assim, não é difícil provar que a velocidade na periferia da subcamada viscosa é equivalente a cinco vezes a velocidade de atrito ($\bar{u} = 5 \cdot u^*$).

Fora da subcamada viscosa, a teoria do “comprimento de mistura” postulada por Prandtl, 1904, pode ser usada para definir uma relação entre u^+ e y^+ válida para o restante da CLT. Segundo esta teoria, no caso do escoamento sobre uma placa plana, o comprimento de mistura " l_m " seria a distância vertical percorrida por uma partícula de fluido antes desta se dispersar (ou se misturar) sob os efeitos da turbulência adjacente. Este coeficiente pode ser escrito como:

$$l_m = \kappa \cdot y \quad (\text{A.25})$$

Onde:

- " y " é o comprimento medido a partir da parede, com dimensão [m];
- " κ " é a constante adimensional de Von Kármán.

Para definição deste coeficiente, Prandtl, 1904, o relacionou com as flutuações de velocidades observadas no fluido:

$$\overline{u'v'} = -(l_m)^2 \cdot \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right|^2 \quad (\text{A.26})$$

No Apêndice B será apresentada em detalhe a teoria das médias de Reynolds. A Equação (B.12) pode ser adaptada para o escoamento unidirecional idealizado sobre uma placa plana:

$$\tau_w = -\rho(\overline{u'v'}) \quad (\text{A.27})$$

Substituindo as Equações (A.25) e (A.27) na Equação (A.26):

$$\frac{\tau_w}{\rho} = (\kappa \cdot y)^2 \cdot \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right|^2 \quad (\text{A.28})$$

Introduzindo o conceito de velocidade de atrito, apresentado na Equação (A.19):

$$u_*^2 = (\kappa \cdot y)^2 \cdot \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right|^2 \quad (\text{A.29})$$

$$u^* = \kappa \cdot y \cdot \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (\text{A.30})$$

Integrando em "y":

$$\int d\bar{u} = \int \left(\frac{u^*}{\kappa \cdot y} \right) dy \quad (\text{A.31})$$

$$\bar{u} = \frac{u^*}{\kappa} \ln(y) + C \quad (\text{A.32})$$

Após extensa manipulação matemática, Schlichting, 1979, prova que a Equação (A.32) pode ser reescrita como:

$$u^+ = \frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B \quad (\text{A.33})$$

Esta relação, também conhecida como “lei logarítmica” (ou em alguns casos “lei de parede”) é a fundamentação teórica principal para o equacionamento apresentado na seção 2.3, que descreve o perfil vertical esperado para o escoamento atmosférico próximo do solo. Para o escoamento teórico sobre uma placa plana a constante "B" pode ser adotada como aproximadamente 5,5:

$$u^+ = \frac{u}{u^*} \cong 2,5 \cdot \ln(y^+) + 5,5 \quad (\text{A.34})$$

Schlichting, 1979, demonstrou que entre $y^+ = 5$ e $y^+ = 30$ se observa uma região de transição entre a subcamada viscosa e o restante da CLT, onde a Equação (B.2) não é completamente válida. Entre $y^+ = 30$ e a periferia da CLT a Equação (B.2) seria válida, conforme ilustrado pela Figura A.4.

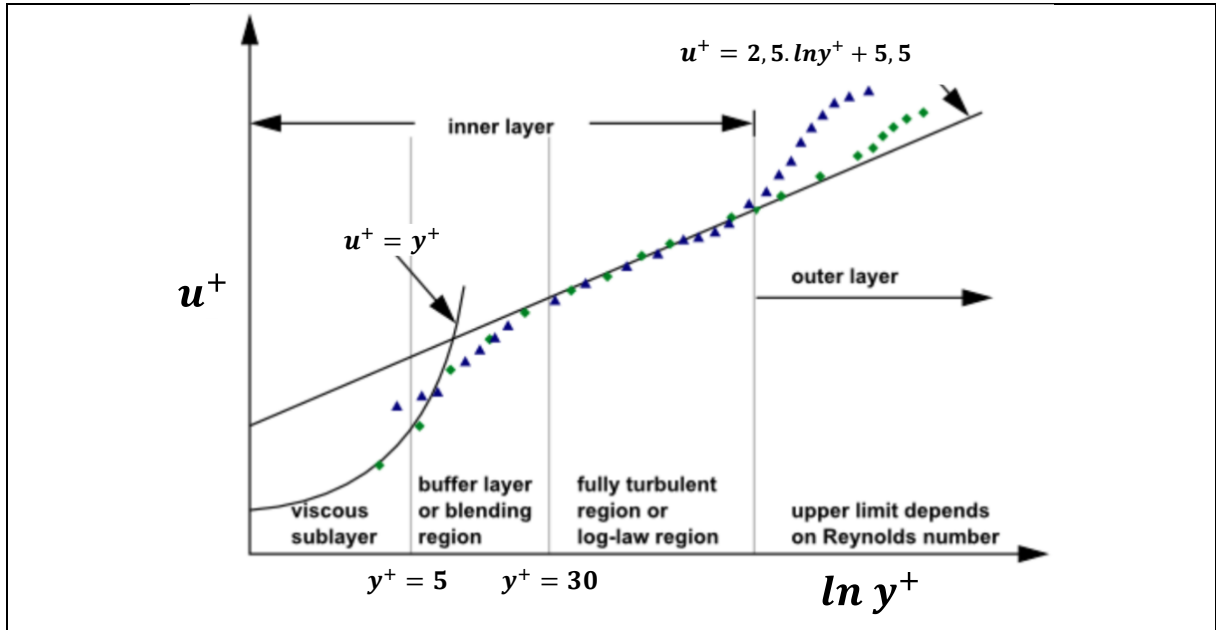


Figura A.4 – Regiões dentro da Camada Limite Turbulenta [adaptado de STAR-CCM+, 2014]

Diversos pesquisadores já comprovaram experimentalmente o comportamento apresentado na Figura A.4., como por exemplo Cushman e Beckers, 2012.

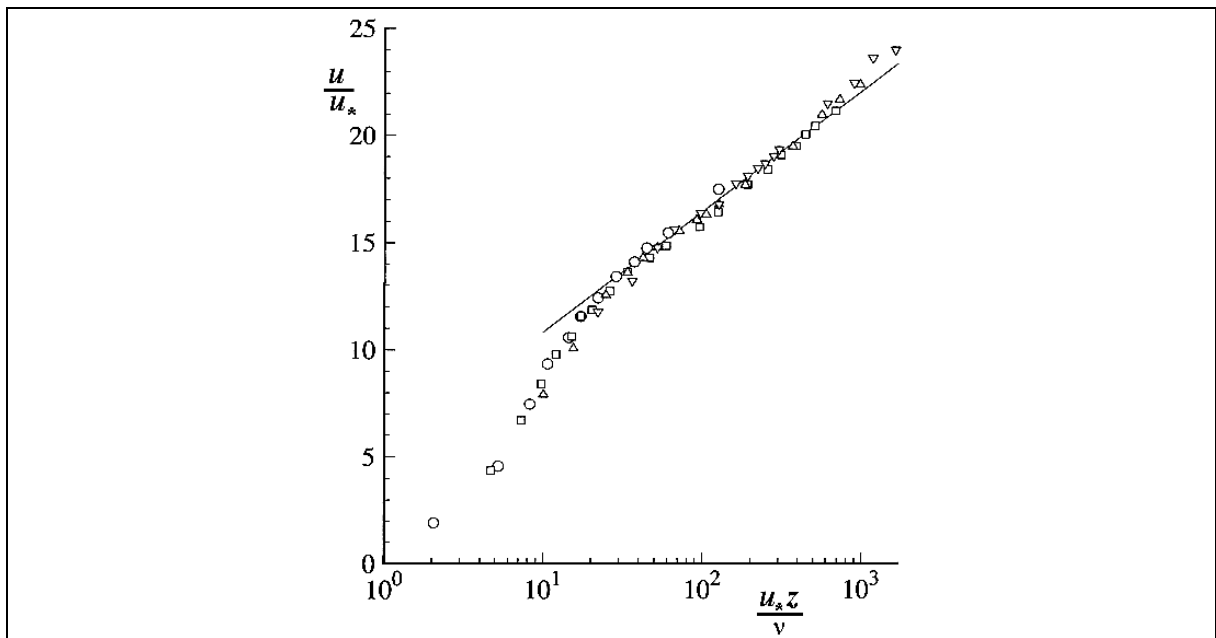


Figura A.5 – Regiões dentro da CLT [experimentos de Cushman e Beckers, 2012]

Apêndice B – Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) Equations

As equações de Navier Stokes para quantidade de movimento e a equação da continuidade podem ser escritas segundo a notação indicial em coordenadas cartesianas como:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} \right) = F_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (\text{B.1})$$

$$\frac{\partial (\rho \cdot u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{B.2})$$

Onde:

- $i, j = 1, 2, 3$;
- " u_i " é a componente do vetor velocidade na direção " i " [m/s];
- " σ_{ij} " é o tensor de tensões [N/m^2];
- " F_i " são as componentes do vetor forças de campo na direção " i " [N/m^3];
- " ρ " é a massa específica do fluido [kg/m^3].

O tensor de tensões pode ser escrito como:

$$\rho \sigma_{ij} = -P \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \delta_{ij} \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \quad (\text{B.3})$$

Onde:

- $\delta_{ij} = 1$ se $i = j$;
- $\delta_{ij} = 0$ se $i \neq j$;
- " P " é a pressão absoluta do fluido [Pa];
- " \vec{V} " é o vetor velocidade [m/s];

Se o escoamento for considerado incompressível, as equações de Navier Stokes para quantidade de movimento e a equação da continuidade podem ser resumidas a:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} \right) = F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (\text{B.4})$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (\text{B.5})$$

Onde:

- $i, j = 1, 2, 3$;

Nota-se que devido à condição de incompressibilidade, a Equação (B.1) também poderia igualmente ser escrita como:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} \right) = F_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] \quad (\text{B.6})$$

Considerando que o escoamento instantâneo possa ser desdobrado em componentes médias (\bar{u}_i) e componentes de flutuações (u_i'):

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (\text{B.7})$$

$$u_j = \bar{u}_j + u_j' \quad (\text{B.8})$$

$$P = \bar{P} + P' \quad (\text{B.9})$$

Caso as Equações (B.7), (B.8) e (B.9) sejam substituídas na Equação (B.1), e posteriormente sejam aplicadas “médias de Reynolds” em todos os termos:

- Após a aplicação das médias, todos os termos lineares “perdem” a componente flutuante:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} \rightarrow \frac{\partial (\overline{\bar{u}_i + u_i'})}{\partial t} = \frac{\partial (\overline{\bar{u}_i + u_i'})}{\partial t} = \frac{\partial (\bar{u}_i + \overline{u_i'})}{\partial t} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + 0 = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t}$$

- Após a aplicação das médias, todos os termos não lineares “perdem” mantêm uma parcela referente às flutuações:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} &\rightarrow \frac{\partial}{\partial x_j} [(\bar{u}_i + u_i')(\bar{u}_j + u_j')] = \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\bar{u}_i \bar{u}_j} + \overline{\bar{u}_i u_j'} + \overline{\bar{u}_j u_i'} + \overline{u_i' u_j'}) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\bar{u}_i \bar{u}_j} + \overline{u_i' u_j'}) \end{aligned}$$

Sendo assim, as equações *RANS* (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) para quantidade de movimento (utilizando notação indicial) podem ser escritas como:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} \right) = \bar{F}_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (\text{B.10})$$

Sabe-se ainda que o tensor de Reynolds (“para tensões aparentes”) pode ser postulado como:

$$\tau_{ij}' = -\rho \overline{(u'_i u'_j)} = -\rho \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} \quad (\text{B.11})$$

Substituindo então a Equação (B.11) na Equação (B.10):

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} \right) = \bar{F}_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}'}{\partial x_j} \quad (\text{B.12})$$

Caso a Equação (B.12) seja “aberta” para as três componentes cartesianas, e considerando-se viscosidade constante, as equações **RANS** podem ser reescritas como:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = \bar{F}_x - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \rho \left(\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \quad (\text{B.13})$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = \bar{F}_y - \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} - \rho \left(\frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \quad (\text{B.14})$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \\ = \bar{F}_z - \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} - \rho \left(\frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (\text{B.15})$$

Apêndice C – Torres Anemométricas: Montagem e Instrumentação

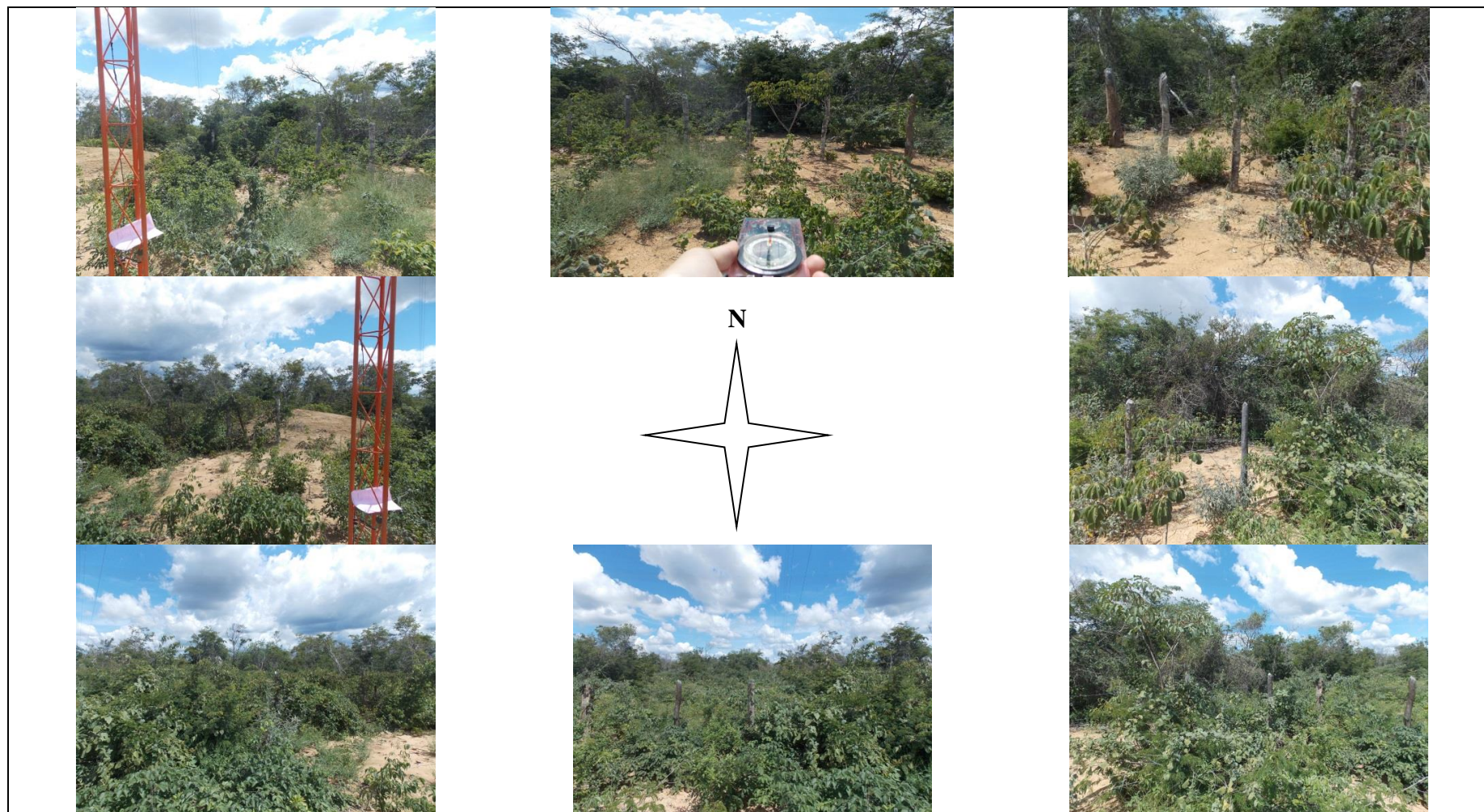


Figura C.1 – Vista geral do local de interesse a partir da Torre Anemométrica “A”

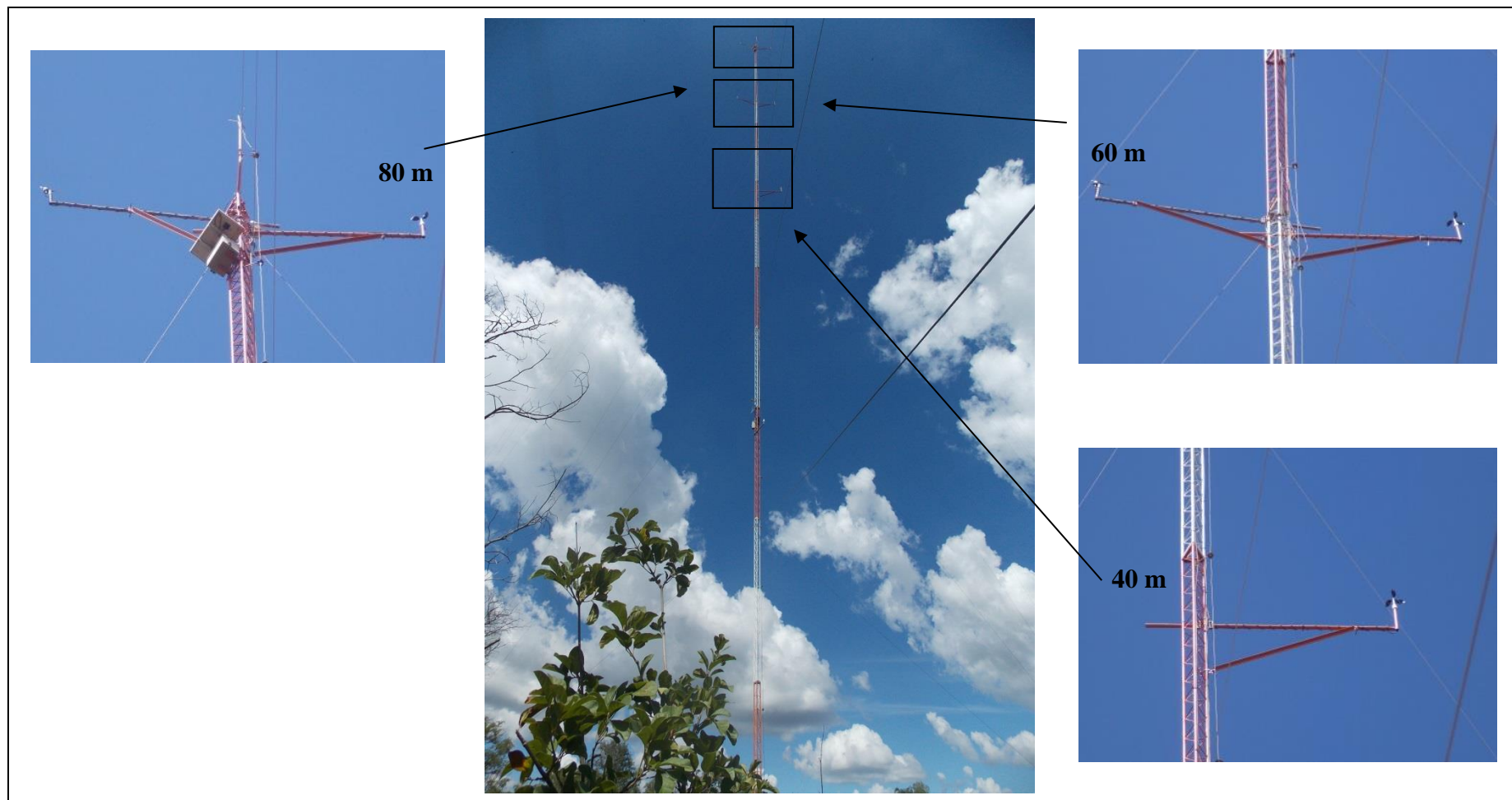


Figura C.2 – Arranjo de montagem da Torre Anemométrica “A”

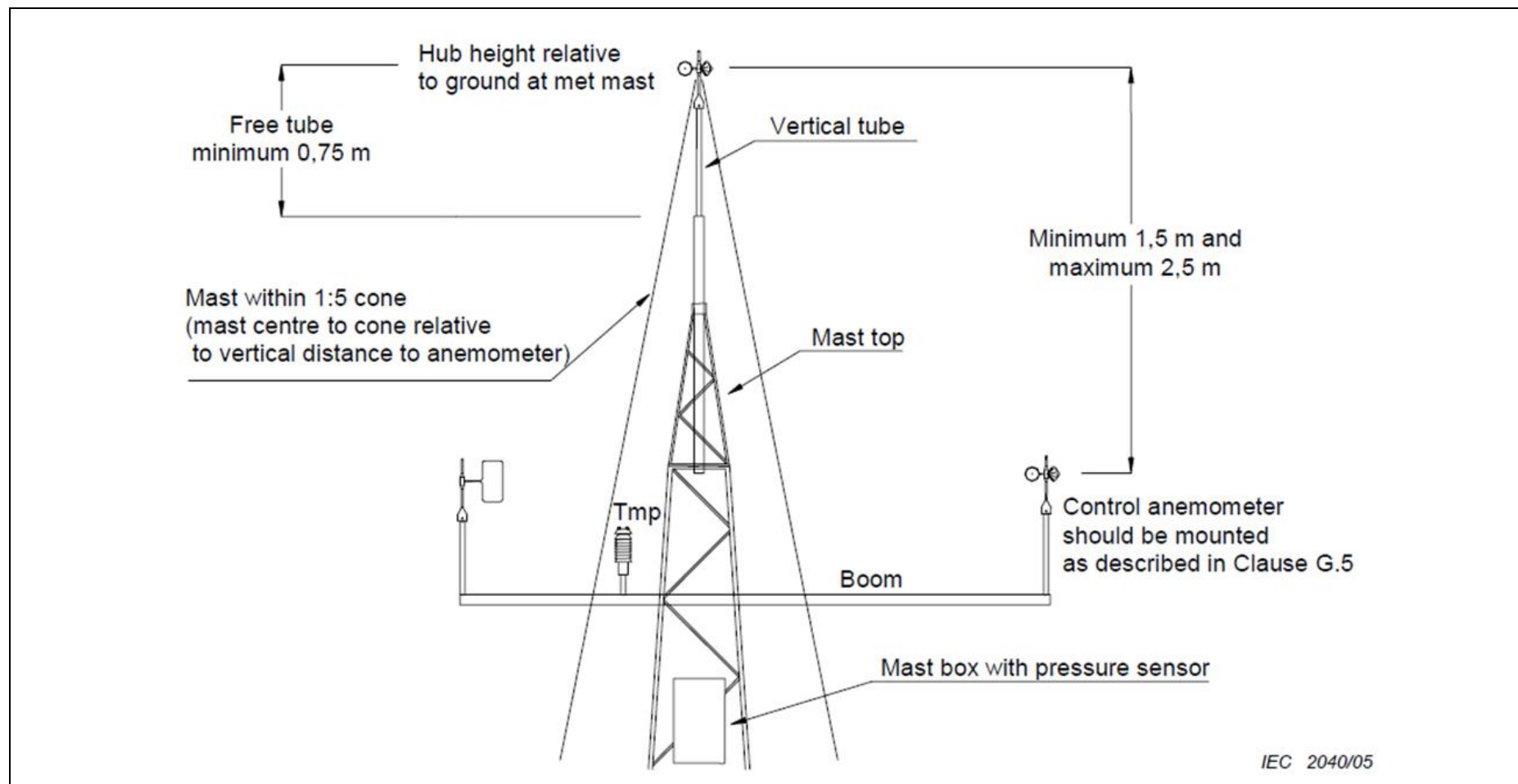


Figura C.3 – Recomendação de montagem para anemômetro de topo [IEC, 2005]

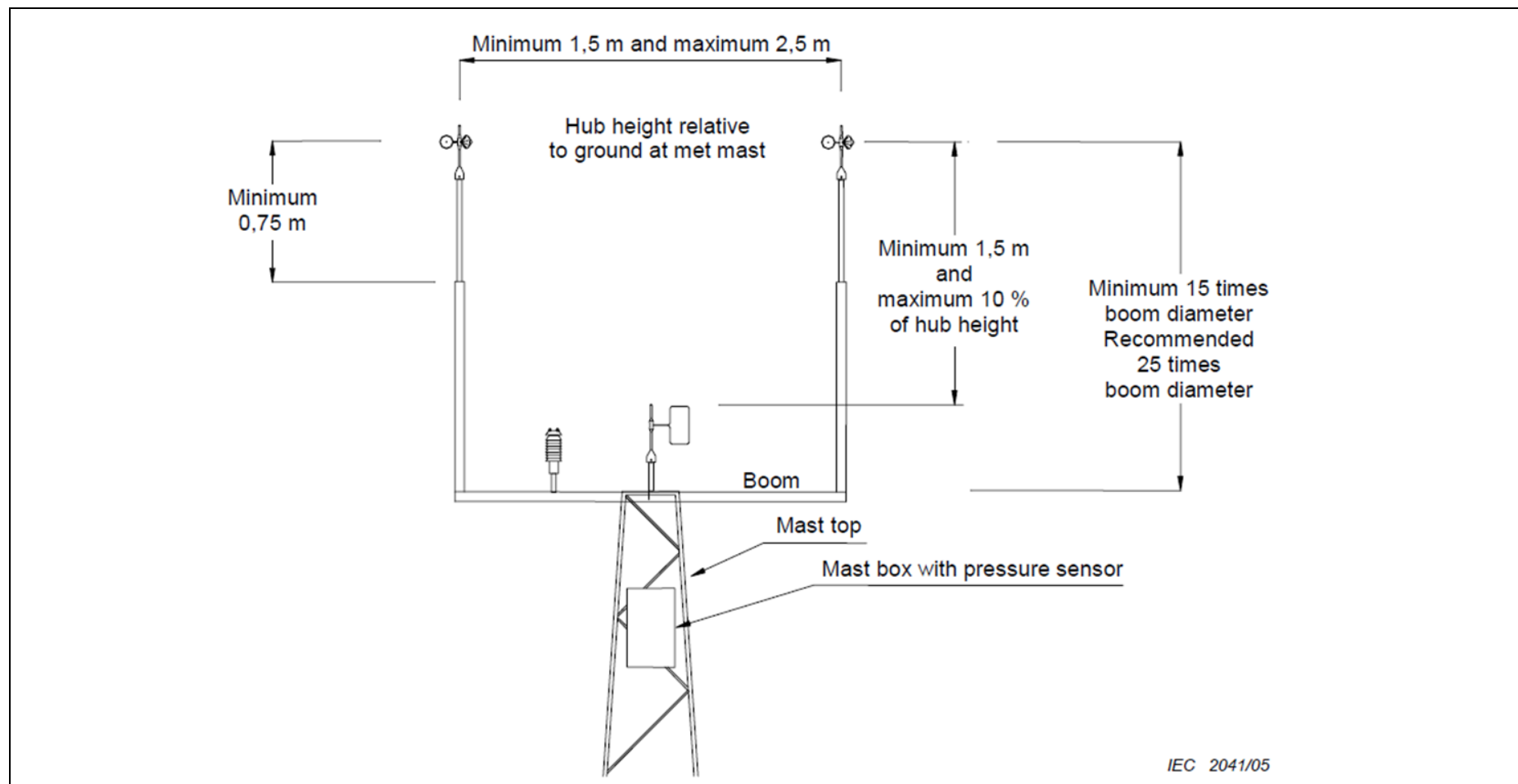


Figura C.4 – Recomendação de montagem para anemômetros paralelos [IEC, 2005]

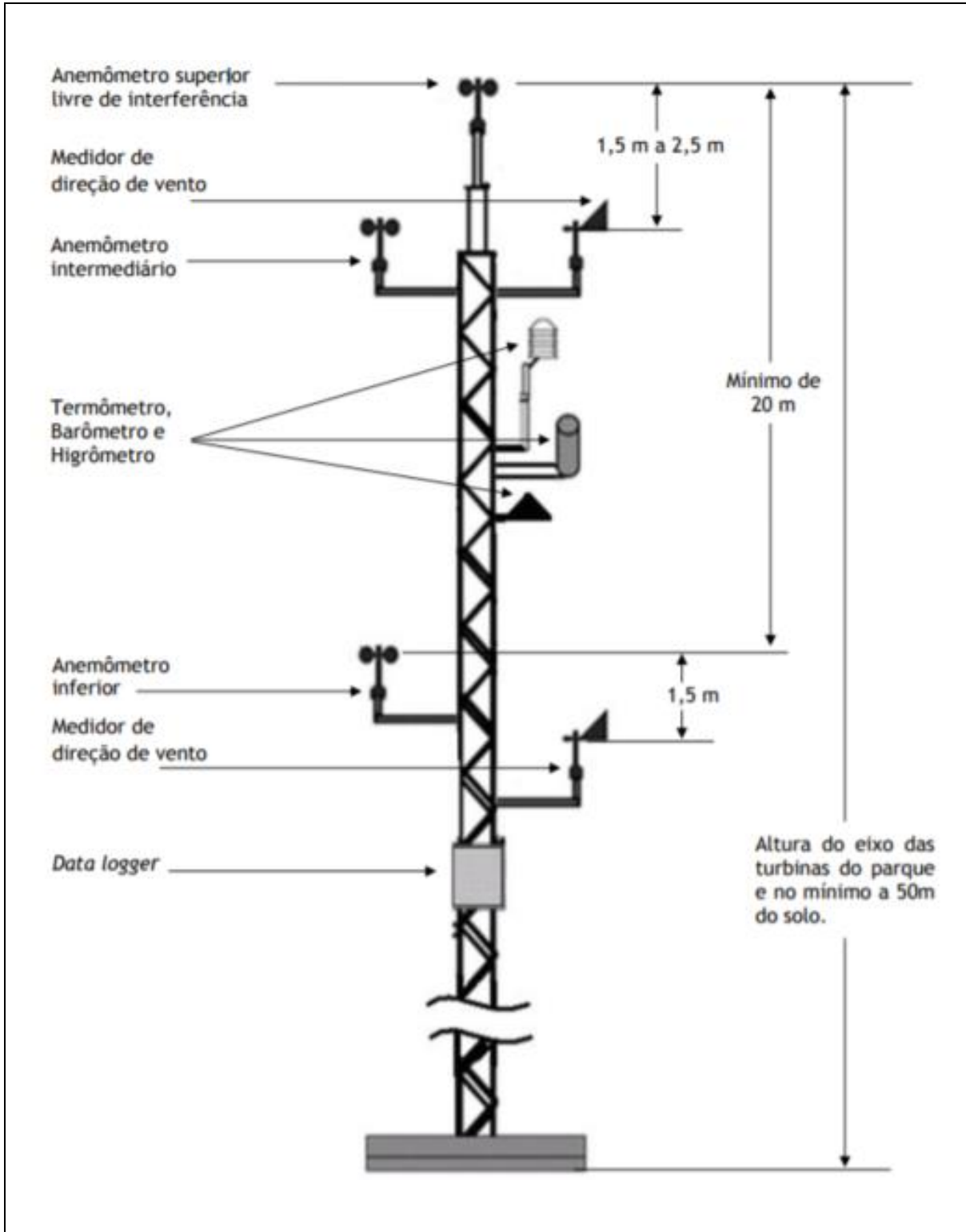


Figura C.5 – Instrumentação recomendada para uma torre anemométrica [EPE, 2014]

Apêndice D – Mapa de velocidades obtido com WASP

Na Figura D.1 é apresentado o mapa da componente horizontal de velocidade (V_{xy}) obtido com o software linear WASP, versão 10.2, (*Wind Atlas Analysis and Application Program*) para uma altura de 80 m acima do nível do solo.

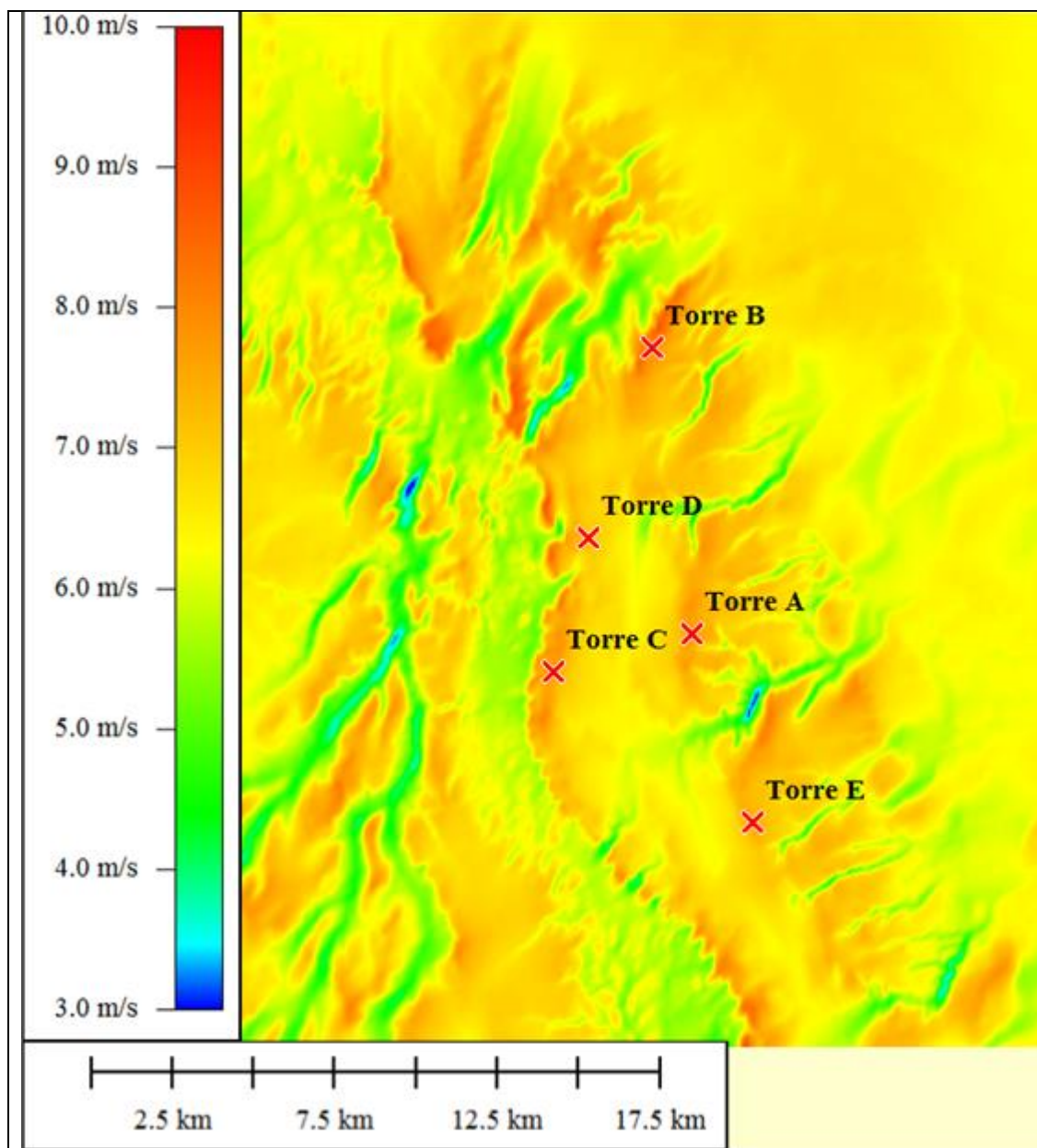


Figura D.1 – Mapa da componente horizontal de velocidade (V_{xy}) a 80 m do solo obtido com o modelo linear WASP v10.2