

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL MESTRADO**

MATHEUS FOSCHERA SCHUSTER

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA NA CAMADA
LIMITE ATMOSFÉRICA**

São Leopoldo

2021

MATHEUS FOSCHERA SCHUSTER

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA NA CAMADA
LIMITE ATMOSFÉRICA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientadora: Prof.^a Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani

São Leopoldo

2021

S395m Schuster, Matheus Foschera.
Modelagem e simulação da estratificação térmica na camada limite atmosférica / Matheus Foschera Schuster. – 2021.
61 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2021.
“Orientadora: Profa. Dra. Flávia Schwarz Franceschini Zinani”

1. Camada limite atmosférica. 2. Dinâmica de fluidos computacional. 3. Energia eólica. 4. Estratificação térmica. I. Título.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Silvana Dornelles Studzinski – CRB 10/2524)

AGRADECIMENTOS À CAPES

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

As simulações de escoamento do vento na camada limite atmosférica atualmente realizadas, apesar de bem desenvolvidas, muitas vezes desconsideram efeitos como as diferentes condições de estratificação térmica, com o intuito de simplificar os modelos. A estratificação térmica, porém, tem um impacto significativo nos resultados obtidos pela simulação, principalmente em locais onde há grande variação diária ou anual de temperatura. Dessa forma, esta pesquisa buscou elaborar um modelo de CFD para melhor representar o escoamento na camada limite atmosférica simulada em túnel de vento em condições de estratificação térmica. Para isso foi utilizado o software comercial ANSYS Fluent, empregando a metodologia de simulação de grandes escalas (*LES – Large Eddy Simulation*), com o modelo de submalha de Smagorinsky dinâmico, assim como a modelagem clássica da turbulência (*RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations*). A aproximação de Boussinesq foi empregada para representar a convecção natural e a Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov para introduzir os efeitos da estratificação atmosférica nos perfis verticais da velocidade e temperatura do escoamento. O modelo desenvolvido foi aplicado na simulação de escoamento sobre uma colina íngreme, e os resultados obtidos foram comparados à dados experimentais de túnel de vento encontrados por Ross et al. (2004), além de ser aplicado ao escoamento sobre o modelo reduzido de uma turbina eólica, para uma análise qualitativa dos impactos da estratificação atmosférica na velocidade e turbulência do escoamento. De forma geral o modelo se comportou bem, e foi capaz de representar os efeitos gerais induzidos pela estratificação de forma satisfatória, sendo possível identificar variações no perfil de velocidade para os diferentes casos de estratificação, além dos impactos do gradiente de temperatura na intensidade turbulenta do escoamento. Os resultados obtidos indicam que a estabilidade atmosférica é um fator importante para o escoamento na camada limite atmosférica, devendo ser levado em consideração para um melhor planejamento de parques eólicos.

Palavras-chave: energia eólica; camada limite atmosférica; estratificação térmica; dinâmica de fluidos computacional.

ABSTRACT

Simulations of wind flow in the atmospheric boundary layer currently carried out, despite being well developed, often disregard effects such as the different thermal stratification conditions, in order to simplify the models. Thermal stratification, however, has a significant impact on the results obtained by the simulation, especially in places where there is great daily or annual temperature variation. Thus, this research sought to develop a CFD model to better represent the flow in the atmospheric boundary layer simulated in a wind tunnel under thermal stratification conditions. To this end, the commercial software ANSYS Fluent was used, applying the large eddy simulation methodology (LES - Large Eddy Simulation), with the dynamic Smagorinsky sub-grid model, as well as the classical modeling of turbulence (RANS - Reynolds Averaged Navier-Stokes). The Boussinesq approximation was used to represent natural convection and the effects of atmospheric stratification in the vertical profiles of flow velocity and temperature were introduced through the Monin-Obukhov Similarity Theory. The developed model was applied in the simulation of flow over a steep hill, and the results obtained were compared to data from wind tunnel experiments found by Ross et al. (2004), in addition to being applied to the flow over the reduced model of a wind turbine, for a qualitative analysis of the impacts of atmospheric stratification on flow velocity and turbulence. In general, the model behaved well, and was able to satisfactorily represent the general effects induced by thermal stratification, being possible to identify variations in the velocity profile for the different cases of stratification, in addition to the impacts of the temperature gradient on the turbulent intensity of the flow. The results obtained indicate that atmospheric stability is an important factor for the flow in the atmospheric boundary layer, and should be taken into account for a better planning of wind farms.

Key-words: wind power; atmospheric boundary layer; thermal stratification; computational fluid dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil de velocidade de acordo com a estabilidade	18
Figura 2 – Arranjo Experimental.....	29
Figura 3 – Vistas isométrica (a), lateral (b) e superior (c) da geometria do domínio do escoamento sobre a colina.....	31
Figura 4 - Malha para o escoamento sobre a colina	32
Figura 5 - Vistas isométrica (a), frontal (b) e da turbina (c) da geometria do domínio do escoamento sobre o aerogerador	33
Figura 6 – Vistas lateral (a), frontal (b) e um corte mostrando a turbina (c) da malha para o escoamento sobre o aerogerador	34
Figura 7 - Perfis de velocidade e temperatura.....	35
Figura 8 - Contornos de velocidade (a) Neutro (b) Estável S2 e (c) Estável S1	38
Figura 9 - Contornos de vorticidade (a) Neutro (b) Estável S2 e (c) Estável S1.....	39
Figura 10 - Iso-superfícies de vorticidade (a) Neutro (b) Estável S2 e (c) Estável S1	40
Figura 11 - Perfis de velocidade no topo da colina (a) e a distâncias de 1 (b), 2 (c), 3 (d) e 4 metros (e) para o caso neutro.....	41
Figura 12 - Perfis de velocidade no topo da colina (a) e a distâncias de 1 (b), 2 (c), 3 (d) e 4 metros (e) para o caso estável S1	42
Figura 13 - Gráficos de contorno da velocidade (em m/s) para os casos neutro e estável S1.....	43
Figura 14 - Qualidade de malha	44
Figura 15 - Perfis de velocidade obtidos com diferentes malhas: (a) caso neutro, à 2 metros de distância da colina e (b) caso estável S1 no topo da colina	44
Figura 16 – Qualidade de diferentes malhas.....	45
Figura 17 - Contornos de velocidade para as modelagens LES (a) e RANS (b) para o caso neutro.....	45
Figura 18 - Contornos de vorticidade para as modelagens LES (a) e RANS (b) para o caso neutro.....	46
Figura 19 – Perfis de velocidade adimensional para os casos neutro (a) e estável S1 (b).....	47
Figura 20 - Contornos de velocidade (a) Neutro (b) Estável S1	48
Figura 21 - Evolução da esteira no escoamento neutro (a) e estável S1 (b).....	49

Figura 22 – Renderização volumétrica do Critério-Q para os casos Neutro(a) e Estável S1 (b).....	50
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos estudos de acordo com aspectos metodológicos	19
Tabela 2 - Condições de operação dos experimentos	30

LISTA DE SÍMBOLOS

$u(z)$	Velocidade de escoamento na altura z (m/s)
u_*	Velocidade de fricção (m/s)
k	Constante de Von Kármán
z	Altura com relação ao nível do solo (m)
z_0	Altura da rugosidade (m)
η_m	Eficiências mecânica do aerogerador
η_e	Eficiência elétrica do aerogerador
C_p	Coefficiente de potência do aerogerador
ρ	Massa específica (kg/m ³)
A	Área (m ²)
U	Velocidade (m/s)
κ	Energia cinética turbulenta
ε	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta
μ	Viscosidade (m ² /s)
G_κ	Geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade
G_b	Geração de energia cinética turbulenta devido a flutuabilidade
Y_M	Contribuição da dilatação flutuante na turbulência compressível
S_κ	Termos fonte para κ
S_ε	Termos fonte para ε
σ_κ	Número de Prandtl para κ
σ_ε	Número de Prandtl para ε
μ_t	Viscosidade turbulenta (m ² /s)
ϕ	Variável filtrada pelo modelo LES
G	Função de filtro de escala dos vórtices resolvidos
t	Tempo
x	Posição
\underline{u}	Vetor de velocidade filtrado
\underline{p}	Campo de pressão filtrado
σ	Tensor de tensão da viscosidade molecular
τ_{ij}	Tensor de tensão de submalha

δ	Tensor unitário
\underline{S}_{ij}	Tensor de taxa de deformação para a escala resolvida
L_s	Comprimento de mistura para escalas de submalha
C_s	Constante de Smagorinsky
Δ	Escala local da malha
T_{ij}	Tensor de tensão de filtro
ρ_0	Massa específica de referência
T_0	Temperatura de referência
β	Coefficiente de expansão térmica
L_{MO}	Comprimento de Obukhov
θ_z	Temperatura potencial na altura z
w'	Perturbação da componente vertical da velocidade
θ'	Perturbação na temperatura potencial
P_0	Pressão padrão na superfície terrestre
P	Pressão
R	Constante dos gases ideais
C_p	Calor específico a pressão constante
ξ	Parâmetro da estabilidade de Monin-Obukhov
Ψ	Fator universal adimensional de correção para a estabilidade do escoamento
TSR	Relação de velocidade de ponta de pá

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Tema	14
1.2 Problema	14
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo geral	14
1.3.2 Objetivos específicos	14
1.4 Justificativa	15
1.5 Estrutura do trabalho	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Camada limite atmosférica (CLA)	16
2.1.1 Estratificação térmica da CLA	17
2.2 Conversão de energia eólica	18
2.3 Revisão do estado da arte	19
2.4 Modelagem da turbulência	20
2.4.1 RANS - Navier-Stokes com média de Reynolds	21
2.4.2 LES – Simulação de Grandes Escalas	22
2.5 Aproximação de Boussinesq	26
2.6 Teoria da similaridade de Monin-Obukhov	26
3 METODOLOGIA	29
3.1 Modelos físicos	29
3.1.1 Modelo físico para validação - escoamento sobre uma colina	29
3.1.2 Modelo físico para o estudo de caso - escoamento sobre uma turbina eólica	32
3.2 Modelagem matemática	34
3.3 Modelagem numérica	35
3.3.1 <i>Setup</i> - escoamento sobre uma colina	36
3.3.1 <i>Setup</i> - escoamento sobre uma turbina eólica	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Escoamento em túnel de vento sobre uma colina	38
4.1.1 Efeitos térmicos	38
4.1.2 Estudo de malha	43
4.1.3 Comparação entre resultados LES e RANS	45
4.2 Escoamento em túnel de vento sobre uma turbina	47

5 CONCLUSÕES	51
REFERÊNCIAS.....	53
APÊNDICE A – UDF CASO NEUTRO	56
APÊNDICE B – UDF CASO ESTÁVEL S1	57
APÊNDICE C – UDF CASO ESTÁVEL S2	59

1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes renováveis de energia tem aumentado em todo o mundo à medida que os países adotam uma matriz energética mais limpa e sustentável, sendo a energia eólica uma das principais fontes renováveis utilizadas em grandes usinas geradoras. No Brasil, apesar da matriz energética já contar com grande participação de renováveis devido à geração hidrelétrica, o potencial eólico vem sendo cada vez mais aproveitado. De acordo com o Balanço Energético Nacional (EPE, 2020), a produção de eletricidade a partir da fonte eólica alcançou 55.986 GWh no ano de 2019, equivalente a um aumento de 15,5% em relação ao ano anterior. A potência instalada de geração eólica expandiu 6,9%, chegando à 15,4 GW instalados.

A inserção de fontes renováveis na matriz energética, porém, é dificultada pela sazonalidade, ou seja, a geração acontece somente nos momentos de disponibilidade da fonte. No caso da energia eólica, a geração depende do regime de ventos, que não é constante e varia em ciclos diários e sazonais. A baixa previsibilidade de fontes renováveis prejudica a confiabilidade no suprimento de energia. Pensando nisso, o planejamento do parque eólico é necessário para decidir os melhores equipamentos, locais de implantação e parâmetros operacionais, evitando perdas econômicas e problemas de infraestrutura, além de garantir a confiabilidade no fornecimento de energia.

A avaliação da produção de energia em um parque eólico depende de medições anemométricas do local, seguida de análise e tratamento dos dados, com a intenção de quantificar o recurso eólico de longo prazo no local analisado (Barriatto, 2018). Modelos devem ser desenvolvidos para extrapolar esses dados e, juntamente com as características técnicas de aerogeradores, realizar simulações para a avaliação da produção de energia de um parque eólico, permitindo análises de diferentes configurações e parâmetros de operação. Para este fim, a Dinâmica de Fluidos Computacional, ou Fluidodinâmica Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) é uma ferramenta importante para analisar as condições do local, o projeto do parque eólico e a produção de energia das turbinas eólicas. Por meio da modelagem e simulação do escoamento de vento em um parque eólico é possível realizar-se uma avaliação prévia das características de funcionamento e produção de energia de aerogeradores, além da análise e determinação dos melhores parâmetros de operação.

1.1 Tema

Fluidodinâmica Computacional (CFD) aplicada à análise de escoamento do ar na camada limite atmosférica e previsão de desempenho de turbinas eólicas.

1.2 Problema

Como a estratificação térmica pode ser modelada para simulação de escoamento na Camada Limite Atmosférica e como esse fator influencia a previsão de desempenho de turbinas eólicas?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral implementar, validar e aplicar um modelo para a estratificação térmica da camada limite atmosférica em um código de fluidodinâmica computacional.

1.3.2 Objetivos específicos

Visando cumprir o objetivo geral deste trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar uma análise bibliométrica e estabelecer o estado da arte em simulações da camada limite atmosférica com estratificação térmica, com foco em aproveitamento de energia eólica;
- b) Desenvolver um modelo computacional para a simulação numérica do escoamento na camada limite atmosférica em condições de estabilidade térmica, e validar o modelo desenvolvido por meio de comparações com dados de experimentos;
- c) Investigar qualitativamente os efeitos da estratificação térmica da camada limite atmosférica na esteira de uma turbina eólica.

1.4 Justificativa

As simulações atualmente realizadas, apesar de bem desenvolvidas, ainda desconsideram efeitos menores, como as diferentes condições de estratificação térmica da atmosfera, com o intuito de simplificar os modelos, utilizando um menor poder computacional. Diferentes estudos, entretanto, sugerem que essas considerações têm um impacto significativo nos resultados obtidos pela simulação, principalmente em locais onde há grande variação diária ou anual de temperatura (ALINOT e MASSON, 2002).

Com o maior poder de processamento dos computadores atuais, e na busca por maior confiabilidade, as simulações do tipo CFD vêm sendo aprimoradas com o desenvolvimento de modelos mais robustos, capazes de representar o fenômeno de forma cada vez mais realista, fornecendo dados mais precisos para o planejamento do parque eólico. Assim, este trabalho visa analisar o estado da arte em simulações de escoamento na camada limite atmosférica, considerando os efeitos da estratificação térmica, e assim elaborar um modelo de CFD para investigar os impactos deste fator no escoamento de vento.

1.5 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. Este primeiro capítulo foi uma introdução ao tema da pesquisa. No Capítulo 2 será apresentada a fundamentação teórica dos principais conceitos aplicados, além dos principais resultados de uma revisão sistemática, apresentada no formato de artigo, e publicada nos anais do 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas (ENCIT) (Schuster et al., 2020), que serviu como uma revisão do estado da arte, e norteou o desenvolvimento do modelo. A metodologia aplicada é apresentada no Capítulo 3, que traz as modelagens física, matemática e numérica empregadas nas simulações desenvolvidas. No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos. A conclusão e considerações finais são apresentadas no Capítulo 5.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente estudo tem interesse na modelagem CFD do escoamento de vento na camada limite atmosférica, considerando os efeitos da estratificação térmica. Assim, este capítulo traz o detalhamento dos conceitos de camada limite atmosférica, estratificação térmica e conversão de energia do vento, além do equacionamento utilizado na modelagem CFD. Ainda, é apresentada uma revisão do estado da arte em simulações CFD da camada limite atmosférica estratificada, elaborada a partir de um artigo de revisão sistemática publicado nos anais do 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas (ENCIT) (Schuster et al., 2020).

2.1 Camada limite atmosférica (CLA)

A Camada Limite Atmosférica (CLA) se forma na região mais próxima do solo, com espessura variável, de acordo com condições meteorológicas, podendo variar de 100 à 3000 m acima da superfície, e é nela que os efeitos como a transferência de energia mecânica e térmica acontecem. O atrito gerado pela interação do vento com o solo e outros obstáculos acaba desacelerando o escoamento, além de aumentar a intensidade da turbulência, e o perfil vertical da velocidade do vento, na CLA, tem comportamento logarítmico, de acordo com a Equação 2.1:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right] \quad (2.1)$$

em que $u(z)$ é a velocidade do vento, u_* a velocidade de fricção, k a constante de Von Kármán (≈ 0.4), z a altura com relação ao nível do solo e z_0 a altura da rugosidade, relacionada ao tamanho e distribuição dos elementos superficiais como vegetação e construções.

Este perfil vertical desconsidera, porém, efeitos térmicos que podem interferir no escoamento do vento, comuns em altitudes mais baixas, de até 100 m, que são relevantes ao setor eólico.

2.1.1 Estratificação térmica da CLA

A radiação solar é responsável pelas trocas térmicas entre a superfície terrestre e a CLA. Parcelas da radiação emitida pelo sol atravessam a atmosfera, sendo absorvidas pela superfície terrestre e reemitidas em um novo comprimento de onda, ficando retidas na atmosfera. Essas interações estão relacionadas ao ciclo diário, e sua intensidade depende de condições meteorológicas, como a presença de nuvens, inclinação solar e irradiância.

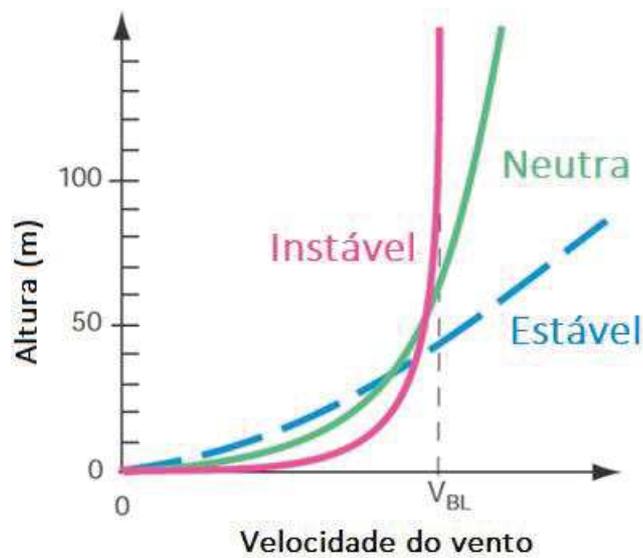
Durante o dia, a interação térmica entre a superfície terrestre e a CLA é responsável por uma convecção natural, normalmente intensa, levando à uma mistura vertical no escoamento, desde a superfície até alturas que variam de 1 a 2 km (Barriatto, 2018). O empuxo gerado é responsável pela amplificação da instabilidade térmica e consequente aumento da intensidade de turbulência no escoamento.

Em períodos noturnos, quando não há trocas térmicas entre o solo e a CLA, observa-se uma configuração estável, onde o perfil vertical da temperatura é estratificado, com uma camada de ar frio mais próxima do solo e uma camada de ar quente acima desta. Essa estratificação é responsável por uma diminuição nas forças de empuxo, que consequentemente levam à uma redução na intensidade da turbulência do escoamento.

Essas variações diárias, além de impactarem na turbulência, interferem no perfil vertical da velocidade do escoamento, conforme ilustra a Figura 1. Em condições neutras o perfil vertical da velocidade é aproximadamente logarítmico, sendo aproximadamente igual a zero perto da superfície, devido ao atrito. Em condições instáveis, a intensidade de turbulência é suficiente para misturar o escoamento, fazendo com que a velocidade do vento aumente rapidamente com a altura. Em condições estáveis, por outro lado, os níveis baixos de turbulência levam a uma menor mistura no escoamento, aumentando o cisalhamento do vento e levando a uma recuperação mais lenta da velocidade.

Como a energia gerada por uma turbina eólica está diretamente relacionada à velocidade do vento, a modelagem da estratificação térmica da camada limite atmosférica é crucial para estimativas eficazes de geração de energia. Ainda, variações na intensidade de turbulência do escoamento afetam na esteira formada a jusante de aerogeradores, o que pode afetar a distribuição de torres em um parque eólico.

Figura 1 - Perfil de velocidade de acordo com a estabilidade



Adaptado de Koblitz (2013)

2.2 Conversão de energia eólica

Atualmente a principal aplicabilidade da energia eólica está na conversão da energia cinética proveniente do escoamento do vento em energia elétrica por meio de aerogeradores. Apesar da grande variedade de modelos de turbinas para geração eólica, a maioria dos aerogeradores é composta por rotores de eixo vertical, com três pás. A energia gerada por uma turbina eólica está relacionada não só a características meteorológicas, mas também a características mecânicas do aerogerador, e a sua potência pode ser definida de acordo com a Equação 2.2:

$$P = \frac{1}{2} \eta_m \eta_e C_p \rho A U^3 \quad (2.2)$$

onde η_m e η_e são as eficiências mecânica e elétrica do aerogerador, C_p é o coeficiente de potência, ρ a massa específica do ar, A a área varrida pelo rotor da turbina e U a velocidade de escoamento do vento.

Baseando-se no princípio de conservação de massa, Betz (1919) determinou a potência máxima que pode ser extraída por um aerogerador, de acordo com a área varrida pelas pás da turbina e a energia cinética do vento incidente, chegando à conclusão de que a energia gerada por uma turbina eólica será, no máximo, de 59,3%

da energia eólica disponível. Assim, o coeficiente de potência de uma turbina será sempre menor que 0,593.

2.3 Revisão do estado da arte

O estado da arte na modelagem da camada limite atmosférica considerando os efeitos da estratificação atmosférica para fins de geração eólica foi estabelecido a partir de uma revisão sistemática publicada no formato de artigo nos anais do 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas (ENCIT) (Schuster et al., 2020). A revisão utilizou a base de dados Scopus/Elsevier, considerando estudos experimentais e computacionais relevantes ao assunto.

Mesmo que a maioria dos estudos analisados tenha se utilizado de dados experimentais para a validação de modelos e análise de resultados, o foco da grande maioria dos trabalhos era o desenvolvimento de modelos computacionais para o escoamento na CLA, como pode ser visto na Tabela 1, sendo as modelagens de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS) e de simulação de grandes escalas (LES) as mais utilizadas. Isso destaca a dificuldade de desenvolver estudos experimentais de turbinas eólicas, e reforça a importância do desenvolvimento de modelos robustos, para maior precisão dos resultados obtidos..

Tabela 1 - Características dos estudos de acordo com aspectos metodológicos

EXPERIMENTAL	11%
COMPUTACIONAL	89%
<i>RANS</i>	<i>44%</i>
<i>LES</i>	<i>38%</i>
<i>DNS</i>	<i>6%</i>
<i>Não identificado</i>	<i>12%</i>

Dentre os trabalhos com metodologia computacional de alta fidelidade, todos utilizaram a aproximação de Boussinesq e a teoria da similaridade de Monin-Obukhov para a modelagem da estratificação térmica da camada limite atmosférica, e julgaram os resultados obtidos como satisfatórios e qualitativamente corretos.

Os estudos relataram que a modelagem levou à uma melhora significativa na exatidão dos resultados obtidos, além de identificarem que uma variação máxima de aproximadamente 7% na energia gerada pode ser atribuída à estratificação térmica (ALINOT e MASSON, 2002). Existe um potencial significativo a ser convertido em

períodos de instabilidade, às custas de projetar aerogeradores capazes de se adaptar às maiores variações desses períodos. Por outro lado, os períodos estáveis fornecem menos potência, mas são mais constantes ao longo do tempo (SHARMA et al., 2016).

Ainda, foi constatada uma influência significativa da condição atmosférica no comportamento da esteira que se forma a jusante de turbinas eólicas, podendo levar a perdas consideráveis, uma vez que levam a uma maior turbulência percebida por turbinas posicionadas atrás de outras em parques eólicos (ICHENIAL et al., 2019) e EL-ASKARY et al., 2017). Períodos com estratificação estável levam à uma atenuação das flutuações de velocidade e escoamento no sentido do escoamento tornando a recuperação da esteira mais lenta, enquanto que períodos instáveis aumentam tais flutuações, levando à uma mistura turbulenta do escoamento, acelerando a recuperação da esteira (OHYA e UCHIDA, 2008 e SIDDIQUI et al., 2017).

2.4 Modelagem da turbulência

O escoamento turbulento é caracterizado por uma variedade de estruturas, com diferentes escalas de comprimento e tempo. Assim, para a modelagem do escoamento de vento em um parque eólico, se faz necessária uma técnica capaz de resolver diferentes escalas do escoamento, e não apenas modelá-los. Isso não é só de interesse acadêmico, mas também tem relevância para a indústria, que requer conhecimento detalhado sobre o desempenho das turbinas eólicas pós-implantação, quando não operam em condições de projeto, como é o caso da estratificação atmosférica (Mehta et al., 2014).

A solução numérica direta (DNS) resolve todo o espectro de escalas de turbulência, sem a necessidade de modelagem. Porém essa abordagem não é viável para problemas práticos envolvendo escoamentos com um número de Reynolds alto, como é o caso do escoamento em um parque eólico. O modelo Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS), por outro lado, modela todas as escalas de turbulência, fornecendo soluções aproximadas com médias de tempo para as equações de Navier-Stokes, reduzindo consideravelmente o custo computacional da simulação. Porém esta metodologia tem dificuldade para representar corretamente o escoamento submetido a forças de campo e não representa corretamente picos e transientes.

Como alternativa, a modelagem LES resolve diretamente as equações fundamentais do escoamento para as grandes estruturas da turbulência, onde há o

transporte de energia, enquanto os vórtices de menor escala, que são afetados pela viscosidade e possuem um comportamento mais universal, são modelados.

2.4.1 RANS - Navier-Stokes com média de Reynolds

As equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS - *Reynolds-averaged Navier–Stokes*) são utilizadas como modelo de transporte das quantidades médias no tempo do escoamento. As flutuações das variáveis como velocidade, pressão e temperatura são modeladas pelo tensor de Reynolds e equações de fechamento. A modelagem baseada em RANS, portanto, reduz muito o esforço e os recursos computacionais necessários e é amplamente adotada em aplicações de engenharia (ANSYS, 2009a).

Os modelos de fechamento mais simples são os modelos de duas equações, nos quais a solução de duas equações de transporte separadas permite que as escalas de velocidade e de comprimento da turbulência sejam determinadas de forma independente. O modelo κ - ε padrão, no ANSYS FLUENT, se enquadra nesta classe de modelos, sendo semi-empírico e baseando-se em equações de transporte para a energia cinética da turbulência (κ) e sua taxa de dissipação (ε). Na derivação do modelo κ - ε , a suposição é que o escoamento é totalmente turbulento e os efeitos da viscosidade molecular são desprezíveis, sendo assim válido apenas para escoamentos plenamente turbulentos.

A energia cinética da turbulência, κ , e sua taxa de dissipação, ε , são obtidas a partir das Equações 2.3 e 2.4, respectivamente:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_\kappa \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + S_\varepsilon \quad (2.4)$$

onde G_κ representa a geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade média, G_b é a geração de energia cinética turbulenta devido a flutuabilidade, Y_M representa a contribuição da dilatação flutuante na turbulência compressível para a taxa de dissipação geral, S_κ e S_ε são termos fonte determinados pelo usuário, σ_κ e σ_ε são os números de Prandtl para κ e ε , com valores de 1,0 e 1,3,

respectivamente, e $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ são constantes do modelo, determinadas a partir de experimentos, com valores de 1,44, 1,92 e 0,09, respectivamente.

A viscosidade turbulenta, μ_t , é calculada por meio de uma combinação de κ e ε , de acordo com a Equação 2.5:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

onde C_μ é uma constante.

2.4.2 LES – Simulação de Grandes Escalas

A modelagem LES fica entre as modelagens DNS e RANS em termos da fração das escalas resolvidas, permitindo que se utilize uma malha mais grosseira e passos de tempo maiores do que no DNS, reduzindo o número de graus de liberdade, ao mesmo tempo que requer malhas substancialmente mais refinadas do que aquelas normalmente utilizadas para cálculos RANS reduzindo o erro introduzido pela modelagem da turbulência.

As equações governantes empregadas pelo software ANSYS Fluent na modelagem LES são obtidas aplicando-se um filtro espacial nas equações de Navier-Stokes (ANSYS, 2009a). Esse processo filtra os vórtices cujas escalas são menores do que a largura do filtro ou dos elementos da malha utilizada nos cálculos, e as equações resultantes governam, portanto, a dinâmica de grandes vórtices.

Uma variável filtrada é definida de acordo com a Equação 2.6:

$$\underline{\phi}(x) = \int_D \phi(x') G(x, x') dx' \quad (2.6)$$

onde $\underline{\phi}$ é a variável filtrada, D representa o domínio do filtro e G é a função de filtro que determina a escala dos vórtices resolvidos.

Filtrando as equações de Navier-Stokes, obtém-se as Equações 2.7 e 2.8, para fluidos incompressíveis:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \underline{u}_i) = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \underline{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \underline{u}_i \underline{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sigma_{ij} - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \right) \quad (2.8)$$

onde ρ é a massa específica do fluido, t é o tempo, x é a posição, \underline{u} é o vetor velocidade do escoamento após a aplicação do filtro, p é o campo de pressão filtrado, σ é o tensor de tensão devido à viscosidade molecular, definido pela Equação 2.9, e τ é o tensor de tensão submalha definido pela Equação 2.10:

$$\sigma_{ij} \equiv \left[\mu \left(\frac{\partial \underline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \underline{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \underline{u}_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (2.9)$$

$$\tau_{ij} \equiv \rho \underline{u}_i \underline{u}_j - \rho \underline{u}_i \underline{u}_j \quad (2.10)$$

onde μ é a viscosidade do fluido e δ é o tensor unitário.

Para resolver as tensões em escala de submalha, resultantes da operação de filtragem, emprega-se uma modelagem baseada na hipótese de Boussinesq, que considera que as flutuações turbulentas têm um efeito dissipativo no escoamento médio, e que esse efeito pode ser modelado por um termo de viscosidade turbulenta, por meio da Equação 2.11:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \underline{S}_{ij} \quad (2.11)$$

onde μ_t representa a viscosidade turbulenta da escala de submalha. A parte isentrópica da tensão de submalha, τ_{kk} , ao invés de modelada é adicionada ao termo filtrado da pressão estática. \underline{S}_{ij} é o tensor de taxa de deformação para a escala resolvida, definido pela Equação 2.12:

$$\underline{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \underline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \underline{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.12)$$

Os modelos usuais para a viscosidade turbulenta, μ_t são: o modelo Smagorinsky-Lilly, o modelo Smagorinsky-Lilly dinâmico, o modelo WALE e o modelo dinâmico de energia cinética em escala de submalha. Neste trabalho foi utilizado o modelo Smagorinsky-Lilly dinâmico.

O modelo de Smagorinsky-Lilly foi o primeiro a ser desenvolvido, e se baseia na ideia de que a energia produzida em escalas resolvidas é igual a energia dissipada em escalas não resolvidas ou pequenas. Neste modelo, a viscosidade turbulenta do vórtice está relacionada ao tamanho do filtro de malha e à taxa de deformação, de acordo com a Equação 2.13:

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\underline{S}| \quad (2.13)$$

onde L_s é o comprimento de mistura para escalas de submalha. A escala de velocidade é proporcional à magnitude do tensor de taxa de deformação filtrado, conforme a Equação 2.14:

$$|\underline{S}| = \sqrt{2\underline{S}_{ij}\underline{S}_{ij}} \quad (2.14)$$

O comprimento de mistura para as escalas de submalha é calculado por meio da Equação 2.15:

$$L_s = \text{mín}(kd, C_s\Delta) \quad (2.15)$$

onde k é a constante de von Kármán, d é a distância da parede mais próxima, C_s é a constante de Smagorinsky e Δ é a escala local da malha, correspondendo à raiz cúbica do volume do elemento de malha.

A constante de Smagorinsky, C_s , não é um valor universal, podendo tomar diferentes valores para diferentes parâmetros de escoamento, o que é o grande problema deste modelo. Germano et al. (1991) desenvolveram um procedimento no qual a constante do modelo de Smagorinsky é computada dinamicamente, baseada na informação fornecida pelas escalas de movimento resolvidas.

Este modelo aplica um segundo filtro às equações de movimento, com um novo tamanho de duas vezes o tamanho do filtro de malha ($\hat{\Delta} = 2\Delta$). Ambos os filtros produzem um campo de escoamento resolvido, sendo a diferença entre os dois campos resolvidos a contribuição das pequenas escalas cujo tamanho está entre o filtro de malha e o filtro de teste. As informações relacionadas a essas escalas são utilizadas para calcular a constante do modelo.

No campo do filtro de teste, o tensor de estresse SGS pode ser expresso pela Equação 2.16:

$$T_{ij} = \underline{\underline{\rho \widehat{u}_i \widehat{u}_j}} - \left(\frac{\underline{\underline{\rho \widehat{u}_i \widehat{u}_j}}}{\underline{\underline{\hat{\rho}}}} \right) \quad (2.16)$$

Tanto o tensor de tensão na escala de malha, τ_{ij} , quanto na escala do filtro de teste, T_{ij} , são modelados da mesma forma que no modelo Smagorinsky-Lilly, de acordo com as Equações 2.17 e 2.18, respectivamente:

$$\tau_{ij} = -2C \underline{\underline{\rho}} \Delta^2 |\tilde{S}| \left(\tilde{S}_{ij} - \frac{1}{3} \tilde{S}_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (2.17)$$

$$T_{ij} = -2C \underline{\underline{\hat{\rho}}} \hat{\Delta}^2 |\widehat{S}| \left(\widehat{S}_{ij} - \frac{1}{3} \widehat{S}_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (2.18)$$

Nas Equações 2.17 e 2.18, o coeficiente C é considerado o mesmo e independente do processo de filtragem. Os tensores de tensão para os dois casos estão relacionados pela identidade de Germano et al. (1991), conforme a Equação 2.19:

$$L_{ij} = T_{ij} - \widehat{\tau}_{ij} = \underline{\underline{\rho \widehat{u}_i \widehat{u}_j}} - \frac{1}{\underline{\underline{\hat{\rho}}}} \left(\underline{\underline{\rho \widehat{u}_i \widehat{u}_j}} \right) \quad (2.19)$$

onde L_{ij} pode ser interpretado como a tensão associada à menor escala de vórtice resolvida entre a escala do filtro de teste e a escala do filtro de malha.

Assumindo-se que C_s não muda significativamente do filtro de malha para o filtro de teste, o erro gerado é expresso pela Equação 2.20:

$$E_{ij} = L_{ij} - \frac{\delta_{ij}}{3} L_{kk} - \underline{\underline{C_s}} M_{ij}; \quad M_{ij} = -2 \left(\underline{\underline{\Delta}}^2 \underline{\underline{\hat{\rho}}} |\widehat{S}| \widehat{S}_{ij} - \Delta^2 \underline{\underline{\rho}} |\tilde{S}| \tilde{S}_{ij} \right) \quad (2.20)$$

O coeficiente C_s , é obtido buscando-se um valor para $\underline{\underline{C_s}}$ que minimize o erro. Assim, aplicando-se a derivada parcial de segunda ordem do erro em relação à $\underline{\underline{C_s}}$, e igualando-a à zero, têm-se:

$$C = \frac{(L_{ij} - \frac{L_{kk}\delta_{ij}}{3})}{M_{ij}M_{ij}} \quad (2.21)$$

$$C_s = \sqrt{C} \quad (2.22)$$

A constante de Smagorinsky C_s obtida usando este modelo dinâmico varia ao longo do tempo e espaço, em uma faixa significativamente ampla de valores. Para evitar instabilidades numéricas, tanto o numerador quanto o denominador da equação 2.21 são calculados localmente, utilizando o filtro de teste.

2.5 Aproximação de Boussinesq

A aproximação de Boussinesq é utilizada na fluidodinâmica para representar a convecção natural em escoamentos onde o fluido apresenta variações de temperatura. Este modelo trata a massa específica como um valor constante em todas as equações resolvidas, exceto para o termo de forças de corpo, o qual cria o empuxo na equação de movimento, conforme a Equação 2.23.

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g \quad (2.23)$$

onde ρ_0 é a massa específica de referência do escoamento, T_0 é a temperatura de referência e β é o coeficiente de expansão térmica.

2.6 Teoria da similaridade de Monin-Obukhov

Monin e Obukhov (1954) propuseram a teoria da similaridade, baseada no comprimento de Obukhov, que descreve os efeitos do empuxo em escoamentos turbulentos na região mais baixa da camada limite atmosférica, próximo à superfície terrestre.

O comprimento de Obukhov (L_{MO}) é definido pela Equação 2.24:

$$L_{MO} = -\frac{u_*^3 \theta_z}{kg(\overline{w'\theta'})_s} \quad (2.24)$$

onde u_* é a velocidade de fricção, θ_z é a temperatura potencial na altura de medição e $(w'\theta')_s$ é o fluxo superficial da temperatura potencial, onde w' é uma perturbação da componente vertical da velocidade e θ' é uma perturbação na temperatura potencial.

A temperatura potencial é dada pela Equação 2.25, onde P_0 é a pressão padrão na superfície terrestre, P é a pressão, R é a constante dos gases ideais e C_p é o calor específico a pressão constante.

$$\theta = T \frac{P_0 \frac{R}{C_p}}{P} \quad (2.25)$$

Através do comprimento de Obukhov, pode-se definir o parâmetro da estabilidade de Monin-Obukhov (ξ), de acordo com a Equação 2.26, onde z é a altura, em relação ao nível do solo. Para valores de ξ maiores que zero, a camada limite atmosférica é considerada estável; quando ξ é igual à zero a camada limite atmosférica é considerada neutra; e para valores de ξ acima de zero a camada limite atmosférica é instável.

$$\xi = \frac{z}{L_{MO}} \quad (2.26)$$

Levando-se em consideração a estratificação térmica, os perfis de velocidade do vento e da temperatura potencial incorporam o parâmetro de estabilidade, de acordo com as Equações 2.27 e 2.28:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \Psi \left(\frac{z}{L_{MO}} \right) \right] \quad (2.27)$$

$$\theta(z) = \theta(z_0) + \frac{\theta_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \Psi \left(\frac{z}{L_{MO}} \right) \right] \quad (2.28)$$

onde z_0 representa o comprimento efetivo da rugosidade, e Ψ é o fator universal adimensional de correção para a estabilidade do escoamento, cujo valor será baseado nas relações de Dyer (1974), que aplicou um ajuste nas Equações 2.27 e 2.28 a partir de dados experimentais.

Para a camada limite atmosférica neutra, considera-se $\Psi\left(\frac{z}{L_{MO}}\right) = 0$. Para períodos estáveis, utiliza-se a Equação 2.29.

$$\Psi\left(\frac{z}{L_{MO}}\right) = \left(\frac{4,7z}{L_{MO}}\right) \quad (2.29)$$

3 METODOLOGIA

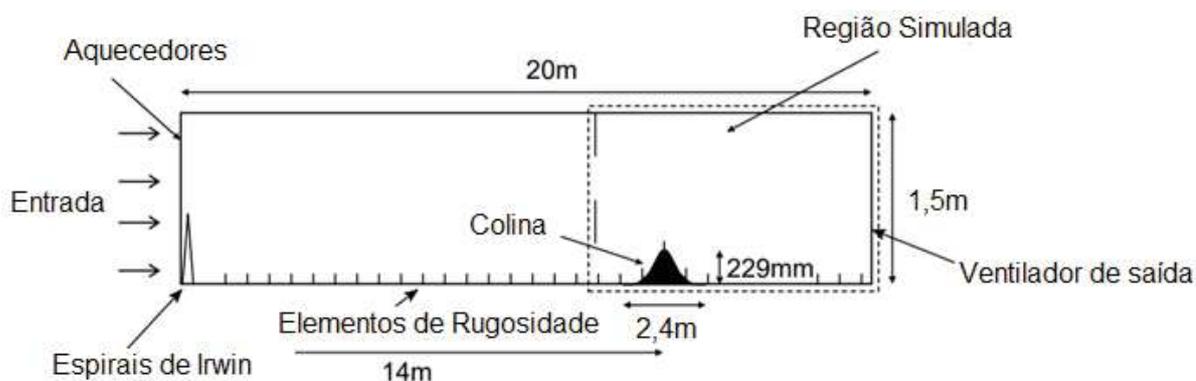
A seguir são descritos os modelos físicos, matemáticos e numéricos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

3.1 Modelos físicos

3.1.1 Modelo físico para validação - escoamento sobre uma colina

Para validação do modelo proposto neste trabalho foram utilizados dados experimentais de túnel de vento obtidos por Ross et al. (2004). Os autores investigaram os efeitos da estratificação térmica na camada limite atmosférica por meio de experimentos em um túnel de vento capaz de representar variações de temperatura, localizado no Laboratório de Pesquisa de Escoamento Ambiental (EnFlo), da Universidade de Surrey, no Reino Unido. Um arranjo do experimento pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Arranjo Experimental



Fonte: Adaptado de Ross et al. (2004)

Um escoamento com incremento linear no perfil de temperatura foi criado por meio de aquecimento do fluxo de ar na entrada do túnel de vento, além de resfriamento do piso na seção de teste, cobrindo uma faixa de estabilidade que vai de neutra à fortemente estável. Assim, foram realizados experimentos considerando escoamento neutro e dois casos de escoamento com estratificação estável, sendo um (S1) com estratificação relativamente fraca, de 10 K/m até uma altura de 0,5 m e uma estratificação mais forte, de 40 K/m acima desta altura, e outro caso (S2) com

estratificação mais forte, de 50 K/m até uma altura de 0,3 m, e uma estratificação mais fraca, de 6 K/m acima desta altura.

O túnel de vento conta com 20 m de comprimento, 1,5 m de altura e 3,5 m de largura, com uma colina posicionada no chão, à uma distância de 14 m da entrada. Essa colina tem sua forma de acordo com a Equação 3.1, onde y representa a altura local, x é a distância do centro da colina, h é a altura máxima da colina, que corresponde à 0,229 m e c é o comprimento da colina, que é de 1 m.

$$y = h \cos^2(\pi x/c) \quad -c/2 < x < c/2 \quad (3.1)$$

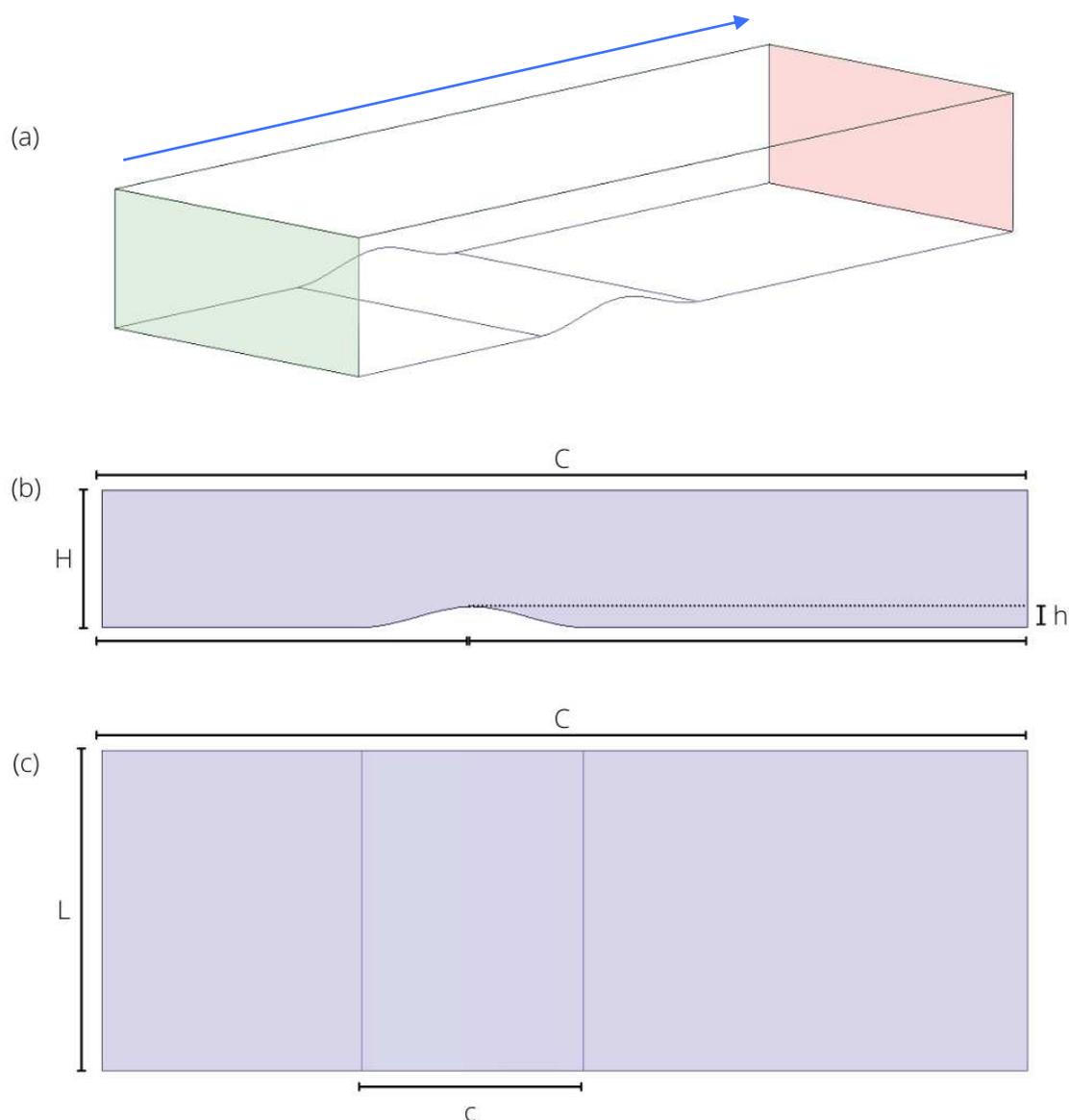
A Tabela 2 traz as condições de operação dos experimentos realizados obtidos a partir de ajustes dos valores medidos, na ausência da colina, onde U_∞ é a velocidade do escoamento, θ_* representa a escala de temperatura, θ_s é a temperatura potencial no solo, u_* é a velocidade de fricção e L_{MO} é o comprimento de Obukhov. Nos diferentes casos, a rugosidade da superfície (z_0), gerada pela disposição de correntes perpendicularmente ao escoamento ao longo da seção de teste, tem um tamanho de $0,55 \cdot 10^{-3}$ m.

Tabela 2 - Condições de operação dos experimentos

Caso	N1	S1	S2
$U_\infty (ms^{-1})$	2,5	1	1,3
$\theta_* (K)$	0	0,12	1,05
$\theta_s (K)$	-	300,5	298,2
u_*	0,165	0,064	0,056
$L_{MO} (m)$	∞	2,60	0,22
Estabilidade	Neutro	Estável	Estável

A Figura 3 traz uma vista isométrica (a), lateral (b) e superior (c) da geometria utilizada para as simulações, representando os 10 m finais da sessão de testes do túnel de vento. Foi utilizado o método de plano de simetria paralelo ao escoamento, de forma que foi simulado apenas metade do túnel de vento. Assim, a geometria simulada tem uma dimensão de 10 m de comprimento (C), 1,75 m de largura (L) e 1,5 m de altura (H), estando o centro da colina posicionado a 4 m da entrada e 6 m da saída do túnel. O perfil da colina foi construído de acordo com a Equação 3.1, sendo o comprimento da colina (c) de 1 m e a altura da colina (h) 0,229 m.

Figura 3 – Vistas isométrica (a), lateral (b) e superior (c) da geometria do domínio do escoamento sobre a colina

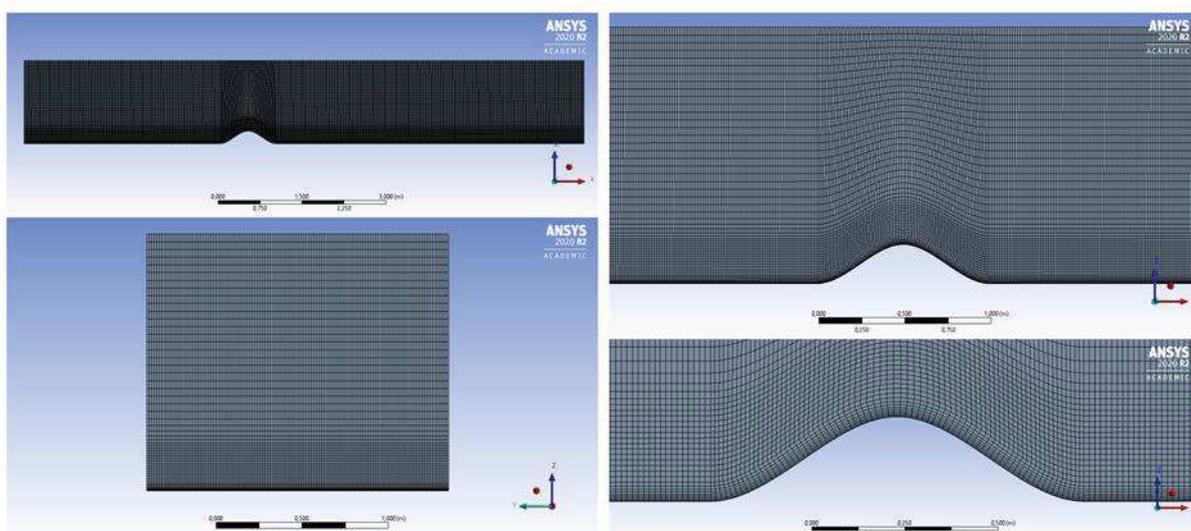


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Diferentes configurações de malha foram testadas para aprimorar os resultados das simulações, porém a malha final foi elaborada com a utilização de uma camada de prismas (*inflation*) no chão da geometria, para captar os efeitos da rugosidade do solo. Foi utilizado o método de altura da primeira camada, com $2 \cdot 10^{-3}$ m de altura, 10 camadas e uma taxa de crescimento de 1,2. Ainda, foi utilizado um dimensionamento por corpo de influência na região mais baixa da geometria (0 até 0,3 m), para captar o escoamento na zona de interesse, com o tamanho de elemento de $1,5 \cdot 10^{-2}$ m e uma taxa de crescimento de 1,01. Um outro dimensionamento foi utilizado na geometria

inteira para limitar o tamanho dos elementos à $4,5 \cdot 10^{-2}$ m e a taxa de crescimento à 1,01. A malha utilizada para as simulações é composta por 4.270.968 elementos, e pode ser vista na Figura 4 em vistas lateral e frontal, além de aproximações detalhando a malha na região da colina.

Figura 4 - Malha para o escoamento sobre a colina



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

3.1.2 Modelo físico para o estudo de caso - escoamento sobre uma turbina eólica

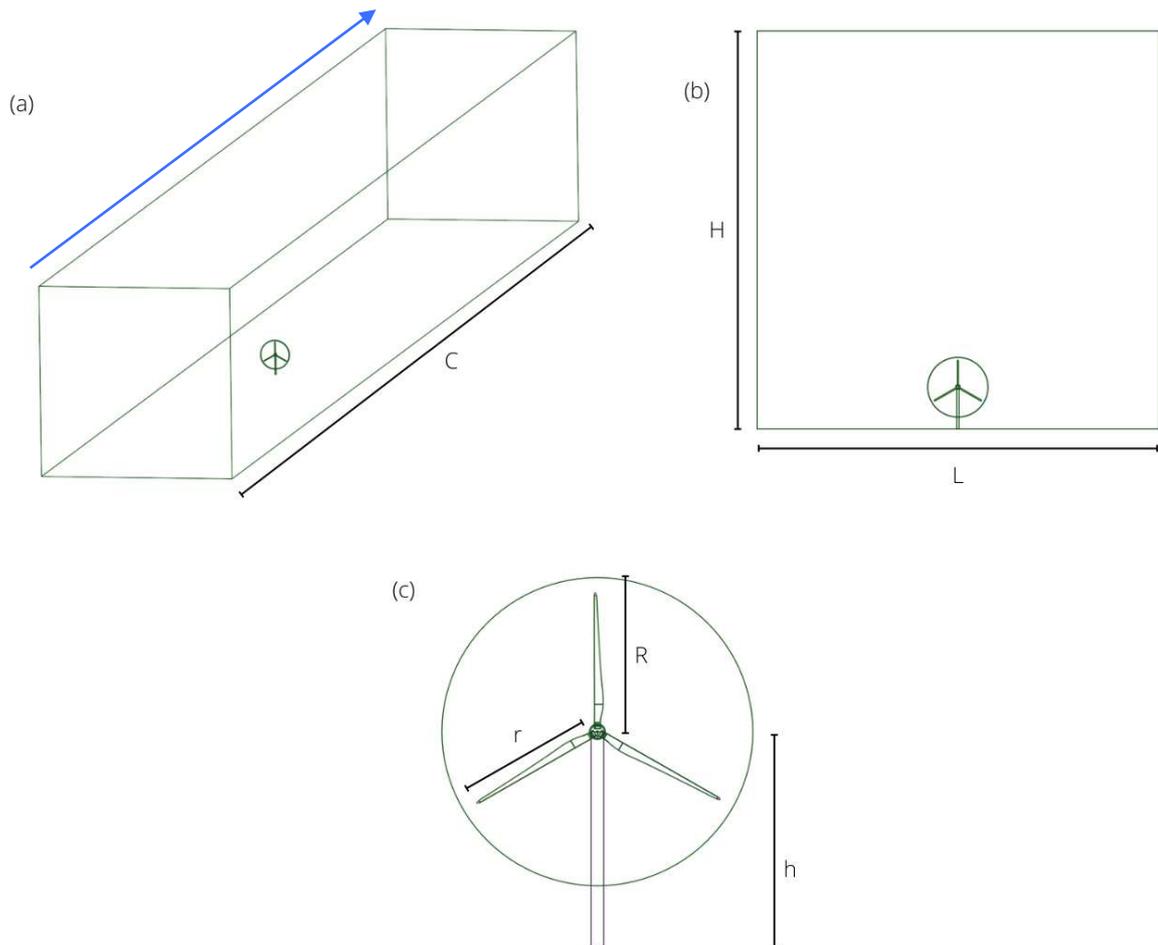
Após a etapa de validação, o modelo foi aplicado na análise de desempenho de uma turbina eólica, com a utilização de geometria e características de um modelo convencional de turbina eólica de eixo horizontal, em escala laboratorial, para simular o impacto da consideração de estratificação térmica no desenvolvimento e recuperação da esteira a jusante da turbina.

O domínio utilizado representa, novamente, um túnel de vento, com seção de entrada de 1 m de largura (L) por 1 m de altura (H), e um comprimento de 10 m (C), sendo 4 m à barlavento e 6 m à sotavento da turbina. Foi utilizada a geometria de uma turbina eólica comercial com pás de 66 m, em uma escala de 1:1000, condizente com a escala do modelo desenvolvido. Assim, a turbina tem um raio (r) de aproximadamente $6,6 \cdot 10^{-2}$ m e tem seu eixo a uma altura (h) de $10,5 \cdot 10^{-2}$ m do chão.

O domínio foi dividido em duas regiões, uma em formato de disco, envolvendo o rotor da turbina com um raio (R) de $7,5 \cdot 10^{-2}$ m e espessura de $9 \cdot 10^{-3}$ m, e outra

compreendendo o restante do túnel, com comprimento (C) de 10 m, altura (H) de 1 m e largura (L) também de 1 m, onde foi subtraída a região de disco. Vistas isométrica (a), frontal (b) da geometria final, com todas as regiões, além de uma vista frontal da turbina (c), podem ser observadas na Figura 5.

Figura 5 - Vistas isométrica (a), frontal (b) e da turbina (c) da geometria do domínio do escoamento sobre o aerogerador

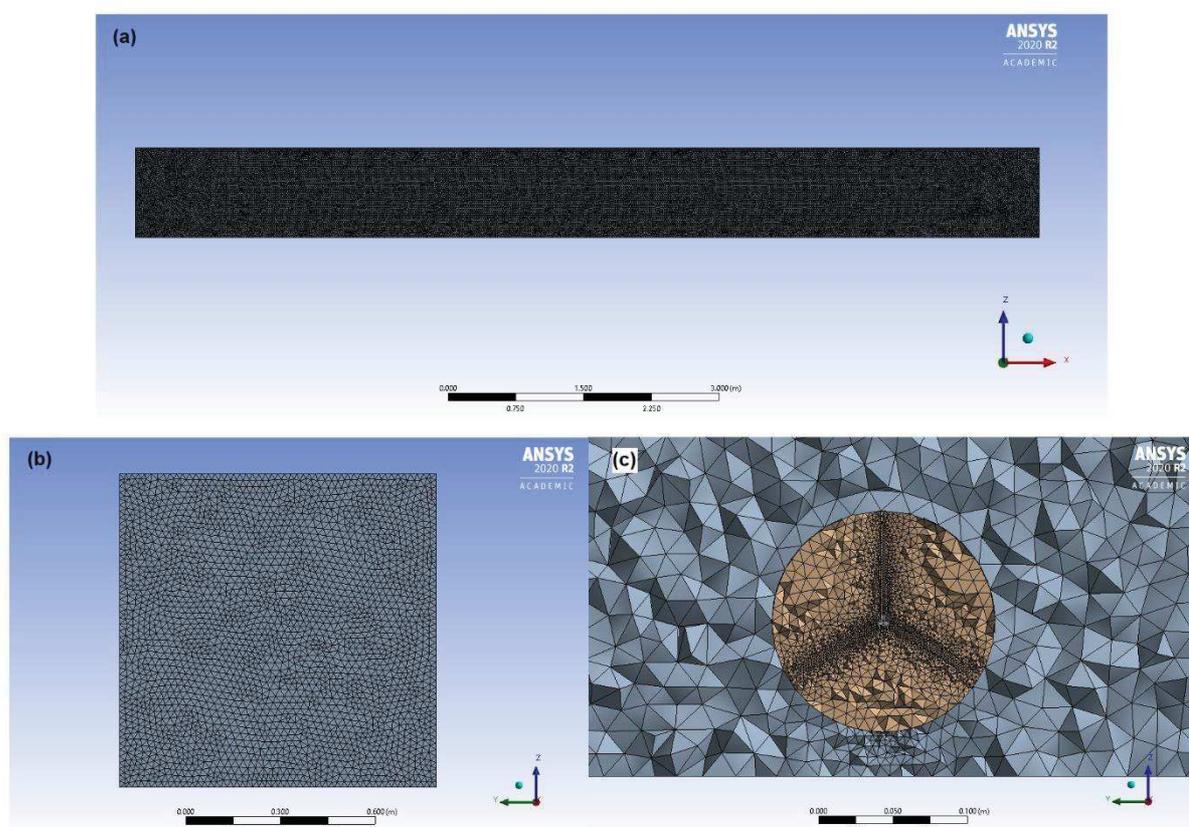


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Novamente, diferentes configurações de malha foram testadas. Devido à complexidade e escala da geometria da turbina foi necessário o desenvolvimento de uma malha tetraédrica para captar todas as curvas e detalhes. Para a região do disco foi aplicado um dimensionamento de $1,5 \cdot 10^{-2}$ m, com captura de proximidade e curvatura, para refinar ainda mais a malha na região próxima das pás do rotor. Para a captura de proximidade foi utilizado um tamanho mínimo de $1 \cdot 10^{-3}$ m, com no mínimo uma camada de elementos em cada lacuna. Para a captura de curvatura foi utilizado

o ângulo normal de curvatura padrão e um tamanho mínimo de $1 \cdot 10^{-2}$ m. No restante da malha foi aplicado um dimensionamento de $2 \cdot 10^{-2}$ m, também com captura de proximidade e curvatura, com as mesmas características da região do rotor. A malha utilizada para as simulações, que pode ser vista na Figura 6, é composta por 10.691.918 elementos.

Figura 6 – Vistas lateral (a), frontal (b) e um corte mostrando a turbina (c) da malha para o escoamento sobre o aerogerador



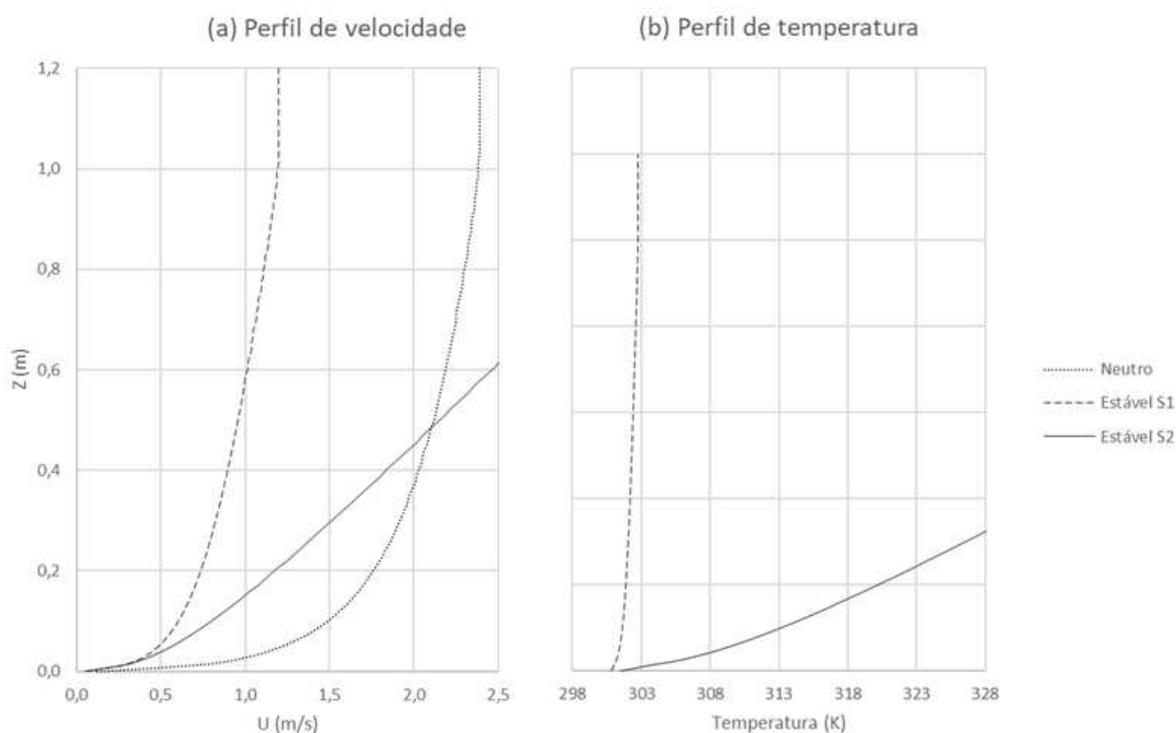
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

3.2 Modelagem matemática

A modelagem matemática do escoamento turbulento na CLA foi realizada utilizando o conjunto de Equações (2.7) à (2.12), com a viscosidade turbulenta calculada conforme o modelo de Smagorinski dinâmico, descrito no item 2.4.1. Para modelar o efeito de flutuação no escoamento, foi empregado o modelo de Boussinesq, conforme a Equação (2.23). Os perfis de velocidade e temperatura para os diferentes casos de estratificação térmica foram prescritos de acordo com a teoria de similaridade de Monin e Obukhov (1954), conforme descrito na Seção 2.6.

Em ambos os domínios, foram consideradas condições de contorno de parede sem deslizamento para o teto e o chão. No caso de validação do modelo (colina) uma das paredes laterais também foi considerada como parede sem deslizamento, e a parede oposta foi considerada como um plano de simetria. No estudo de caso (turbina) ambas as paredes laterais foram consideradas como planos de simetria. Na saída de ambos os domínios foi imposta a condição de saída de pressão, com pressão manométrica igual à zero. Na entrada dos domínios foram aplicados perfis de velocidade e temperatura ajustados para representarem as condições experimentais expostas na Tabela 2, em diferentes casos considerando em cada caso um perfil neutro, estável S1 e estável S2, que podem ser vistos na Figura 7.

Figura 7 - Perfis de velocidade e temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

3.3 Modelagem numérica

Para simular numericamente o escoamento nas geometrias apresentadas, foi utilizado o código Fluent 2020 R2, um pacote de dinâmica de fluidos computacional incluso na biblioteca do software de mecânica computacional ANSYS que se baseia

no método de volumes finitos de Green-Gauss (ANSYS, 2009a), utilizado amplamente em simulações de escoamentos turbulentos e sobre turbinas eólicas, como nos trabalhos desenvolvidos por Alinot e Mason (2002), El-Askary et al. (2017) e Breedt et al. (2018).

As modificações apresentadas na Seção 2.6, referentes à Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov, foram aplicadas na modelagem por meio de funções definidas pelo usuário (UDF, do inglês *user defined functions*), que são funções programáveis, em código de linguagem C, que podem ser carregadas no software para aprimorar os recursos padrões do código (ANSYS, 2009b).

Tanto na simulação do escoamento sobre uma colina quanto do escoamento sobre uma turbina eólica foi utilizado o método de solução do tipo *pressure based*, transiente e com formulação absoluta da velocidade. Os demais parâmetros de cada simulação são discutidos a seguir.

3.3.1 *Setup* - escoamento sobre uma colina

A simulação foi desenvolvida primeiramente com a modelagem RANS *k- ϵ standard* de turbulência, estacionária, com o esquema *coupled* de acoplamento da pressão e velocidade, para a obtenção de um escoamento médio, que foi superimposto no domínio. Após isso, foi selecionada a modelagem LES com o modelo de Smagorinsky dinâmico para as tensões de submalha, e o esquema SIMPLEC de acoplamento de pressão e velocidade.

Em todos os casos foi utilizado um passo de tempo de 0,015 s para garantir que a informação não se propagasse por muitas células a cada passo de tempo. A simulação foi conduzida até que se atingisse uma condição de estabilidade, determinada por meio de perfis de velocidade constantes no topo e a 4 m do centro da colina. Nos diferentes casos, a estabilização aconteceu após aproximadamente duas vezes o tempo de permanência de uma partícula, que consiste no tempo que um elemento leva para atravessar todo o domínio, e é a relação entre o comprimento da geometria e a velocidade do escoamento, sendo de 8 s para o caso com estabilidade neutra, 20 s para o caso de estabilidade fraca e 15,4 s para o caso com estabilidade forte.

Após a estabilização, foi inicializada a coleta de dados estatísticos, para a obtenção de médias temporais das variáveis analisadas, e a simulação foi retomada,

sendo conduzida, novamente, até que se atingisse duas vezes o tempo de permanência das partículas em cada caso.

3.3.1 *Setup* - escoamento sobre uma turbina eólica

Devido à complexidade da geometria, para o escoamento sobre a turbina eólica não foi possível conduzir a simulação com a modelagem LES, de forma que a simulação foi desenvolvida primeiramente com a modelagem RANS *k-ε standard* de turbulência, estacionária, com o esquema *coupled* de acoplamento da pressão e velocidade, para a obtenção de um escoamento médio, e posteriormente foi aplicado o mesmo modelo de turbulência, porém transiente, onde foi utilizada a ferramenta de malha rotacional para introduzir uma velocidade de rotação na turbina. A partir do perfil de velocidade desenvolvido foi obtida a velocidade do vento na região do rotor, a qual foi utilizada para calcular a velocidade de rotação da turbina, de acordo com a Equação 3.2:

$$RPM = \frac{60 \cdot u \cdot TSR}{\pi \cdot D} \quad (3.2)$$

onde *RPM* é a velocidade angular de rotação, em rotações por minuto, *u* é a velocidade do vento, *TSR* é a relação de velocidade de ponta de pá e *D* é o diâmetro do rotor. Como cada caso de estratificação apresenta diferentes velocidades de escoamento do vento, foram calculadas velocidades de rotação específicas de 110,61 rad/s para o caso neutro e 65,15 rad/s para o caso estável S1.

Em todos os casos foi utilizado um passo de tempo de 0,005 s para garantir que a informação não se propagasse por muitas células a cada passo de tempo. A simulação foi conduzida até que se atingisse aproximadamente o tempo de permanência de uma partícula, que consiste no tempo que um elemento leva para atravessar todo o domínio, e é a relação entre o comprimento da geometria e a velocidade do escoamento, sendo de 4 s para o caso neutro, e 10 s para o caso com estabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

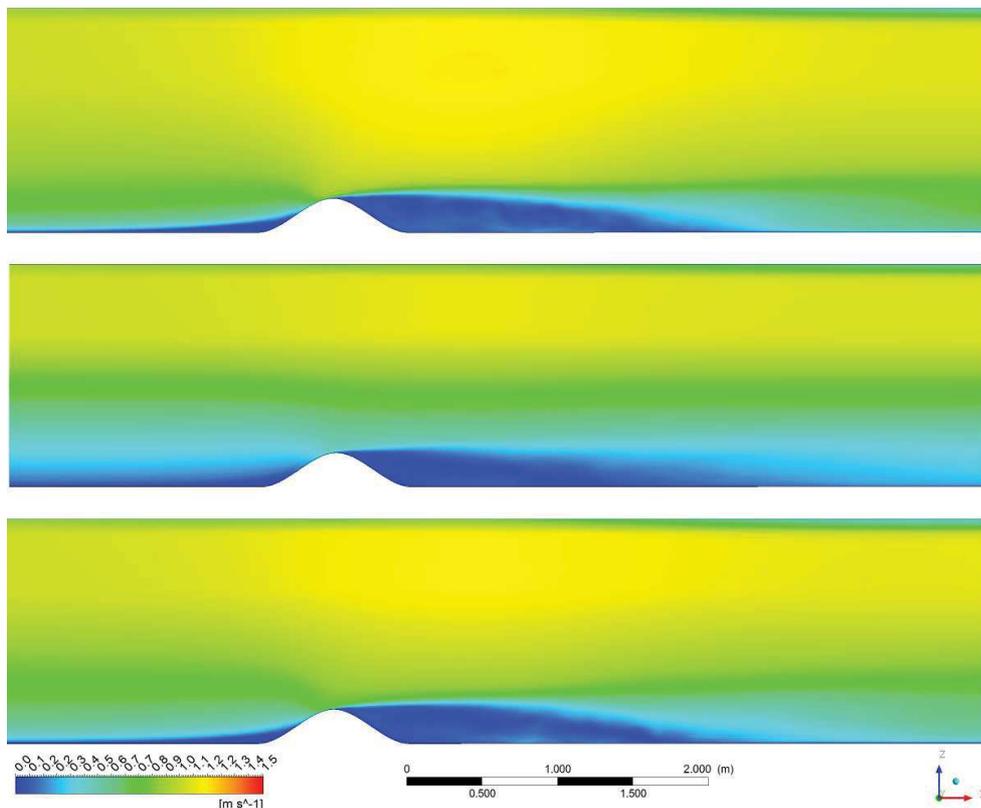
Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas simulações de escoamento sobre a colina e sobre a turbina eólica descritos ao longo do capítulo 3. A validação das simulações numéricas foi realizada a partir de comparações entre os resultados obtidos pelo modelo de escoamento testado e os dados reais, medidos no experimento realizado por Ross et al. (2004). Para o caso do escoamento sobre a turbina eólica foram realizadas análises quantitativas do perfil de velocidade e da vorticidade gerada na esteira da turbina.

4.1 Escoamento em túnel de vento sobre uma colina

4.1.1 Efeitos térmicos

A Figura 8 traz contornos da razão entre a velocidade média e a velocidade de escoamento livre, acima da camada limite, para os casos neutro (a), estável S2 (b) e estável S1 (c).

Figura 8 - Contornos de velocidade (a) Neutro (b) Estável S2 e (c) Estável S1

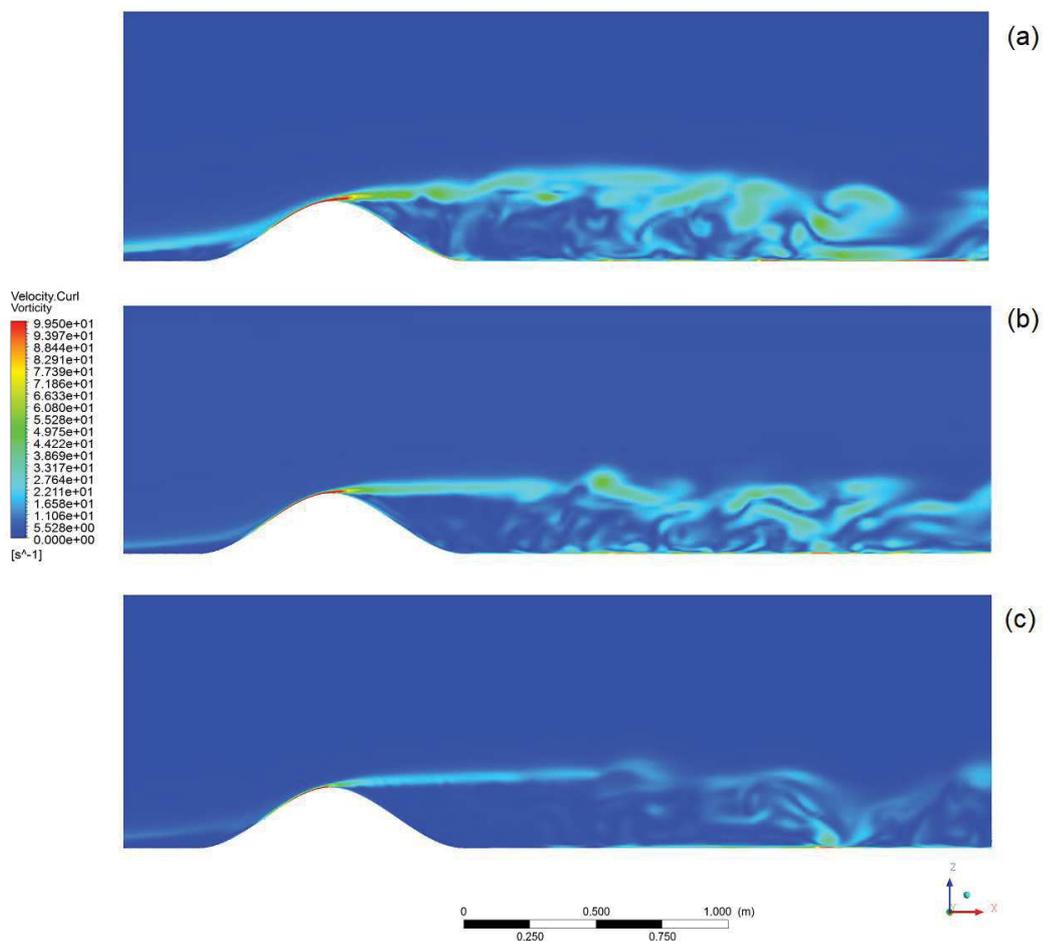


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Percebe-se, nos três casos, algumas características importantes do escoamento sobre uma colina íngreme, como a aceleração do escoamento no topo da colina, uma zona de recirculação a sotavento da colina e a formação de uma esteira. Para os casos S2 (b) e S1 (c), a aceleração no topo da colina é menos expressiva, e a profundidade da região da esteira é ligeiramente aumentada, uma vez que a estratificação estável atua para suprimir o movimento vertical. Resultados similares foram encontrados por Koblitz et al. (2015) e Wan et al. (2011).

A Figura 9 traz os contornos de vorticidade após quatro vezes o tempo de permanência de partícula no domínio para os casos neutro (a), estável S2 (b) e estável S1 (c), nos instantes de tempo $t = 16,0s$, $t = 30,7s$ e $t = 38,2s$, respectivamente. Através dos contornos de vorticidade é possível observar que, para os casos estáveis, os gradientes de temperatura são responsáveis por limitar o escoamento turbulento à parte inferior do domínio, além de reduzir sua intensidade significativamente quando comparados ao caso neutro.

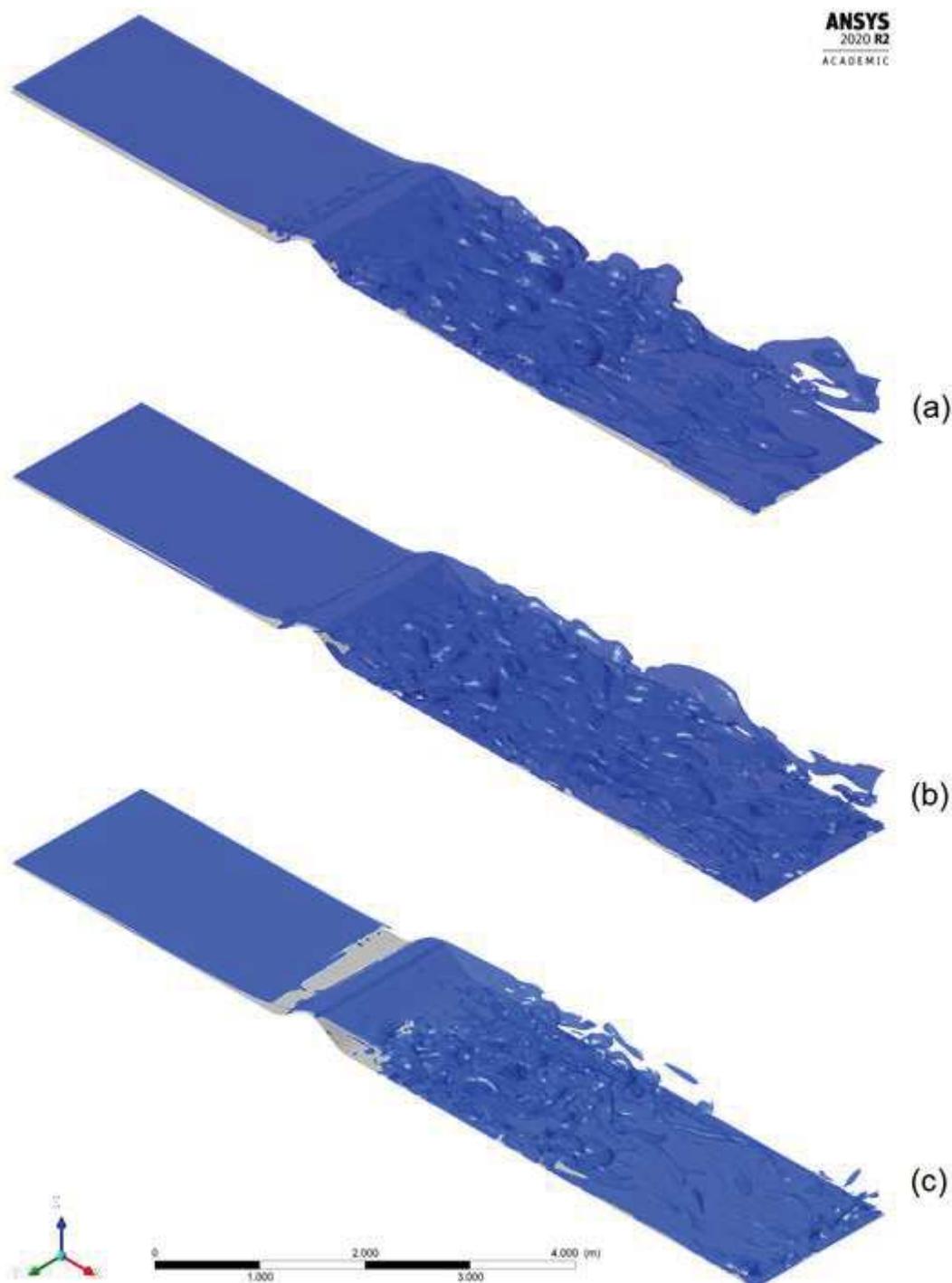
Figura 9 - Contornos de vorticidade (a) Neutro (b) Estável S2 e (c) Estável S1



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O escoamento turbulento é melhor observado na Figura 10, que traz iso-superfícies de vorticidade, à um valor de 10 s^{-1} para os diferentes casos simulados. Como visto anteriormente, percebe-se uma intensidade maior de turbulência para o caso neutro. Nos escoamentos estáveis a turbulência ocorre em menor intensidade e se mantém na região inferior do domínio.

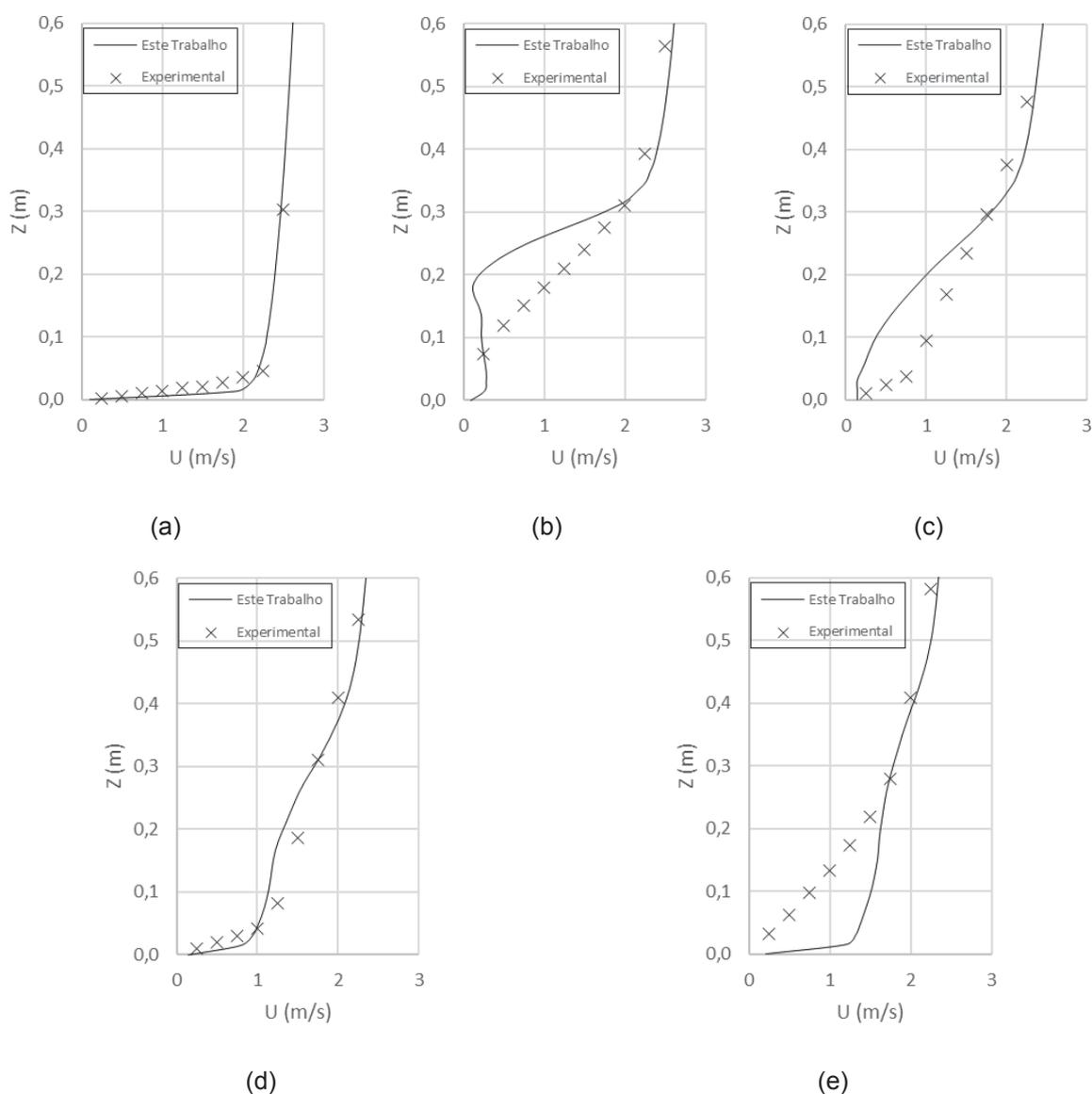
Figura 10 - Iso-superfícies de vorticidade (a) Neutro (b) Estável S2 e (c) Estável S1



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

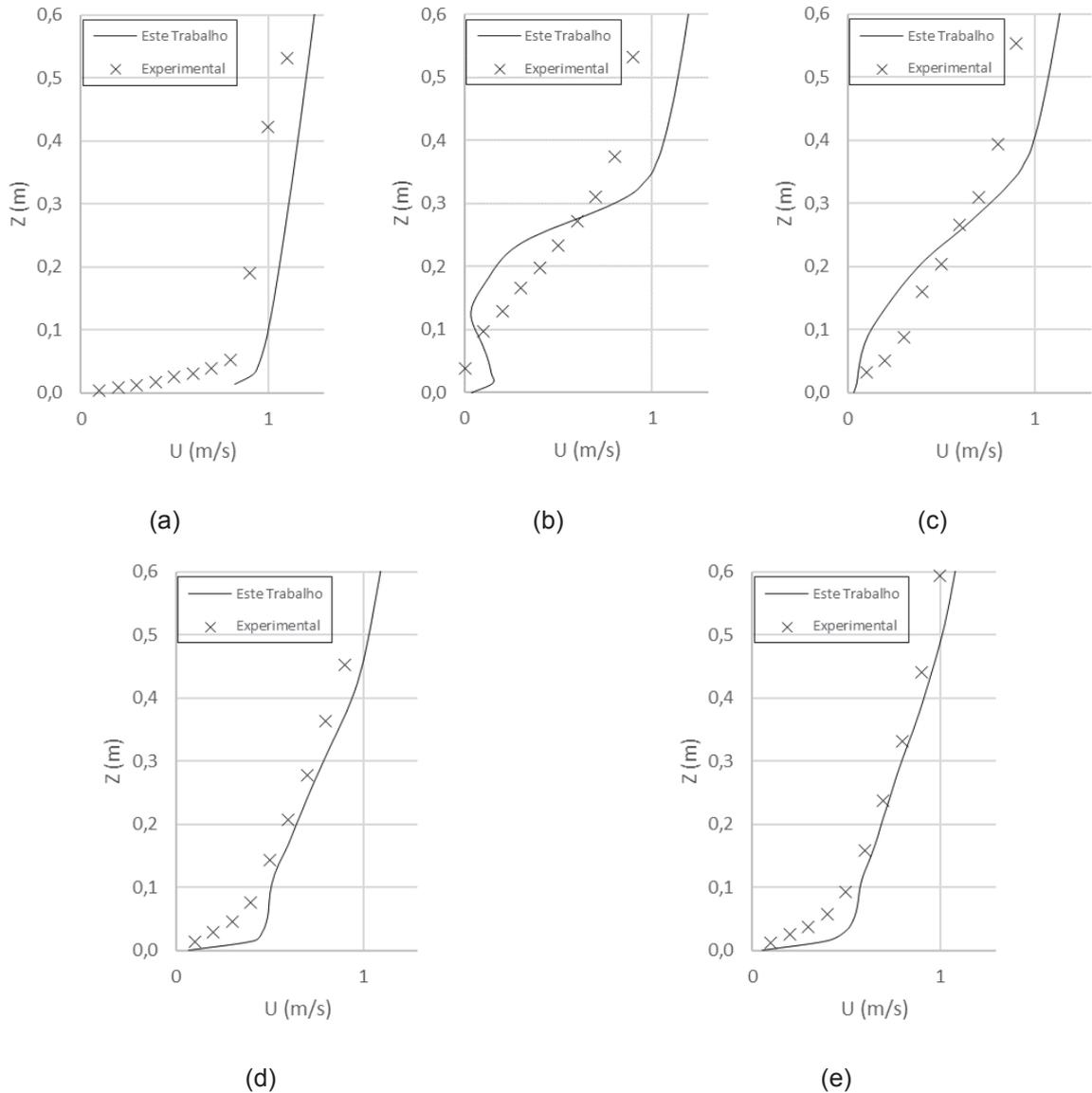
Comparações entre os perfis de velocidade, para os casos neutro e estável S1, obtidos através da simulação e os perfis de velocidade obtidos experimentalmente por Ross et al. (2004), podem ser vistas nas Figuras 11 e 12, respectivamente. Os pontos correspondentes aos dados experimentais foram obtidos de um contorno de velocidade apresentado pelos autores, que por sua vez foi construído a partir de perfis baseados em 10 pontos de medição. São apresentadas comparações do perfil de velocidade no topo da colina e a distâncias de 1, 2, 3 e 4 m do mesmo.

Figura 11 - Perfis de velocidade no topo da colina (a) e a distâncias de 1 (b), 2 (c), 3 (d) e 4 m (e) para o caso neutro



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

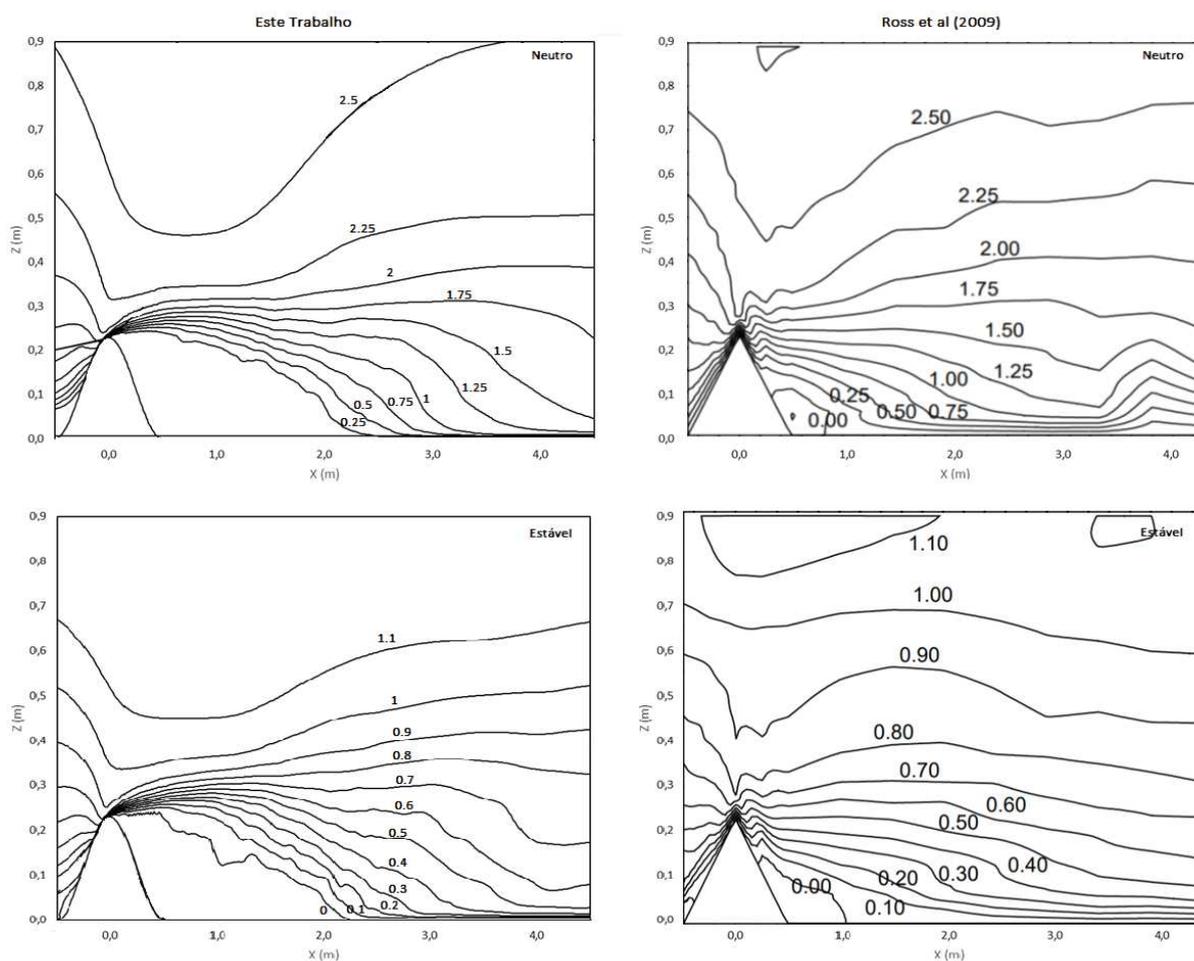
Figura 12 - Perfis de velocidade no topo da colina (a) e a distâncias de 1 (b), 2 (c), 3 (d) e 4 m (e) para o caso estável S1



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Os resultados obtidos a partir da simulação tendem a superestimar a aceleração do escoamento no topo da colina, o que conseqüentemente leva à uma recuperação mais lenta da velocidade a jusante da colina, resultando em uma esteira também superestimada, quando comparado com os dados experimentais. Essas diferenças ficam mais evidentes na Figura 13, que traz uma comparação das linhas de contorno de velocidade obtidas experimentalmente, à direita, e através das simulações, à esquerda.

Figura 13 - Gráficos de contorno da velocidade (em m/s) para os casos neutro e estável S1



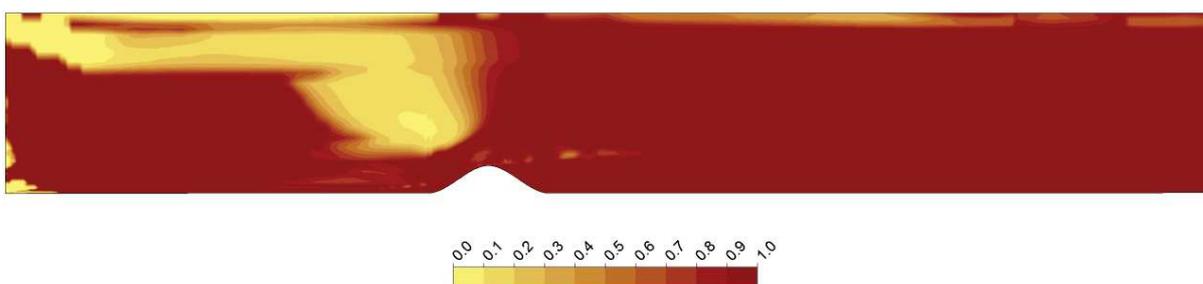
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

4.1.2 Estudo de malha

Para a análise da qualidade de malha foi calculada a razão entre a energia cinética turbulenta resolvida na malha e a energia cinética turbulenta total, que compreende a que é resolvida na malha e a energia em escala de submalha, que é modelada. O objetivo é que a maior parte da energia cinética turbulenta seja resolvida. Usualmente, prefere-se que a razão entre o que é resolvido e o total fique acima de 0,8. Para a malha utilizada nas simulações do presente trabalho, a média ficou em 0,84, o que indica que a malha tem uma boa resolução. A Figura 14 mostra um contorno da qualidade de malha, paralelo ao escoamento, onde pode ser vista uma região de baixa qualidade na parte superior da entrada do túnel de vento simulado. Essa região, porém, apresenta um escoamento com baixa intensidade de turbulento,

de forma que as energias cinéticas turbulentas calculada e modelada tem valores muito baixos, o que levou à uma razão mais baixa. Na zona de interesse, porém, que compreende o topo da colina e a região onde se forma a esteira no escoamento, a malha se mostrou adequada.

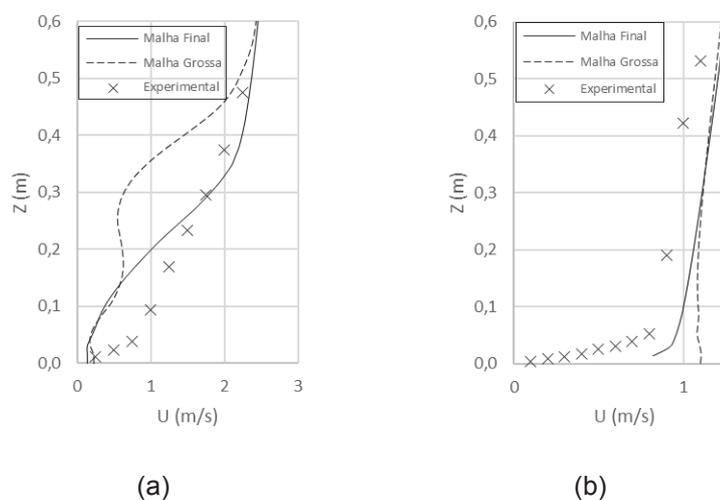
Figura 14 - Qualidade de malha



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Conforme comentado na seção 3.1.1 diferentes configurações de malha foram testadas até que se chegasse na malha final. A Figura 15 mostra uma comparação entre os perfis de velocidade obtidos por uma das malhas descartadas e pela malha final. Para o caso neutro houve uma melhoria dos resultados especialmente na região da esteira, enquanto para o caso estável a melhoria foi mais perceptível no topo da colina. Estas variações ressaltam a importância da elaboração de uma malha bem estruturada para a obtenção de resultados mais precisos.

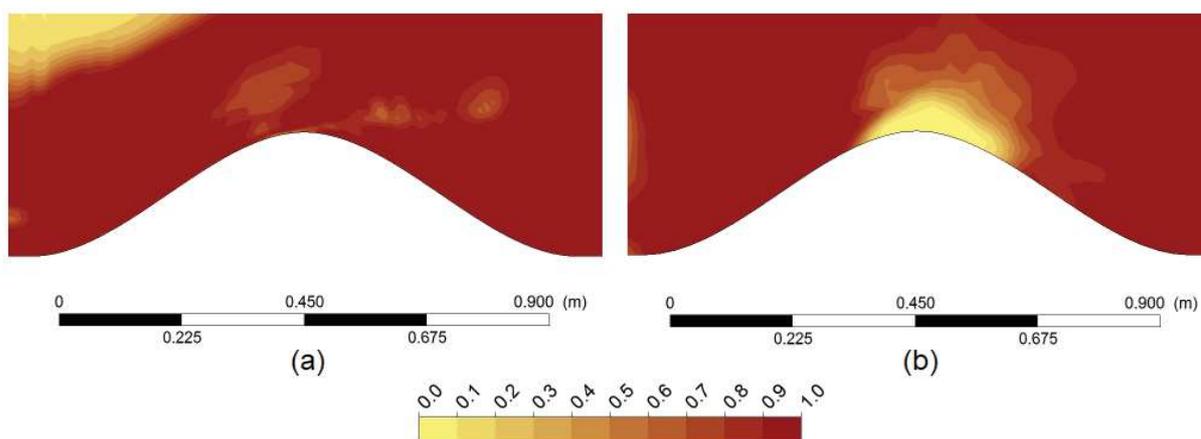
Figura 15 - Perfis de velocidade obtidos com diferentes malhas: (a) caso neutro, à 2 metros de distância da colina e (b) caso estável S1 no topo da colina



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 16 traz contornos de qualidade de malha em uma vista aproximada da colina para a malha final (a) e uma malha menos refinada (b), onde é possível identificar o impacto do refino da malha na região mais próxima da colina, que é uma zona de interesse no escoamento.

Figura 16 – Qualidade de diferentes malhas

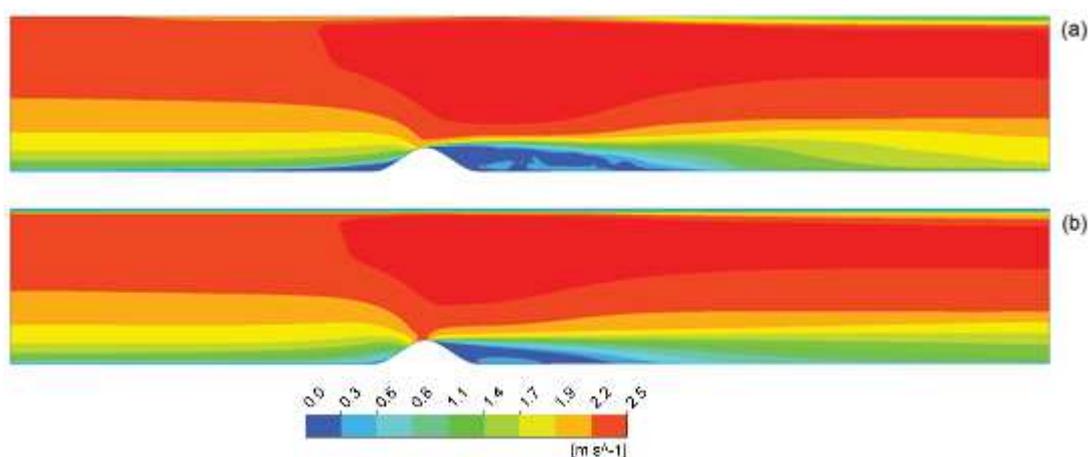


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

4.1.3 Comparação entre resultados LES e RANS

Uma análise qualitativa foi feita entre os resultados obtidos por meio da modelagem RANS $k-\varepsilon$ e LES, a fim de comparar o comportamento do escoamento em cada caso. A Figura 17 mostra contornos da velocidade média para o caso neutro comparando os resultados obtidos com as modelagens LES e RANS de turbulência.

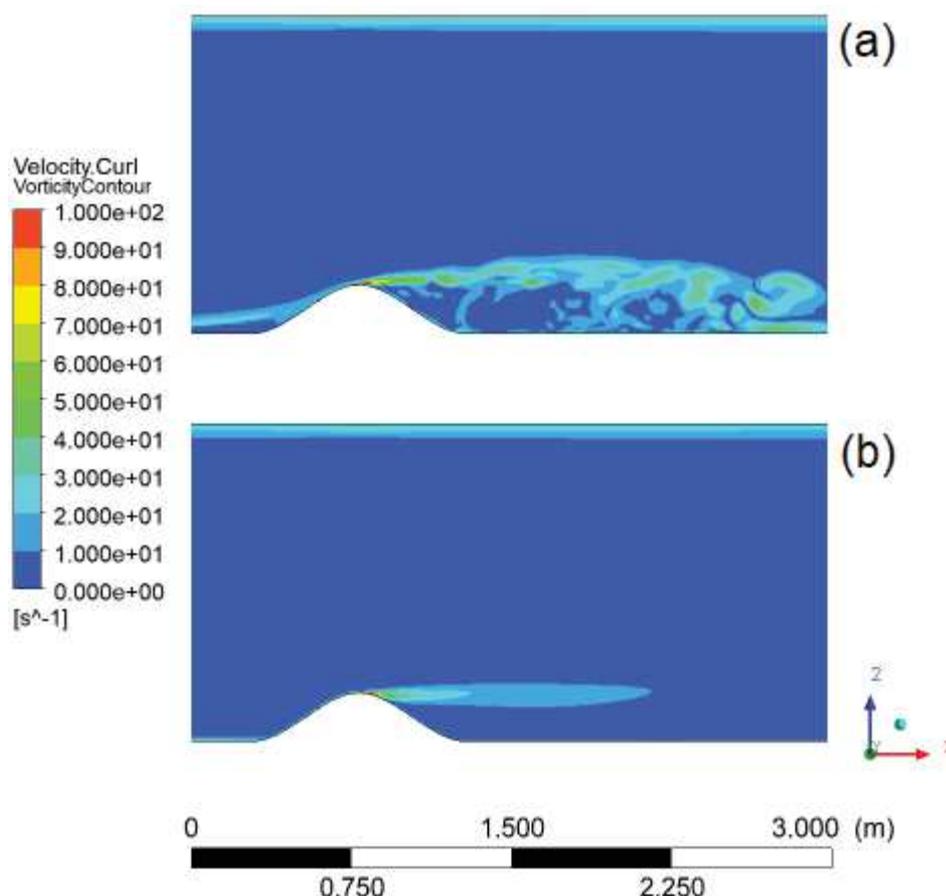
Figura 17 - Contornos de velocidade para as modelagens LES (a) e RANS (b) para o caso neutro



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Para os mesmos casos, a Figura 18 traz contornos de vorticidade, no instante de tempo $t = 16,0s$ para o modelo LES e uma média temporal para o modelo RANS.

Figura 18 - Contornos de vorticidade para as modelagens LES (a) e RANS (b) para o caso neutro



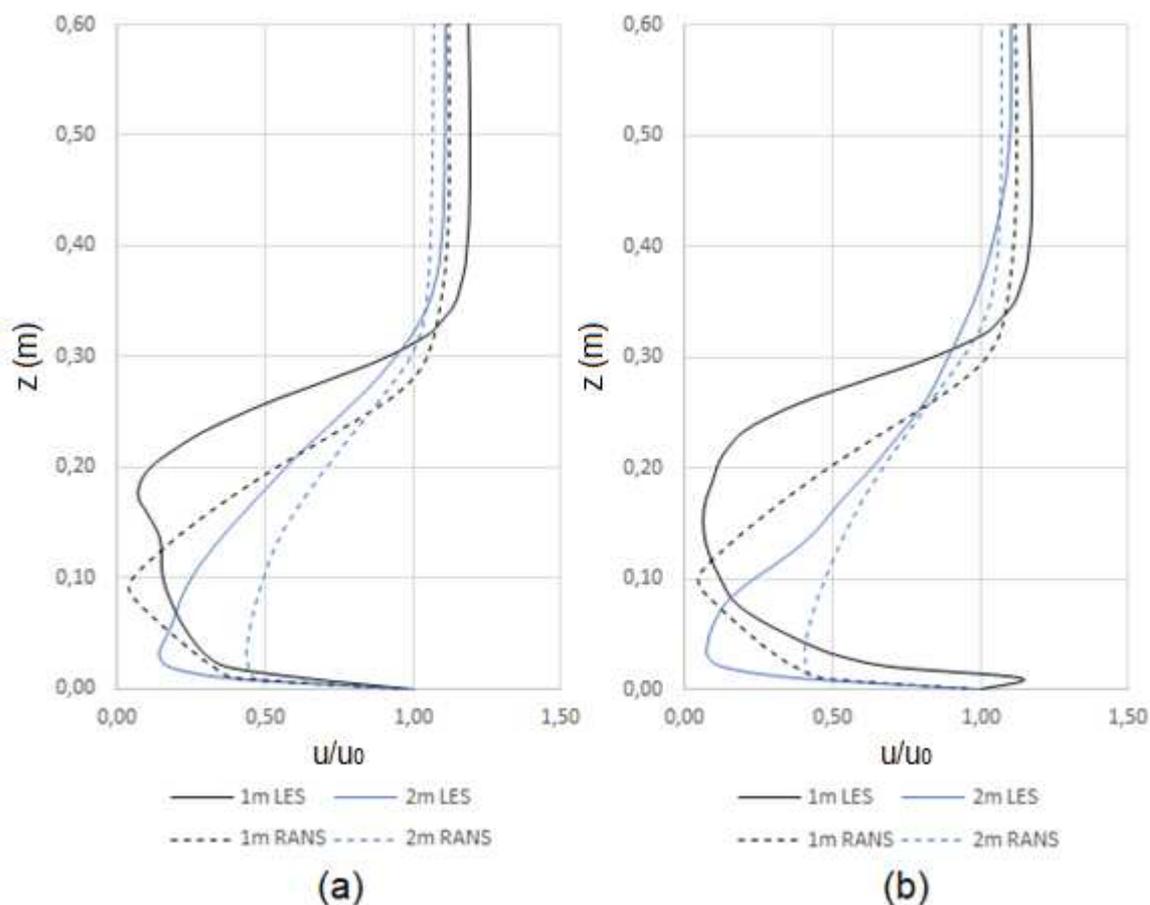
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Percebe-se um comportamento semelhante para os contornos de velocidade, com os dois modelos representando as principais características do escoamento, como a aceleração no topo da colina e o efeito de esteira. No entanto, o resultado com o modelo RANS prevê o recolamento da camada-limite mais próximo à colina, indicando que este modelo é mais difusivo e pode subestimar a dimensão da esteira turbulenta gerada por um obstáculo. Nos contornos de vorticidade os modelos divergem bastante, com o modelo LES representando estruturas turbulentas geradas a partir da colina que o modelo RANS não prevê.

A Figura 19 traz o perfil da razão entre a velocidade à 1 m e 2 m de distância do topo da colina (u) e a velocidade na entrada do túnel de vento (u_0) para os casos neutro (a) e estável S1 (b), onde é possível identificar que a altura da esteira e a

recuperação da velocidade são diferentes para os dois modelos. Além disso, a modelagem LES leva a uma maior diferença nos perfis de velocidade entre as diferentes condições de estratificação, possivelmente devido a melhor representação das estruturas turbulentas do escoamento, quando comparado ao modelo RANS.

Figura 19 – Perfis de velocidade adimensional para os casos neutro (a) e estável S1 (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

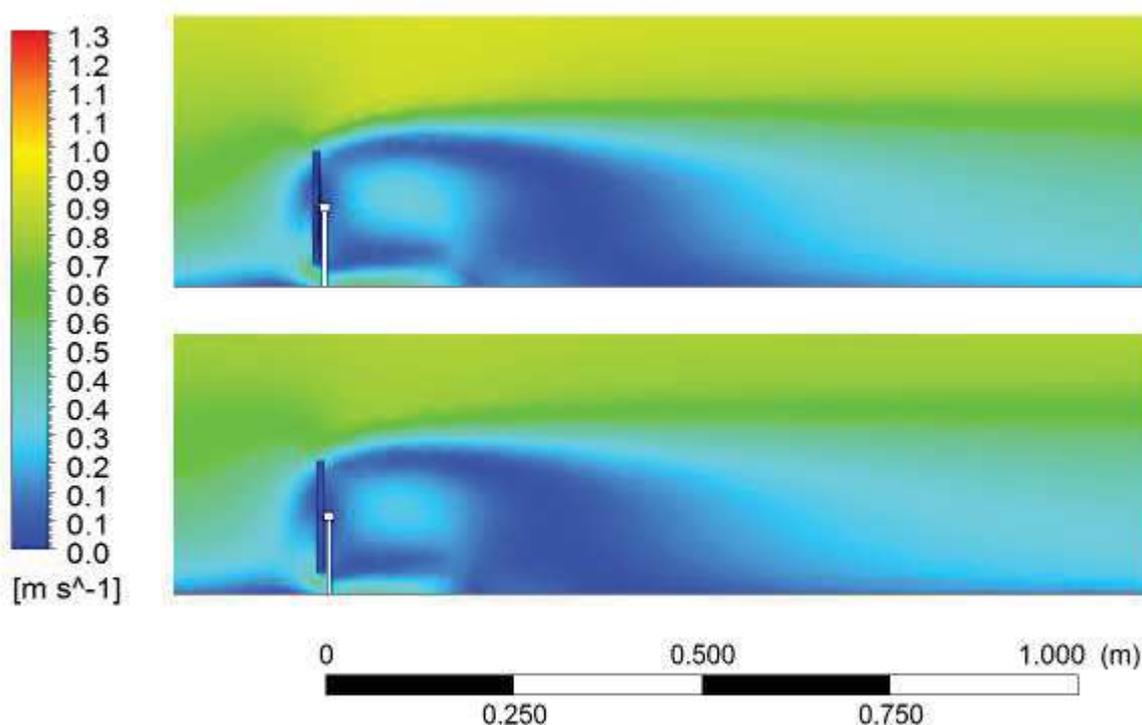
4.2 Escoamento em túnel de vento sobre uma turbina

Neste item são discutidos os resultados para o escoamento sobre uma turbina conforme descrito no item 3.1.2 desta dissertação. Neste caso, foram realizadas simulações utilizando somente o modelo RANS, devido ao alto custo computacional demandado pelo modelo LES no caso de uma superfície móvel no interior do domínio.

A Figura 20 traz o contorno da razão entre a velocidade no sentido do escoamento sobre a turbina e a velocidade de escoamento livre, acima da camada

limite, para os casos neutro (a) e estável S1 (b) Assim como no caso do escoamento sobre a colina, a estratificação térmica do escoamento atua para suprimir o movimento vertical. Dessa forma, apesar de perceber-se um comportamento semelhante próximo da turbina para os diferentes casos, a recuperação da velocidade do vento após passar pela turbina é ligeiramente mais lenta para o caso estável, resultando em uma maior extensão da região de esteira.

Figura 20 - Contornos de velocidade (a) Neutro (b) Estável S1

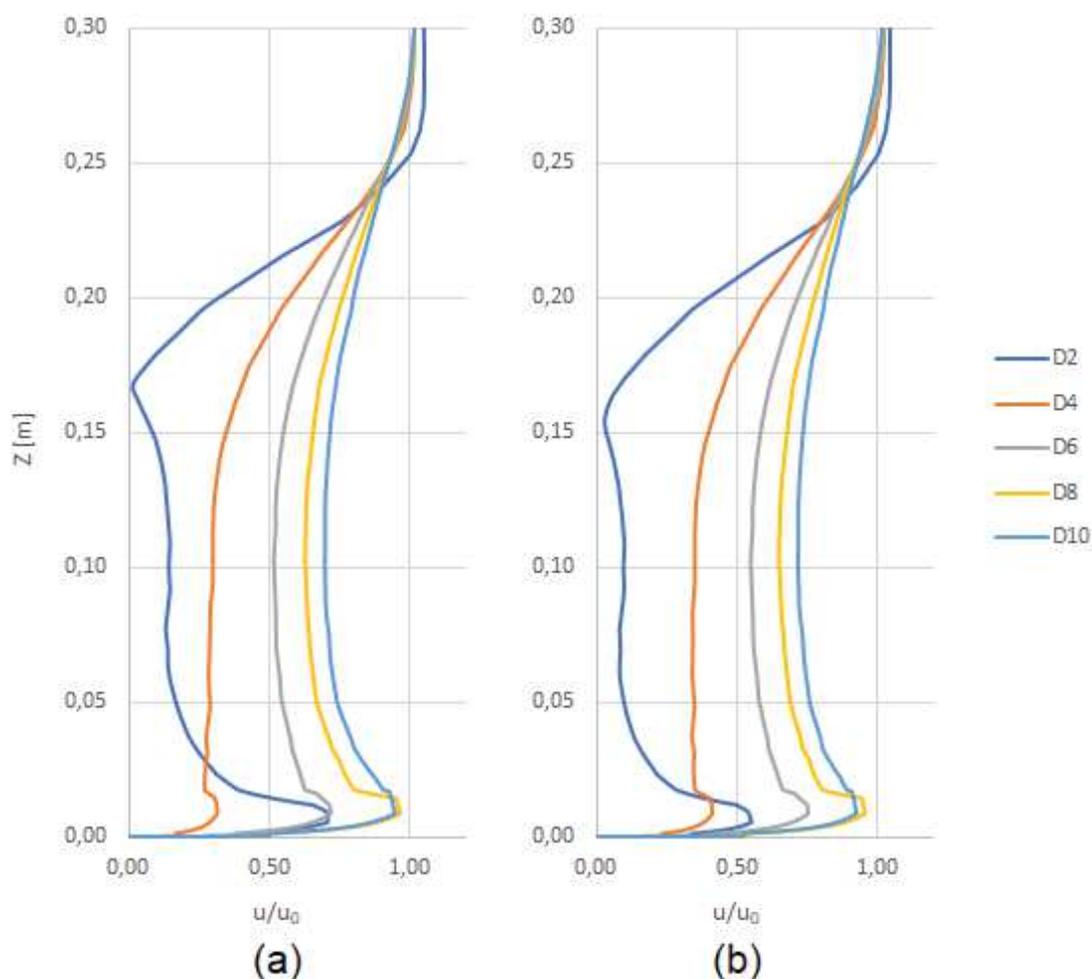


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A evolução da esteira pode ser vista na Figura 21, que traz uma comparação dos perfis da relação entre a velocidade à distâncias de 2, 4, 6, 8 e 10 vezes o diâmetro da turbina e a velocidade na entrada do túnel de vento, para o caso neutro (a) e estável (b). É possível verificar uma recuperação ligeiramente mais lenta no caso estável, especialmente na região mais próxima da turbina. Essa diferença tão pequena entre os casos neutro e estável pode estar relacionada com o fato de que o modelo RANS não é capaz de representar todas as estruturas turbulentas do escoamento, como foi visto na Figura 18. Uma vez que a turbulência tem influência considerável no perfil de velocidade do escoamento, quando o modelo não é capaz de representar todas as estruturas turbulentas observam-se efeitos mais amenos da estratificação atmosférica no perfil vertical da velocidade do escoamento, e um maior impacto das diferentes

condições de estratificação é esperado ao utilizar-se o modelo LES, como pode ser observado na comparação feita na Figura 19.

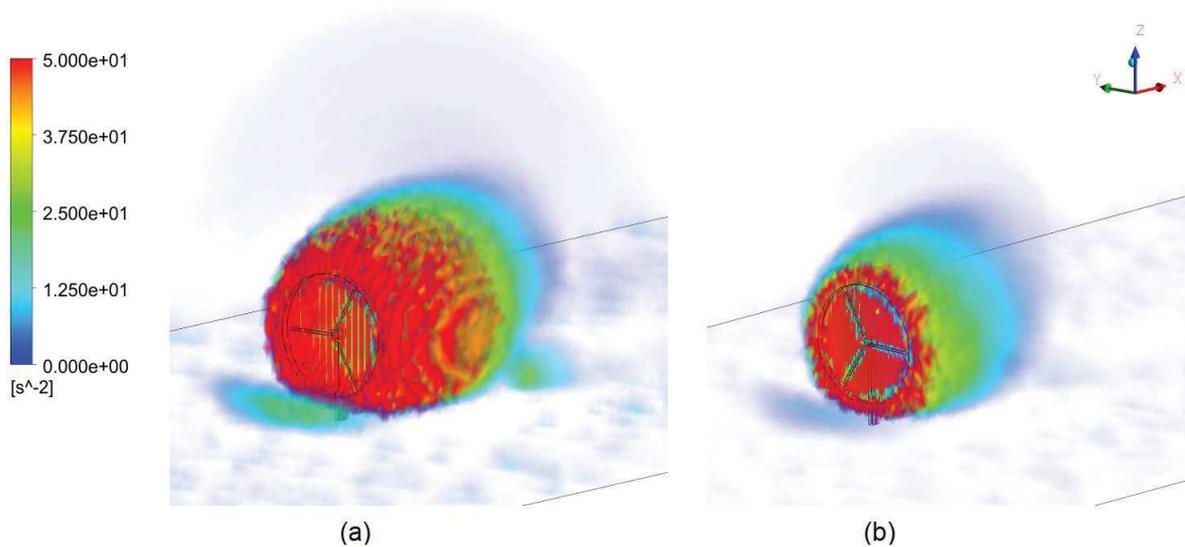
Figura 21 - Evolução da esteira no escoamento neutro (a) e estável S1 (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A visualização de vórtices pode ser feita por meio do Critério-Q, onde valores positivos indicam regiões de alta velocidade angular próximas dos núcleos dos vórtices. Uma renderização volumétrica dos valores médios do Critério-Q pode ser vista na Figura 22, indicando uma região turbulenta mais intensa na esteira para o caso neutro. Como foi visto anteriormente, porém, a modelagem RANS tende a menosprezar a intensidade da turbulência no escoamento, de forma que a extensão da esteira pode estar sendo subestimada para ambos os casos de estratificação.

Figura 22 – Renderização volumétrica do Critério-Q para os casos neutro (a) e estável S1 (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A utilização da modelagem LES para as simulações de escoamento com a estrutura móvel da turbina são complexas e demandam uma malha bem estruturada e um alto poder computacional, porém devem entregar resultados melhores, captando detalhes importantes que evidenciem a diferença entre considerar ou não a estratificação, assim como foi visto para o escoamento sobre a colina.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa buscou elaborar um modelo de CFD para melhor representar o escoamento na camada limite atmosférica em condições de estratificação térmica. Para isso foi utilizado o software comercial ANSYS Fluent, onde foi aplicado o modelo de simulação de grandes vórtices (LES), com o modelo de submalha de Smagorinsky dinâmico, além da aproximação de Boussinesq para representar a convecção natural e a Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov para introduzir os efeitos da estratificação atmosférica nos perfis verticais da velocidade e temperatura do escoamento.

O modelo desenvolvido foi aplicado na simulação do escoamento sobre uma colina íngreme, e os resultados obtidos foram comparados à dados experimentais de túnel de vento encontrados por Ross et al. (2004). De forma geral o modelo foi capaz de representar os efeitos gerais induzidos pela estratificação de forma satisfatória, embora tenha superestimado a aceleração do escoamento no topo da colina e a extensão do efeito de esteira a jusante da colina.

Os resultados obtidos com a modelagem LES foram comparados aos dados obtidos aplicando a modelagem RANS, com a intenção de determinar se o maior poder computacional demandado pelo modelo LES leva a resultados melhores. Apesar de a diferença entre o perfil de velocidade do escoamento calculado pelos dois modelos ser pequena, uma análise de vorticidade mostrou que os modelos divergem bastante, com o modelo LES representando estruturas turbulentas geradas a partir da colina que o modelo RANS não prevê.

Por fim, o modelo desenvolvido foi aplicado ao escoamento sobre um aerogerador em escala reduzida, onde foi aplicada uma velocidade angular ao rotor. Devido à complexidade do domínio por considerar uma estrutura móvel, foi utilizado o modelo RANS para a turbulência, que se mostrou capaz de representar de forma satisfatória o comportamento médio do escoamento, porém não foi possível observar grandes diferenças no impacto da estratificação atmosférica sobre o escoamento. Como foi visto, a modelagem RANS não é capaz de representar todas as estruturas turbulentas do escoamento, o que pode ter sido a razão da similaridade entre os diferentes casos de estratificação atmosférica, uma vez que esta tem seu principal impacto relacionado com a intensidade turbulenta.

A utilização da modelagem LES para as simulações de escoamento com a estrutura móvel da turbina são complexas e demandam uma malha bem estruturada e um alto poder computacional, porém devem entregar resultados com maior exatidão, captando detalhes importantes que evidenciem a diferença entre considerar ou não a estratificação, assim como foi visto para o escoamento sobre a colina.

Os resultados obtidos mostram que diferentes condições de estratificação atmosférica tem um impacto significativo no escoamento de vento na camada limite atmosférica. Durante períodos estáveis há uma redução da turbulência na esteira de um aerogerador, porém, devido aos gradientes de temperatura, ocorre uma limitação do escoamento turbulento à parte inferior do domínio, levando a uma recuperação mais lenta da velocidade e prolongando a região de esteira. Isso indica que a estabilidade atmosférica é um fator importante para o escoamento na camada limite atmosférica, devendo ser levado em consideração para um melhor planejamento de parques eólicos, de forma a estabelecer uma boa estratégia de posicionamento dos aerogeradores.

Como sugestão para trabalhos futuros está a aplicação da modelagem LES para a análise do escoamento sobre o aerogerador e seu estudo em escala real, além do desenvolvimento de experimentos em escala reduzida, em túnel de vento, para a comparação entre os resultados de simulações numéricas e experimentos.

REFERÊNCIAS

- Abkar, M., Porté-Agel, F., 2013. "The effect of free-atmosphere stratification on boundary-layer flow and power output from very large wind farms". *Energies*. Lausanne, Switzerland.
- Ali, N., Hamilton, N., Cortina, G., Calaf, M., Cal, R.B., 2018. "Anisotropy stress invariants of thermally stratified wind turbine array boundary layers using large eddy simulations". *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. Portland, USA.
- Alinot, C., Masson, C., 2002. "Aerodynamic simulations of wind turbines operating in atmospheric boundary layer with various thermal stratifications". *ASME 2002 Wind Energy Symposium, WIND2002*. Montreal, Canada.
- ANSYS, 2009a. "ANSYS Fluent Theory Guide. Disponível em <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm>. Acesso em jan/2021.
- ANSYS, 2009b. "ANSYS Fluent UDF Manual. Disponível em <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/udf/main_pre.htm>. Acesso em jan/2021.
- Barriatto, L. C., 2018. "Efeitos da estabilidade atmosférica na modelagem do escoamento para aplicações no setor de energia eólica". Dissertação de mestrado (Engenharia Mecânica), UFRGS, Porto Alegre.
- Betz, A., Schraubenpropeller mit geringstem Energieverlust. Mit einem Zusatz von I. Prandtl, "Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse", vol. , p. 193-217, 1919.
- Breedt, H.J., Craig, K.J., Jothiprakasham, V.D., 2018. "Monin-Obukhov similarity theory and its application to wind flow modelling over complex terrain". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Pretoria, South Africa.
- Castro, F.A., Silva Santos, C., Lopes Da Costa, J.C., 2015. "One-way mesoscale-microscale coupling for the simulation of atmospheric flows over complex terrain". *Wind Energy*. Porto, Portugal.
- Dörenkämper, M., Witha, B., Steinfeld, G., Heinemann, D., Kühn, M., 2015. "The impact of stable atmospheric boundary layers on wind-turbine wakes within offshore wind farms". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Oldenburg, Germany.
- Dresch, A., Lacerda, D. P., Antunes Júnior, J. A. V., 2015. "Design Science research : método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia". *Bookman*, Porto Alegre.
- Dyer, A.J., 1974. A review of flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorology*. Victoria, Australia. 363–372.
- El-Askary, W.A., Sakr, I.M., AbdelSalam, A.M., Abuhegazy, M.R., 2017. "Modeling of wind turbine wakes under thermally-stratified atmospheric boundary layer". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Shibin El-Kom, Egypt.
- EPE [Empresa de Pesquisa Energética] Balanço Energético Nacional (BEN) 2020: Ano base 2019, 2020. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br> >. Acesso em jan/2021.

- Feliciano, J., Cortina, G., Spear, A., Calaf, M., 2018. "Generalized analytical displacement model for wind turbine towers under aerodynamic loading". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Utah, USA.
- Gopalan, H., 2018. "Evaluation of Wray-Agarwal turbulence model for simulation of neutral and non-neutral atmospheric boundary layers". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Singapore.
- Han, Y., Stoellinger, M., 2017. "Large eddy simulation of atmospheric boundary layer flows over complex terrain with varying stability conditions". *35th Wind Energy Symposium, 2017*. Laramie, USA.
- Ichenial, M.M., El-Hajjaji, A., Khamlichi, A., 2019. "Modeling of the atmospheric boundary layer under stability stratification for wind turbine wake production". *Wind Engineering*. Tetouan, Morocco.
- Jensen, N. O., 1983. "A note on wind generator interaction". Technical Report, Risoe-M-2411(EN), Risø National Laboratory, Roskilde, 1983.
- Kalvig, S., Gudmestad, O.T., Winther, N., 2014. "Exploring the gap between 'best knowledge' and 'best practice' in boundary layer meteorology for offshore wind energy". *Wind Energy*. Stavanger, Norway.
- Koblitz, T., 2013. "CFD Modeling of Non-Neutral Atmospheric Boundary Layer Conditions". Tese de Doutorado, DTU Wind Energy, No. 0019(EN). Roskilde, Denmark.
- Koblitz, T., Bechmann, A., Sogachev, A., Sørensen, N., Réthoré, P.E., 2015. "Computational fluid dynamics model of stratified atmospheric boundary-layer flow". *Wind Energy*. Roskilde, Denmark.
- Mehta, D., van Zuijlen, A.H., Koren, B., Holierhoek, J.G., Bijl, H., 2014. "Large Eddy Simulation of wind farm aerodynamics: A review". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Petten, Netherlands.
- Monin, A.S.; Obukhov, A.M., 1954. "Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere". Tr. Akad. Nauk SSSR Geofiz. Inst. 24: 163–187.
- Ohya, Y., Uchida, T., 2003. "Turbulence structure of stable boundary layers with a near-linear temperature profile". *Boundary-Layer Meteorology* 108, 19–38. Kasuga, Japan.
- Ohya, Y., Uchida, T., 2008. "Laboratory and numerical studies of the atmospheric stable boundary layers". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Kasuga, Japan.
- Rados, K. G., Prospathopoulos, J. M., Stefanatos, N. Ch., Politis, E. S., Chaviaropoulos, P. K., Zervos, A., 2009. "CFD modeling issues of wind turbine wakes under stable atmospheric conditions". *European Wind Energy Conference and Exhibition 2009, EWEC 2009*. Athens, Greece.
- Ross, A. N., Arnold, S., Vosper, S. B., Mobbs, S. D., Dixon, N., Robins, A. G., 2004. "A comparison of wind-tunnel experiments and numerical simulations of neutral and stratified flow over a hill". *Boundary-Layer Meteorology* 113: 427–459, 2004. Netherlands.
- Schuster, M. F., Petry, A. P., Zinani, F. S. F., 2020. "Modelling and Simulation of Atmospheric Boundary Layer Thermal Stratification: A Systematic Review". *18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*. Brasil.

- Sharma, V., Calaf, M., Lehning, M., Parlange, M.B., 2016. "Time-adaptive wind turbine model for an LES framework". *Wind Energy*. Lausanne, Switzerland.
- Siddiqui, M.S., Rasheed, A., Tabib, M., Kvamsdal, T., 2017. "Numerical modeling framework for wind turbine analysis & atmospheric boundary layer interaction". *35th Wind Energy Symposium, 2017*. Trondheim, Norway.
- van Eck, N. J., Waltman, L., 2010. "VOSViewer: Visualizing Scientific Landscapes [Software]". Version 1.6.15, April 1, 2020. Available from [.https://www.vosviewer.com](https://www.vosviewer.com).
- Wan F, Port-Agel F. Large-eddy simulation of stably-stratified flow over a steep hill. *Boundary-layer Meteorology* 2011; 138(3): 367–384. ISSN 0006-8314, Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s10546-010-9562-4>.
- Zhang, W., Markfort, C., Porté-Agel, F., 2015. "Turbulent flow and heat transport over a two-dimensional steep hill: Wind-tunnel experiments". *33rd Wind Energy Symposium*. Cleveland, USA.

APÊNDICE A – UDF CASO NEUTRO

```
/*
*****
Velocity Profile
*****
*/
#include "udf.h"

#define uStar 0.165
#define z0 0.0023
#define k 0.42

DEFINE_PROFILE(inletVelocityNeutral,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real z;
    face_t f;

    begin_f_loop(f,t)
    {
        F_CENTROID(x,f,t);
        z = x[2] + z0;
        if (z > 1){
            z = 1;
        }
        F_PROFILE(f, t, i) = (uStar/k)*(log(z/z0));
    }
    end_f_loop(f,t)
}
```

APÊNDICE B – UDF CASO ESTÁVEL S1

```

#include "udf.h"
#include "math.h"

#define uStar 0.064
#define tetaStar 0.12
#define tetaS 300.5
#define LMO 2.6
#define z0 0.0023
#define k 0.42

#define g -9.80665
#define R 8.3144598
#define M 0.0289644

#define presOper 101325
#define tempOper 300.5

/*****
/*
Velocity Profile
*****/

DEFINE_PROFILE(inletVelocityStable,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real z;
    real phiM;
    face_t f;

    begin_f_loop(f,t)
    {
        F_CENTROID(x,f,t);
        z = x[2] + z0;
        if (z > 1){
            z = 1;
        }
        phiM = ((-4.7*z)/LMO);
        F_PROFILE(f, t, i) = (uStar/k)*(log(z/z0) -phiM );
    }
    end_f_loop(f,t)
}

/*****
/*
Temperature Profile
*****/

DEFINE_PROFILE(inletTemperatureStable,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real z;

```

```

real phiM, potenTemp, pressure, deltaT;
face_t f;

begin_f_loop(f,t)
{
  F_CENTROID(x,f,t);
  z = x[2] + z0;
  if (z > 1)
  {
    z = 1;
  }
  {
    if(z < 0.5)
    {
      deltaT = (z - z0) * 10;
    }
    else
    {
      deltaT = ((z - z0 - 0.5) * 40) + 5;
    }
  }
  phiM = ((4.7*z)/LMO);
  potenTemp = tetaS + (tetaStar/k)*(log(z/z0) +phiM);
  pressure = presOper*pow(tempOper/(tempOper+deltaT),(-
g*M)/(R*deltaT));
  F_PROFILE(f,t,i) = potenTemp/(pow(presOper/pressure,0.286));
}
end_f_loop(f,t)
}

```

APÊNDICE C – UDF CASO ESTÁVEL S2

```

#include "udf.h"
#include "math.h"

#define uStar 0.056
#define tetaStar 1.05
#define tetaS 298.2
#define LMO 0.22
#define z0 0.0023
#define k 0.42

#define g -9.80665
#define R 8.3144598
#define M 0.0289644

#define presOper 101325
#define tempOper 298.2

/*****
/*
Velocity Profile
*****/

DEFINE_PROFILE(inletVelocityStable,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real z;
    real phiM;
    face_t f;

    begin_f_loop(f,t)
    {
        F_CENTROID(x,f,t);
        z = x[2] + z0;
        if (z > 1){
            z = 1;
        }
        phiM = ((-4.7*z)/LMO);
        F_PROFILE(f, t, i) = (uStar/k)*(log(z/z0) -phiM );
    }
    end_f_loop(f,t)
}

/*****
/*
Temperature Profile
*****/

DEFINE_PROFILE(inletTemperatureStable,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real z;

```

```

real phiM, potenTemp, pressure, deltaT;
face_t f;

begin_f_loop(f,t)
{
  F_CENTROID(x,f,t);
  z = x[2] + z0;
  if (z > 1)
  {
    z = 1;
  }
  {
    if(z < 0.3)
    {
      deltaT = (z - z0) * 50;
    }
    else
    {
      deltaT = ((z - z0 - 0.3) * 6) + 15;
    }
  }
  phiM = ((4.7*z)/LMO);
  potenTemp = tetaS + (tetaStar/k)*(log(z/z0) +phiM);
  pressure = presOper*pow(tempOper/(tempOper+deltaT),(-
g*M)/(R*deltaT));
  F_PROFILE(f,t,i) = potenTemp/(pow(presOper/pressure,0.286));
}
end_f_loop(f,t)
}

```