

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ENGENHARIA DE ENERGIA

**MODELAGEM DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA ESTÁVEL E EFEITO DE ESTEIRA EM  
TURBINAS EÓLICAS OFFSHORE COM MODELO DE DISCO ATUADOR**

por  
**Felipe Molinari Ranzan**

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, 09 de agosto de 2024



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ENGENHARIA DE ENERGIA

**MODELAGEM DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA ESTÁVEL E EFEITO DE  
ESTEIRA EM TURBINAS EÓLICAS OFFSHORE COM MODELO DE DISCO  
ATUADOR**

por

Felipe Molinari Ranzan

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE **BACHAREL EM ENGENHARIA DE  
ENERGIA.**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne  
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientadora: Profa. Dra. Adriane Prisco Petry  
Co-orientador: Eng. Jahel Emmanuhel Motta da Silva

Banca examinadora:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Adriane Prisco Petry – DEMEC / UFRGS  
Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula – DEMEC / UFRGS  
MSc. Eng. Matheus Foschera Schuster

Porto Alegre, 09 de agosto de 2024

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Raul e Doris, e à minha irmã Bruna, pelo amor incondicional, por tudo que fizeram para que eu chegasse até esse momento e por serem meus maiores apoiadores.

Aos meus padrinhos, Roni e Laura, por todo o apoio, ensinamentos e almoços de domingo, em especial durante meu primeiro ano de curso, quando ainda aprendia a sobreviver na nova cidade.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por proporcionar este ensino público, gratuito e de excelência.

Ao Laboratório de Mecânica dos Fluidos da UFRGS, pela infraestrutura disponibilizada para realizar os estudos e as simulações computacionais deste trabalho e pelo acolhimento da equipe e colegas.

À minha orientadora, Professora Adriane Petry, pelo suporte, orientação e apontamentos ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador Jahel, que poderia ter sugerido que eu trocasse o assunto do trabalho quando percebeu os obstáculos que eu teria pela frente, mas decidiu aceitar o desafio sem pensar duas vezes. Foi um verdadeiro professor, me instigando a entender os conceitos por trás de cada detalhe do estudo, sempre disposto a sanar todas as dúvidas sem reclamar e comemorando junto comigo os resultados obtidos. Obrigado por ter me acompanhado da primeira à última simulação.

Ao Leonardo, irmão que a UFRGS me deu, por desbravar o curso de Engenharia de Energia comigo desde o início, compartilhando a rotina, os obstáculos e, acima de tudo, as conquistas ao longo do percurso.

Ao Gabriel, meu amigo de mais longa data, por toda vivência, conselhos e histórias compartilhadas nas caminhadas de fim de tarde ou em uma mesa de bar.

À todas as amigas que me acompanharam em algum momento dessa jornada.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo aplicar condições de estratificação térmica estável da camada limite atmosférica em uma simulação computacional e avaliar sua influência no efeito de esteira sobre um aerogerador. A simulação foi realizada por Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) no software ANSYS Fluent, pelo método de solução das Equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS). A turbina eólica foi modelada a partir da Teoria do Disco Atuador, usando como referência um modelo de aerogerador de 5 MW disponibilizado pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL). Os parâmetros geográficos utilizados se referem ao mar, em uma área afastada da costa do estado do Rio de Janeiro, para representar uma situação de produção eólica *offshore*. Foram feitas análises sobre o perfil de estratificação térmica da camada limite atmosférica nessa região de alto-mar, com o objetivo de identificar os parâmetros do perfil de vento termicamente estável e aplicá-los na simulação. Os resultados da simulação sem o disco atuador mostraram que, com o ajuste das equações de transporte do modelo de turbulência  $k - \epsilon$ , o perfil estável se manteve ao longo de todo o domínio. A região onde houve o maior decaimento foi na saída do domínio, onde a energia cinética de turbulência decaiu para 89% do seu valor de entrada para o caso Quase Estável e 81% para o caso Estável. Após, nas simulações com disco atuador são exibidos os contornos em corte para a esteira e a energia cinética turbulenta, bem como a comparação do perfil de esteira ao longo do domínio para duas classificações de camada limite estável.

**Palavras-chave:** Simulação, CFD, estratificação, energia eólica, offshore, efeito de esteira.

## ABSTRACT

This work aims to apply stable thermal stratification conditions of the atmospheric boundary layer in a computational simulation and evaluate its influence on the wake effect over a wind turbine. The simulation was performed by Computational Fluid Dynamics (CFD) in the ANSYS Fluent software, using the Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations (RANS) solution method. The wind turbine was modeled based on the Actuator Disk Theory, using as reference a 5 MW wind turbine model made available by the National Renewable Energy Laboratory (NREL). The geographic parameters used refer to the sea, in an area off the coast of the state of Rio de Janeiro, to represent an offshore wind production situation. Analyses were performed on the thermal stratification profile of the atmospheric boundary layer in this offshore region, aiming to identify the parameters of the thermally stable wind profile and apply them in the simulation. The results of the simulation without the actuator disk showed that, with the adjustment of the transport equations of the  $k - \varepsilon$  turbulence model, the stable profile was maintained throughout the domain. The region where the greatest decay occurred was at the domain outlet, where the turbulence kinetic energy decreased to 89% of its inlet value for the Quasi-Stable case and 81% for the Stable case. Afterwards, in the simulations with the actuator disk, the cross-sectional contours for the wake and the turbulent kinetic energy are displayed, as well as the comparison of the wake profile along the domain for the two classifications of stable boundary layers.

**Keywords:** simulation, CFD, stratification, wind energy, offshore, wake effect.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Perfil de velocidade do vento para diferentes estabilidades. . . . .	4
Figura 2 – Esquema das Etapas para a Simulação Computacional Realizada. . . . .	9
Figura 3 – $C_p$ e $C_t$ em função da velocidade do vento. . . . .	11
Figura 4 – Referência para o domínio da simulação. . . . .	13
Figura 5 – Vistas do Domínio da Simulação. . . . .	14
Figura 6 – Geometria do Disco Atuador. . . . .	15
Figura 7 – TKE para $k - \varepsilon$ <i>standard</i> . . . . .	18
Figura 8 – Estabilidade do modelo $k - \varepsilon$ . . . . .	19
Figura 9 – Contorno do Perfil de Velocidade (Plano $XZ$ ). . . . .	20
Figura 10 – Contorno do Perfil de Velocidade (Plano $XY$ ). . . . .	21
Figura 11 – Contorno da Energia Cinética Turbulenta (Plano $XY$ ). . . . .	21
Figura 12 – Esteira na altura do eixo - Quase Estável. . . . .	22
Figura 13 – Esteira na altura do eixo - Estável. . . . .	22
Figura 14 – Magnitude da Esteira (3, 5 e 7 diâmetros). . . . .	23
Figura 15 – Magnitude da Esteira (10 e 14 diâmetros). . . . .	23
Figura 16 – Velocidade e Pressão na altura do cubo. . . . .	24

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de Estabilidade Atmosférica de Gryning. . . . .	6
Tabela 2 – Constantes do Fluent para o Modelo $k - \varepsilon$ <i>Standard</i> . . . . .	7
Tabela 3 – Parâmetros Climatológicos ERA5. . . . .	10
Tabela 4 – Dimensões da Região da Esteira dentro do Domínio. . . . .	12
Tabela 5 – Dimensões Gerais do Domínio. . . . .	12
Tabela 6 – Validação dos perfis de $k$ ao longo do domínio sem o disco atuador. . . . .	19
Tabela 7 – Características Técnicas do Aerogerador de Referência - 5 MW. . . . .	32

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO . . . . .	1
1.1	Objetivos Gerais . . . . .	2
1.2	Objetivos Específicos . . . . .	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .	2
2.1	Efeito de Esteira em Turbinas Eólicas . . . . .	2
2.2	Camada Limite Atmosférica . . . . .	3
2.3	Estratificação Térmica e Perfis de Estabilidade Atmosférica . . . . .	3
2.4	Teoria da Similaridade de Monin Obukhov . . . . .	5
2.5	Modelo de Turbulência $k - \varepsilon$ . . . . .	6
2.6	Teoria do Disco Atuador . . . . .	8
3	METODOLOGIA E MODELAGEM . . . . .	8
3.1	Análise dos Parâmetros Climáticos . . . . .	8
3.2	Modelo de Aerogerador . . . . .	10
3.3	Domínio da Simulação . . . . .	11
3.4	UDF e Termos-fonte . . . . .	14
3.5	Funções de Entrada e Condições de Contorno . . . . .	17
4	RESULTADOS . . . . .	17
4.1	Estabilidade dos Perfis de Estratificação . . . . .	18
4.2	Simulação com Disco Atuador . . . . .	20
4.2.1	Resultados do Efeito de Esteira . . . . .	21
5	CONCLUSÕES . . . . .	24
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	25
	REFERÊNCIAS . . . . .	26
	APÊNDICE A – FUNÇÃO DEFINIDA PELO USUÁRIO (UDF). . . . .	28
	APÊNDICE B – ALGORITMO PARA CÁLCULO DO COMPRIMENTO CA- RACTERÍSTICO DE OBUKHOV. . . . .	30
	APÊNDICE C – CARACTERÍSTICAS TURBINA NREL 5 MW. . . . .	32



## 1 INTRODUÇÃO

A cada ano que passa, a produção de energia utilizando turbinas eólicas se consolida mais na matriz energética elétrica brasileira. De acordo com dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), em 2022 o Brasil alcançou o sexto lugar no Ranking Global de Capacidade Instalada *onshore* (termo para “em terra, para dentro da costa”), com mais de 24 GW de potência instalada, equivalente a 12,5% na matriz elétrica do país. No ano de 2024, a potência eólica instalada no Brasil já é de 28 GW, distribuída entre 978 parques eólicos e com previsão de mais de 81 GW em projetos, conforme dados do *Dashboard* de Eólicas da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024). Esses números destacam o potencial eólico do país e o quanto ainda pode-se expandir essa matriz energética.

Tal potencial eólico atrai a atenção de grandes empresas do setor de energia, porém com interesse em explorar a energia dos ventos em mar brasileiro. Parques eólicos *offshore*, (termo universal para os aerogeradores instalados em alto-mar), já são projetados principalmente nos litorais da região nordeste e também do Rio Grande do sul, totalizando 189 GW em licenciamento, de acordo com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 2024). As detentoras dos maiores projetos até o momento são as empresas Shizen, Shell, Ventos do Atlântico, Bluefloat Energy e Equinor. A motivação por trás do interesse de empresas petrolíferas em desenvolver um mercado eólico *offshore* é reduzir as emissões de carbono e compensar as emissões produzidas em seu processo de exploração de óleo e gás. Na busca por diversificar suas atividades e investir na produção de energia renovável, elas ainda podem eletrificar as operações das plataformas (EPBR, 2023). Ademais, o crescente interesse pelo hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis como a eólica, destaca ainda mais a importância da expansão da energia dos ventos.

Considerando o grande investimento que deverá ser feito para colocar turbinas eólicas em mares brasileiros, é preciso garantir a segurança e viabilidade técnica desse empreendimento, o que torna essencial o estudo e pesquisas nessa área. Uma das características técnicas analisadas antes de instalar um parque eólico é o efeito de esteira causado pelos aerogeradores. Em parques eólicos *onshore* é muito comum que a variação na velocidade do vento seja influenciada pela orografia da região, bem como pela presença de obstáculos e da vegetação. Quando se trata de uma instalação *offshore*, onde o relevo é geralmente o mesmo (mar calmo e ondas) e não há vegetação ou obstáculos, o fator que mais influencia no efeito de esteira é a estratificação térmica da camada limite atmosférica (CLA), que pode ser classificada como instável, neutra ou estável e depende de fatores como as estações do ano, temperatura do ar e do oceano e eventos climáticos.

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*), pode ser utilizada para simular o comportamento da esteira em diferentes situações e encontrar a solução que melhor se adequa ao parque eólico. Para o caso do efeito de esteira no mar brasileiro, ainda há poucas informações, o que torna mais importante a pesquisa aliada à simulação computacional.

Neste trabalho são realizadas simulações computacionais para avaliar a modelagem do perfil de estratificação térmica estável e seu impacto sobre o efeito de esteira em um aerogerador modelado a partir da Teoria do Disco Atuador. Além disso, a Teoria da Similaridade de Monin

Obukhov e a formulação das equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS, *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) com o modelo de turbulência  $k - \varepsilon$  no software ANSYS Fluent são utilizadas como base para a formulação das equações de transporte.

### 1.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral do presente trabalho é inserir o perfil de estratificação térmica estável em uma simulação CFD com foco em energia eólica e avaliar o seu comportamento. Além disso, observar o efeito de esteira sobre um aerogerador em condições *offshore* utilizando a teoria do disco atuador, para a condição de perfil estável na CLA.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Apresentação do efeito de esteira em turbinas eólicas de eixo horizontal e dos conceitos de camada limite atmosférica e perfil de estratificação térmica;
- Inserir, nas equações do software Ansys Fluent, termos-fonte capazes de manter o perfil de estratificação estável, ao longo de todo o domínio da simulação computacional, sem decaimento, a fim de garantir a validade do modelo;
- Observar o perfil de velocidade do vento para a região da Bacia de Santos e a classificação da estratificação térmica com base na escala de Obukhov, utilizando o banco de dados do ERA5 (ECMWF, *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) e visando aplicar o modelo para dias específicos com presença de estabilidade térmica;
- Realizar a simulação computacional de um modelo de aerogerador a partir da teoria do disco atuador, em condição *offshore* e a análise do efeito de esteira em situações de diferentes níveis de estratificação térmica estável.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados os principais conceitos e fundamentos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, equações fundamentais e modelos de simulação.

### 2.1 Efeito de Esteira em Turbinas Eólicas

O efeito de esteira está inteiramente relacionado com o vento que atravessa as pás dos aerogeradores. Quando o escoamento passa através do rotor, uma parte da energia cinética que ele carrega é convertida, fazendo com que ela diminua e, conseqüentemente, a velocidade do vento é reduzida. A jusante do aerogerador cria-se uma região caracterizada pela presença de vórtices chamada de esteira aerodinâmica (WHITE, 2018). Aerogeradores posicionados na direção de propagação da esteira são afetados pela instabilidade e queda de pressão do escoamento, sujeitos a maiores esforços mecânicos e menor qualidade do recurso eólico, produzindo, assim, menos energia elétrica (BURTON, 2011).

À medida que se distancia da turbina, a esteira tende a se dissipar, já que a grande massa de ar circundante estabiliza o escoamento novamente, promovendo uma homogeneização. Essa estabilização pode ser afetada devido à rugosidade do terreno e topografia do local (CUSTÓDIO, 2009).

Conforme explica Wenzel (2010), a distribuição dos aerogeradores no projeto de um parque eólico visa minimizar as perdas por esteira, adequando-os à direção predominante do vento. Dessa forma, os modelos numéricos utilizados para descrever o efeito de esteira devem ser capazes de dimensionar adequadamente os gradientes de velocidade e a variação da intensidade de turbulência consequentes desse fenômeno.

## 2.2 Camada Limite Atmosférica

A atmosfera da Terra pode ser dividida em várias camadas. Partindo do solo, a camada mais próxima é a troposfera, seguida por estratosfera, mesosfera e termosfera. A troposfera alcança até 10 km de distância da superfície terrestre, enquanto os aerogeradores mais modernos não passam de 200 m de altura no eixo do rotor, o que faz com que essa seja a camada de interesse para a análise do vento, da estratificação térmica e do efeito de esteira. Dentro da troposfera, na parte mais próxima do solo, forma-se a Camada Limite Atmosférica (CLA) que, de acordo com Burton (2011), tem suas propriedades afetadas principalmente pela intensidade do vento geostrófico, rugosidade da superfície, efeito Coriolis devido à rotação da Terra e efeitos térmicos.

Na altitude de interesse para turbinas eólicas de grande porte há dois fatores que influenciam significativamente as características do escoamento: o atrito do vento com a superfície e a transferência de energia térmica. Conforme Barriatto (2018), o atrito do escoamento com a superfície produz tensões cisalhantes que desaceleram o vento nas proximidades do solo, enquanto que a presença ou ausência de efeitos térmicos relevantes dentro da CLA muda as características do mesmo. Modelar computacionalmente a presença desses efeitos térmicos na atmosfera é um dos desafios deste trabalho.

## 2.3 Estratificação Térmica e Perfis de Estabilidade Atmosférica

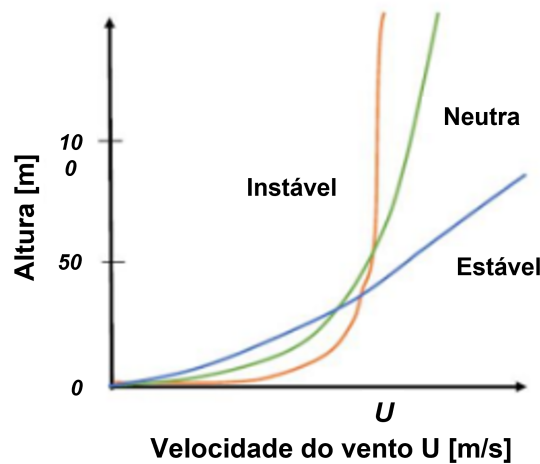
Para compreender a formação da camada limite, é essencial abordar o fenômeno da estratificação térmica. O que causa a variação diária de temperatura próxima ao solo não é a incidência de radiação solar direta na CLA (já que a maior parte dessa energia é absorvida pela superfície), mas sim a transferência de calor causada pela radiação incidente no solo é que provoca mudanças na Camada Limite Atmosférica, conforme explica Stull (2012).

Ainda segundo Stull (2012), a queda na temperatura padrão segue um perfil linear, sendo maior na superfície da Terra e diminuindo até a tropopausa. Dessa forma, para determinar a estabilidade da estratificação térmica na atmosfera padrão, é necessário compreender o que acontece quando uma parcela de ar é adiabaticamente deslocada para uma altura distinta da sua posição inicial. Em seu livro, Gasch e Twele (2011) resumem de forma geral o conceito: na situação em que o ar tenta se movimentar para diferentes alturas mas retorna para sua posição

inicial, diz-se que a atmosfera apresenta um perfil de estratificação térmica estável; enquanto que na situação onde o ar deslocado do seu ponto de partida continua sendo acelerado, trata-se de uma atmosfera com perfil de estratificação térmica instável; por último, se os vizinhos não aplicam força alguma sobre a parcela de ar (nem de empuxo contrário, nem de aceleração a favor da direção do escoamento de ar), é dito que a atmosfera está termicamente neutra.

Os perfis típicos de velocidade do vento em função das diferentes condições de estabilidade atmosférica são exibidos na Figura 1.

Figura 1 – Perfil de velocidade do vento para diferentes estabilidades.



Fonte: Adaptado de Albornoz et al. (2022).

Em seu livro, Stull (2012) cita que a espessura da CLA pode variar entre 200 m e 4000 m, dependendo da localização geográfica e apresentando ciclos diários. Seu comportamento para o período diurno, em regiões de céu claro, é de um solo com maior temperatura e que fornece mais energia térmica para a atmosfera. Isso leva a uma maior mistura nas parcelas de ar de diferentes temperaturas, ou seja, mais turbulência, que aumenta a região de temperatura potencial homogênea bem como a altura da camada limite turbulenta. Por outro lado, o comportamento noturno para regiões de céu claro e pouca umidade apresenta um solo com menor temperatura que o ar, diminuindo de forma considerável a turbulência do escoamento e, conseqüentemente, diminuindo a espessura da CLA.

O perfil vertical de velocidade do vento pode ser definido de acordo com (2.1):

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left[ \frac{z}{z_0} - \psi_m \left( \frac{z}{L_{obk}} \right) \right] \quad (2.1)$$

em que  $u_*$  representa a velocidade de fricção,  $K$  é a constante de von Kármán e  $z_0$  é o comprimento de rugosidade aerodinâmica do terreno. Além disso,  $\psi_m$  é o fator adimensional de correção da estabilidade, descrito em 2.2 para o caso de CLA estável.

$$\psi_m = -\beta\zeta \quad (2.2)$$

Para 2.2 tem-se que  $\Phi_m$  assume:

$$\Phi_m = 1 + \beta\zeta \quad (2.3)$$

sendo os valores de  $\beta = 5$  e  $\gamma_1 = 16$  obtidos a partir do trabalho experimental de Dyer (1974), enquanto que  $\zeta = z/L_{obk}$  depende de  $L_{obk}$ , parâmetro abordado com mais detalhes na próxima seção.

## 2.4 Teoria da Similaridade de Monin Obukhov

A Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov (MOST, *Monin-Obukhov Similarity Theory*) foi desenvolvida pelos meteorologistas soviéticos Andrei Monin e Alexander Obukhov na década de 1950, sendo um modelo fundamental na meteorologia e na física da camada limite atmosférica. A MOST é utilizada principalmente para descrever a estrutura da turbulência em relação à estabilidade térmica da Camada Limite Superficial (CLS).

De acordo com Hanna (2003), dentro da MOST, há hipóteses simplificadoras implícitas, que são:

- O escoamento do vento é horizontalmente homogêneo e quase estacionário;
- Os fluxos turbulentos de quantidade de movimento e de calor são constantes, e não dependem da altura;
- Trocas moleculares são insignificantes quando comparadas com trocas turbulentas de calor e quantidade de movimento;
- Os efeitos devido à rotação da Terra podem ser ignorados em regiões da CLA próximas à superfície.

Um dos conceitos centrais da teoria é o Comprimento Característico de Obukhov, que pode ser utilizado como uma medida da estabilidade térmica da camada limite. A MOST faz uso de funções de similaridade universais para descrever perfis verticais de variáveis atmosféricas como a velocidade do vento, a temperatura e a umidade do ar, em termos de variáveis adimensionais. Essas funções são determinadas empiricamente e dependem de um parâmetro de similaridade adimensional.

Neste trabalho, o comprimento de Obukhov,  $L_{obk}$ , é utilizado para verificar o perfil de estratificação térmica predominante na região geográfica analisada e para modelar o perfil de velocidade do vento na entrada do domínio computacional, na forma:

$$L_{obk} = -\frac{\Theta_\nu}{\kappa g} \frac{u_*^3}{\overline{\Theta'_\nu w'}} \quad (2.4)$$

sendo que  $u_*$  é a velocidade de fricção,  $\kappa$  a constante de von Kármán,  $g$  a gravidade,  $\Theta_\nu$  a temperatura potencial virtual e  $\overline{\Theta'_\nu w'}$  o fluxo de calor potencial virtual.

Em seu livro, Emeis (2018) explica que o fluxo de calor é considerado positivo se for direcionado da atmosfera para o solo (resfriando a atmosfera) e negativo se for em direção à atmosfera (aquecendo a atmosfera). Assim, uma camada de superfície instável é caracterizada por um comprimento de Obukhov negativo. O tipo estável da CLA, que é caracterizado por um fluxo de calor positivo partindo do ar para a superfície ( $L_{obk} > 0$ ) e uma estratificação térmica

estável do ar, geralmente é encontrado à noite e sobre águas que são mais frias do que o seu ar acima.

O uso do inverso de  $L_{obk}$ , ou seja,  $1/L_{obk}$ , como medida de estabilidade foi sugerido por Gryning et al. (2007), que definem as classes de estabilidade de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação de Estabilidade Atmosférica de Gryning.

Classe	Descrição	Condição
-4	Extremamente instável	$-50 \text{ m} < L_{obk} < 0 \text{ m}$
-3	Muito instável	$-100 \text{ m} < L_{obk} < -50 \text{ m}$
-2	Instável	$-200 \text{ m} < L_{obk} < -100 \text{ m}$
-1	Quase instável/neutra	$-500 \text{ m} < L_{obk} < -200 \text{ m}$
0	Neutra	$500 \text{ m} <  L_{obk} $
1	Quase estável/neutra	$200 \text{ m} < L_{obk} < 500 \text{ m}$
2	Estável	$50 \text{ m} < L_{obk} < 200 \text{ m}$
3	Muito estável	$10 \text{ m} < L_{obk} < 50 \text{ m}$
4	Extremamente estável	$0 \text{ m} < L_{obk} < 50 \text{ m}$

Fonte: Adaptado de Albornoz et al. (2022).

## 2.5 Modelo de Turbulência $k - \varepsilon$

Em problemas de engenharia que levam em conta os efeitos do vento, na maioria dos casos apenas os primeiros 200 m (ou menos) da camada limite atmosférica são de interesse. Como resultado, é essa camada superficial atmosférica que foi considerada no artigo de Richards e Hoxey (1993). Nele, os autores recomendam modelar a camada superficial atmosférica como uma camada superficial turbulenta horizontalmente homogênea (*Horizontally Homogeneous Turbulent Surface Layer*, HHTSL), com propriedades constantes nas direções tangenciais ao solo, sendo a única variação ao longo do eixo vertical. Ao final do estudo, concluíram que para modelar adequadamente a camada superficial atmosférica, as condições de contorno, o modelo de turbulência e as constantes associadas deveriam ser consistentes entre si. Ainda no mesmo trabalho, foi mostrado que na modelagem do escoamento atmosférico superficial em regime permanente e incompressível, utilizando o modelo de turbulência  $k - \varepsilon$  em duas dimensões, a existência de um escoamento homogêneo tem as seguintes implicações:

I - A velocidade vertical é zero;

II - A pressão é constante;

III - Tensão de cisalhamento constante;

IV - A energia cinética turbulenta  $k$  e sua taxa de dissipação  $\varepsilon$  satisfazem suas respectivas equações de conservação.

O modelo padrão  $k - \varepsilon$  é um modelo baseado em equações de transporte para a energia cinética da turbulência,  $k$  (*Turbulent Kinetic Energy*, TKE), e sua taxa de dissipação,  $\varepsilon$ . A equação de transporte do modelo para  $k$  é derivada da equação exata, enquanto a equação de transporte do modelo para  $\varepsilon$  é obtida utilizando raciocínio físico (FLUENT, 2022).

A TKE ( $k$ ) e sua taxa de dissipação ( $\varepsilon$ ) são obtidas a partir das seguintes equações de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.6)$$

Nessas equações,  $G_k$  representa a produção de energia cinética da turbulência devido aos gradientes de velocidade média.  $G_b$  é a produção de energia cinética da turbulência devido ao empuxo.  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  e  $C_{3\varepsilon}$  são constantes.  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  são os números de Prandtl turbulentos para  $k$  e  $\varepsilon$ , respectivamente.  $S_k$  e  $S_\varepsilon$  são termos-fonte definidos pelo usuário. A viscosidade turbulenta  $\mu_t$ , é calculada combinando  $k$  e  $\varepsilon$  da seguinte forma:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

em que  $C_\mu$  é uma constante.

Dentro do software Fluent, as constantes  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  possuem os valores expostos na Tabela 2 para o Modelo  $k - \varepsilon$  *Standard*, que foram determinados a partir de experimentos com escoamentos turbulentos fundamentais que demonstraram funcionar razoavelmente bem para uma ampla gama de escoamentos de cisalhamento livres e limitados por paredes (FLUENT, 2022).

Tabela 2 – Constantes do Fluent para o Modelo  $k - \varepsilon$  *Standard*.

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
1,44	1,92	0,09	1,00	1,30

Fonte: (FLUENT, 2022).

Blocken, Stathopoulos e Carmeliet (2007) e também Richards e Hoxey (1993) mostram que se as constantes do modelo forem escolhidas de tal forma a satisfazer a restrição  $\sigma_\varepsilon$ , chega-se a uma solução analítica para o modelo  $k - \varepsilon$  padrão, na forma:

$$\sigma_\varepsilon = \frac{k^2}{C_\mu^{\frac{1}{2}} (C_{2\varepsilon} - C_{1\varepsilon})} \quad (2.8)$$

Assim, neste trabalho, são adotados  $C_{1\varepsilon} = 1,176$  e  $C_\mu = 0,033$ , de acordo com o estudo de Alinot e Masson (2005), ao invés dos valores da Tabela 2. No entanto, apenas o ajuste das constantes não é suficiente para que o modelo  $k - \varepsilon$  possa sustentar um perfil de entrada de  $k$  que é variável com a altura. Dessa forma, Laan, Kelly e Sørensen (2017) propõem um novo método onde um termo-fonte analítico é adicionado na equação da TKE e um  $C_{3\varepsilon}$  variável é utilizado, de modo que perfis MOST estáveis e instáveis sejam mantidos ao longo de uma longa distância. A implementação dos termos-fonte para a correta solução do modelo estável é discutida na seção 3.

## 2.6 Teoria do Disco Atuador

A Teoria do Disco Atuador é utilizada para aproximar as forças aplicadas ao escoamento, atuando como um sumidouro de quantidade de movimento. As forças são implementadas no corpo como cargas ou, à medida que atravessam o disco, como termos fonte de quantidade de movimento negativa no escoamento. Considera-se a extração de energia e de quantidade de movimento do escoamento uniformemente distribuída ao longo do rotor do aerogerador. A intensidade da interação será dependente da velocidade do escoamento livre e também da diferença de pressão extraída do escoamento pelo disco.

De acordo com Froude (1920), na Teoria do Disco Atuador o termo fonte do sumidouro de quantidade de movimento está associado às forças tangenciais e axiais atuantes no disco pelo princípio da conservação de quantidade de movimento unidimensional. Assim, a força axial de empuxo pode ser expressa através do fator de indução axial da máquina, relativo à velocidade de corrente livre através de

$$T = 2\rho U_\infty^2 a(1 - a)A_D \quad (2.9)$$

em que  $T$  é a força de empuxo axial [ $N$ ],  $U_\infty$  a velocidade de vento livre no centro do rotor [ $m/s$ ],  $a$  o fator de indução axial e  $A_D$  é a área do rotor do aerogerador [ $m^2$ ], que é equivalente à área varrida pelas suas pás. O fator de indução axial é definido por:

$$a = 1 - \frac{C_p}{C_t} \quad (2.10)$$

com  $C_p$  e  $C_t$  sendo os coeficientes de potência e de empuxo, respectivamente, que variam de acordo com a velocidade do vento livre e são específicos para a curva de operação de cada modelo de aerogerador.

## 3 METODOLOGIA E MODELAGEM

Nesta seção são detalhadas as etapas para o desenvolvimento do trabalho, buscando obter os resultados da simulação do efeito de esteira no software ANSYS Fluent. As etapas do processo desenvolvido são apresentadas no esquema da Figura 2.

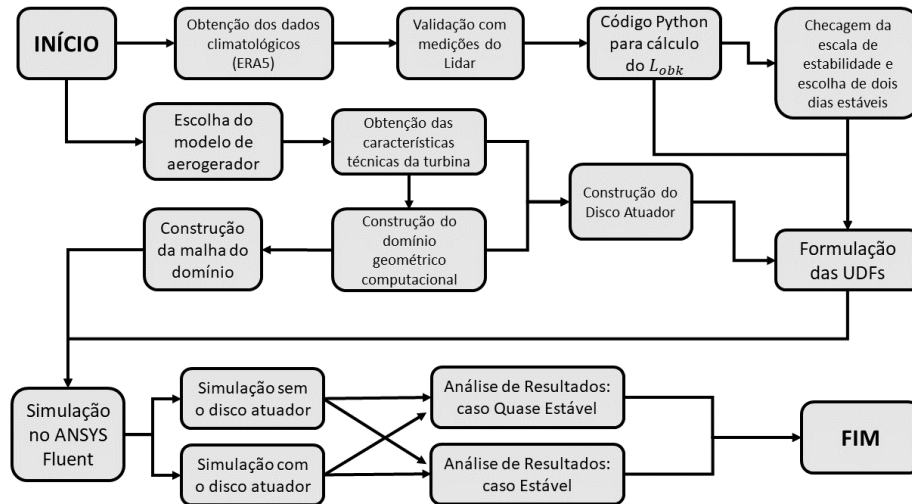
Primeiramente são observados e analisados os dados climáticos no período de um ano para a região de interesse. A partir desses dados, o comprimento de Obukhov é calculado Utilizando um algoritmo em linguagem de programação Python e são escolhidos dois dias com  $L_{obk}$  dentro da escala de classificação estável. Com isso, já é possível formular uma parte das Funções Definidas pelo Usuário (UDFs), cujo conteúdo completo encontra-se no Apêndice A. Paralelamente a isso, é escolhido um modelo de aerogerador de referência e seus parâmetros técnicos são utilizados para modelagem do domínio computacional e também do disco atuador, sendo esse último inserido também nas UDFs. Finalmente, pode-se executar a simulação dentro do software ANSYS Fluent e analisar os resultados.

### 3.1 Análise dos Parâmetros Climáticos

A região geográfica escolhida para o estudo foi o mar da Baía de Santos, no Bloco de Libra, a 160 km da costa do Rio de Janeiro. Utilizando o ERA5, foi possível obter, a partir



Figura 2 – Esquema das Etapas para a Simulação Computacional Realizada.



Fonte: O Autor.

das coordenadas geográficas do local, parâmetros como velocidade de fricção, comprimento de rugosidade aerodinâmica e temperatura superficial do mar. Em seguida, um código computacional em linguagem Python que utiliza os parâmetros disponíveis na base de dados ERA5 para o cálculo do Comprimento Característico de Obukhov foi adaptado com base no livro de Emeis (2018). Esse código para o cálculo de  $L_{obk}$  encontra-se no Apêndice B.

Visando validar os parâmetros obtidos no ERA5, os mesmos são comparados com medições realizadas por um sensor remoto LiDAR (*Light Detection and Ranging*) instalado nas mesmas coordenadas geográficas. As medições do sensor foram disponibilizadas pelo Núcleo de Integração de Estudos, Pesquisa e Inovação em Energia Eólica (NIEPIEE) da UFRGS. Analisando as medições do LiDAR, é possível encontrar um dia em que o vento apresente CLA com estratificação térmica estável, obter os parâmetros meteorológicos para o período no ERA5 e calcular o Comprimento de Obukhov a partir do código computacional.

Um dia propício encontrado, correspondente ao perfil estável, é 13 de maio de 2024, onde observa-se uma estabilidade leve às 16 h, a partir das medições do LiDAR. Ao verificar os parâmetros do ERA5 para esse mês, obtém-se  $L_{obk} = 476,94$ , ou seja, compatível com o comprimento de Obukhov para uma estratificação de escala "Quase Estável/Neutra", de acordo com a Tabela 1. Além disso, a diferença de temperatura entre o ar e a superfície do oceano é positiva para o respectivo horário, o que indica uma transferência de calor partindo do ar em direção à água, característico do perfil estável.

Para complementar a análise, é buscado também um dia em que  $L_{obk}$  se enquadre na escala "Estável". Esse valor é identificado para o dia 19 de novembro de 2023, às 02 h, mas apenas com base nos dados do ERA5, pois não há medições do LiDAR para essa data.

Dessa forma, a Tabela 3 exibe os parâmetros obtidos e calculados para ambos os períodos, que serão utilizados nas simulações computacionais deste trabalho.

Tabela 3 – Parâmetros Climatológicos ERA5.

	19/11/2023 - 02:00	13/05/2024 16:00
$L_{obk}$ [m]	111,31	476,94
Fluxo de calor $Q_s$ [ $W/m^2$ ]	0,00285	0,00120
Temperatura do ar a 2 m [K]	298,54	301,39
Temperatura superficial do mar [K]	298,02	300,45
Velocidade de fricção [m/s]	0,16	0,19
Rugosidade aerodinâmica [m]	0,000042	0,000054

Fonte: Adaptado do ERA5.

O Comprimento Característico de Obukhov, a velocidade de fricção e o comprimento de rugosidade aerodinâmica serão inseridos no ANSYS Fluent, utilizando uma Função Definida pelo Usuário (UDF, *User Defined Function*), cuja funcionalidade ainda será explicada na seção 3.4.

### 3.2 Modelo de Aerogerador

A fim de simular o efeito de esteira a partir da teoria do disco atuador, é necessário delimitar as proporções do disco e inseri-lo no domínio da simulação. Busca-se modelar o disco a partir das características de aerogeradores reais, desenvolvidos para o ambiente *offshore*, com dados disponíveis ao público e difundidos na literatura.

Oliveira e Carmo (2023), em seu estudo sobre modelagem aerodinâmica e simulação utilizando modelos atuadores, baseou-se em três aerogeradores de referência. O primeiro é um modelo de 5 MW da NREL, o segundo de 10 MW da DTU (*Danmarks Tekniske Universitet*) e um terceiro de 15 MW da IRENA (*International Renewable Energy Agency*). Suas curvas de potência e de empuxo estão disponíveis para acesso no próprio banco de dados das suas fabricantes. Com esses dados, é possível calcular o termo fonte, parâmetro que deve ser inserido na simulação para que o método de disco atuador funcione e o efeito de esteira possa ser observado.

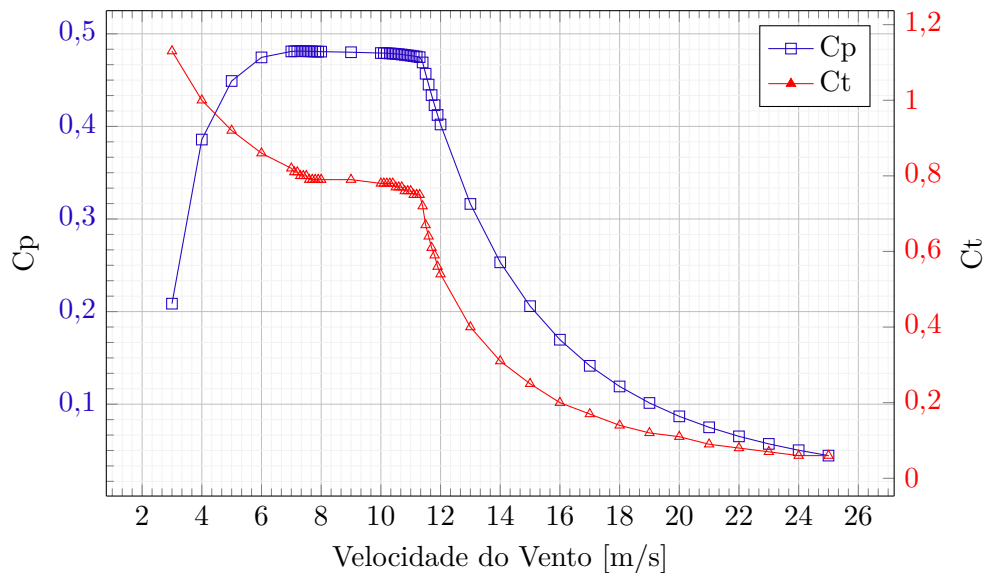
Como o objetivo deste trabalho não é comparar o desempenho de diferentes máquinas, o modelo escolhido (dentre os três citados) para a simulação foi o exemplar da NREL de 5 MW *offshore* (JONKMAN et al., 2009), por possuir uma potência de acordo com a que é utilizada pelo mercado eólico nos últimos anos, com parâmetros técnicos disponíveis para consulta pública e por já ter sido utilizado em outros estudos de efeito de esteira e de bloqueio, como é caso de Machado (2021). No Apêndice C são apresentadas as características do modelo de aerogerador utilizado na simulação.

Para a turbina de referência *offshore* o NREL definiu uma altura de cubo de 90 m a fim de manter o mesmo raio do aerogerador com a menor altura de cubo razoável possível, porém para as simulações aqui realizadas, foi utilizada uma altura de cubo de 154 m, conforme o trabalho de Machado (2021).

Com o modelo de aerogerador da NREL escolhido, são obtidas suas características operacionais em função da velocidade do vento: potência [kW], empuxo [kN] e os coeficientes adimensionais de potência ( $C_p$ ) e de empuxo ( $C_t$ ). A Figura 3 exibe as curvas de  $C_p$  e  $C_t$  para a turbina de 5 MW escolhida.

Pode-se observar na Figura 3 que o  $C_p$  cresce até a velocidade de 6,0 m/s, onde estabiliza próximo ao valor de 0,48 e se mantém até atingir uma velocidade de 11 m/s. Por outro lado, o  $C_t$  diminui com o aumento de  $C_p$ , se mantendo praticamente constante apenas de 8,0 a 11,0 m/s. Para velocidades maiores do que essa, os dois coeficientes decaem gradativamente.

Figura 3 –  $C_p$  e  $C_t$  em função da velocidade do vento.



Fonte: Adaptado de NREL.

### 3.3 Domínio da Simulação

O domínio da simulação se refere à envoltória da simulação e às condições de contorno definidas para o sistema, para que o software consiga resolver as equações de transporte e apresente resultados condizentes com a realidade.

Dessa forma, é necessário definir parâmetros como a distância da entrada do escoamento até o disco atuador, a distância deste até o final da esteira, o comprimento de rugosidade aerodinâmica considerada para o oceano, a massa específica e a temperatura do ar, a temperatura da água e o refinamento da malha modelada para esse domínio.

Para este trabalho, o domínio definido para a simulação é apresentado na Figura 4 e tem como base o estudo de Laan, Kelly e Sørensen (2017), por ter sido testado em situações semelhantes e validado considerando diferentes níveis de refinamento de malha em estudo prévio (LAAN et al., 2015).

De acordo com os autores desse trabalho, esse domínio computacional é adequado para simulações de esteira única, pois foi utilizado para testar a capacidade de manter os perfis de entrada da Teoria de Similaridade de Monin Obukhov. Dentro da geometria do domínio, por onde irá passar o escoamento, é definido um subdomínio para a região de esteira no qual uma turbina eólica representada como um disco atuador poderia ser colocada. No estudo, as dimensões do domínio da esteira são  $12D \times 3D \times 2D$  nas direções  $X$ ,  $Y$ , e  $Z$ , respectivamente, com  $D = 40$  m,

equivalente ao diâmetro do disco utilizado por eles. Para este trabalho,  $D$  possui um valor de 126 m, referente ao diâmetro do modelo escolhido de aerogerador (NREL de 5MW). Ainda no domínio da região de esteira, é utilizado um espaçamento uniforme de  $D/10$  entre os elementos na direção horizontal. Esse espaçamento é baseado em um estudo de sensibilidade de malha para domínio, realizado em um trabalho anterior dos mesmos autores, em 2015. A altura do primeiro elemento da malha é definida como 0,1 m, e os elementos vizinhos crescem proporcionalmente com a altura do domínio. Dentro da região da esteira prevalece a condição de que os elementos não excedem o tamanho de  $D/10$ .

Tanto no trabalho dos autores citados acima, quanto neste, o domínio foi modelado utilizando uma malha regular, de elementos hexaédricos, a partir do Método de Elementos Finitos. O número total de elementos obtidos na malha do estudo de Laan, Kelly e Sørensen (2017) foi de cerca de 1 milhão, enquanto que para as simulações aqui realizadas, foi produzida uma malha com 1,49 milhões de elementos. Além disso, devido ao fato de ter sido utilizado um domínio e uma malha que já foram testados para esse tipo de simulação, não foi feito um teste de Índice de Convergência de Malha, ou GCI (*Grid Convergence Index*), para avaliar o seu refinamento.

O domínio possui dimensões de  $16D$  tanto na largura quanto na altura. Para definir a sua extensão na direção  $X$ , no estudo de Laan, Kelly e Sørensen (2017) foi utilizado um parâmetro de comprimento variável  $X_{in}$  para investigar a capacidade de manter os perfis de entrada na localização hipotética do disco atuador. Esse parâmetro variava entre 1 km até 50 km a montante da entrada. Como essa variação da extensão da entrada do domínio não é o foco deste estudo, decidiu-se por incluir apenas 1 km de domínio a montante da região onde inicia a região de esteira.

Dessa forma, considerando um diâmetro de disco  $D = 126$  m, as dimensões determinadas para a região da esteira são exibidas na Tabela 4.

Tabela 4 – Dimensões da Região da Esteira dentro do Domínio.

Comprimento (eixo $X$ )	$14 D$	1764 m
Largura (eixo $Y$ )	$3 D$	378 m
Altura (eixo $Z$ )	$3 D$	378 m

Fonte: O Autor.

Enquanto que as dimensões totais do domínio computacional da simulação são exibidas na Tabela 5:

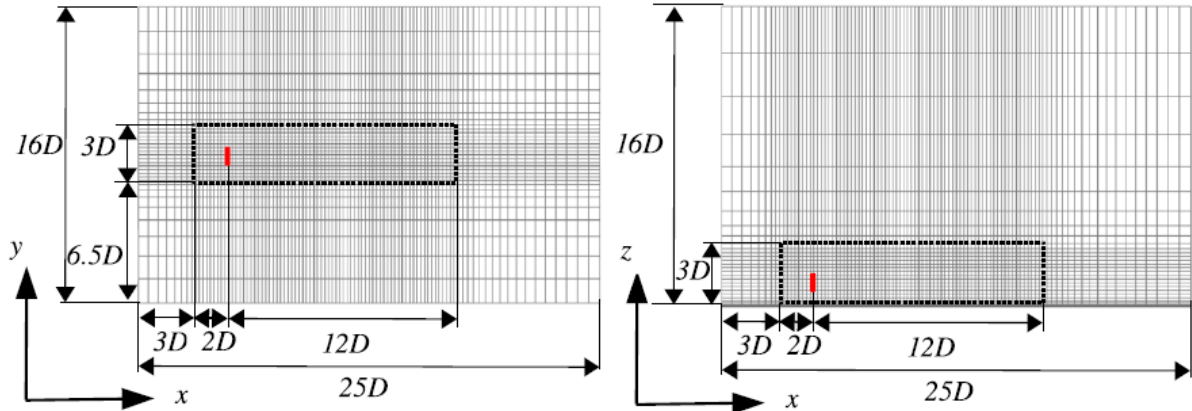
Tabela 5 – Dimensões Gerais do Domínio.

	Em Diâmetros	Em Metros
Comprimento a montante da esteira	$7,94 D$	1000 m
Comprimento a jusante da esteira	$10 D$	1260 m
Comprimento total	$29,94 D$	3772 m
Largura total	$16 D$	2016 m
Altura total	$16 D$	2016 m

Fonte: O Autor.

Na Figura 4 é apresentado o domínio computacional utilizado como referência. À esquerda na figura está a vista superior e à direita a vista lateral, sendo a direção do escoamento da esquerda para a direita. O tracejado em preto demarca a região da esteira e o disco atuador é ilustrado como um traço vermelho dentro dela.

Figura 4 – Referência para o domínio da simulação.



Fonte: Laan et al. (2015).

Baseado nesse estudo de referência, é preciso modelar mais alguns parâmetros do domínio da simulação. Para determinar a quantidade de camadas ( $N$ ) no eixo vertical, foi feita uma progressão geométrica, conforme 3.1:

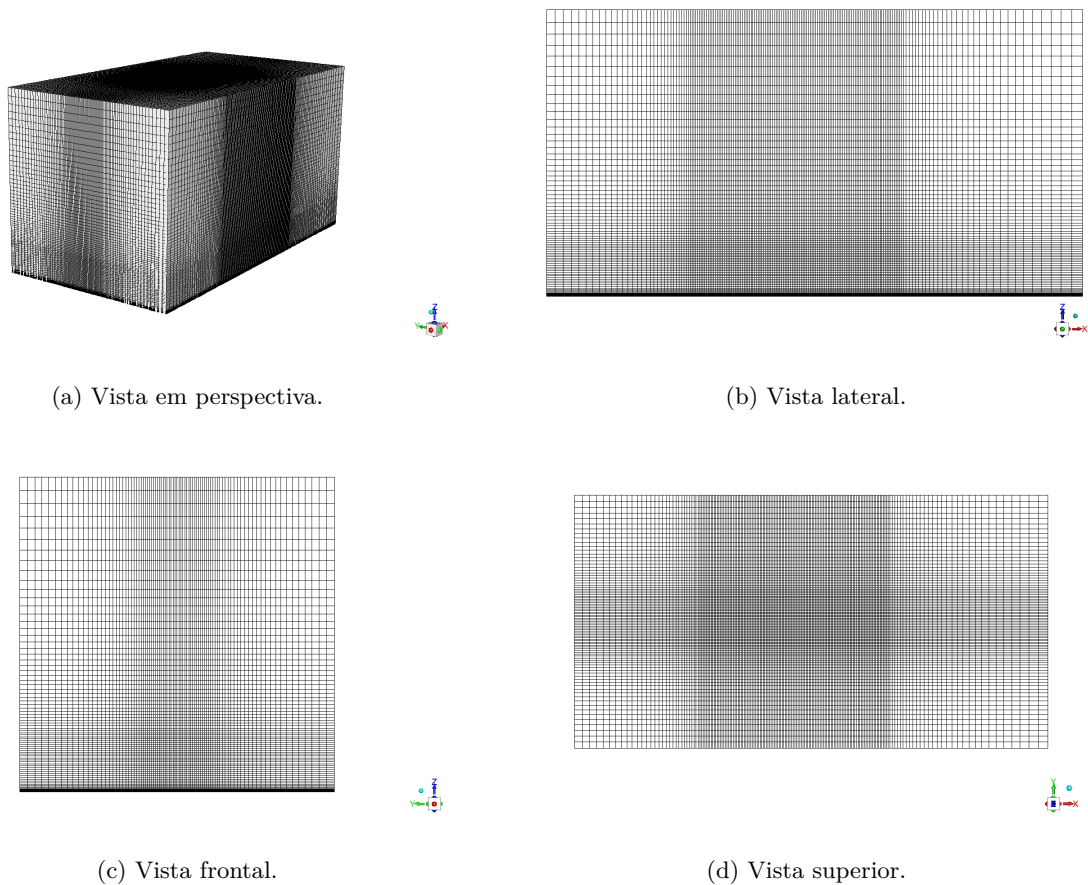
$$a_N = z_p C^N \quad (3.1)$$

em que  $a_N$  é o tamanho máximo de camadas que pode haver na região da esteira (ou seja,  $D/10$ ),  $z_p$  é o tamanho do elemento inicial, 0,1 m, e  $C$  é a taxa de crescimento da progressão, arbitrada em 1,2. Rearranjando os termos em 3.1 e aplicando o logaritmo natural em ambos os lados da igualdade, obtém-se um total de 26 camadas. Esse valor é utilizado como um parâmetro de entrada na configuração da malha no ANSYS Fluent para criar a malha de acordo com a que foi feita em Laan et al. (2015).

Para a etapa de modelagem da geometria do domínio foi utilizado o software ANSYS *Space Claim*. Em seguida, o arquivo computacional contendo esse volume geométrico é exportado para o software ANSYS Fluent, onde é possível produzir a malha regular de elementos finitos. Nesse momento são aplicadas as subdivisões das camadas para a região da esteira, respeitando as condições recomendadas no trabalho de Laan, Kelly e Sørensen (2017). O resultado visual da malha pronta é apresentado na Figura 5:

Pode-se perceber regiões mais escuras na figura, representando a região de análise da esteira, assim como a progressão geométrica aplicada fica visível ao longo do eixo vertical. A camada mais próxima da parede, com seu tamanho inicial de 0,1 m, cresce de acordo com a progressão geométrica calculada. Dessa forma, perto da parede, ou base do domínio, há muitos elementos juntos, o que dá o tom mais escuro. Conforme vão subindo, os elementos vão ficando maiores e mais dispersos até o topo do domínio, na região externa à esteira.

Figura 5 – Vistas do Domínio da Simulação.



Fonte: O Autor.

É importante ressaltar que a geometria do disco atuador não é modelada junto com o domínio, sendo especificada e separada no Fluent, como pode ser visto na Figura 6.

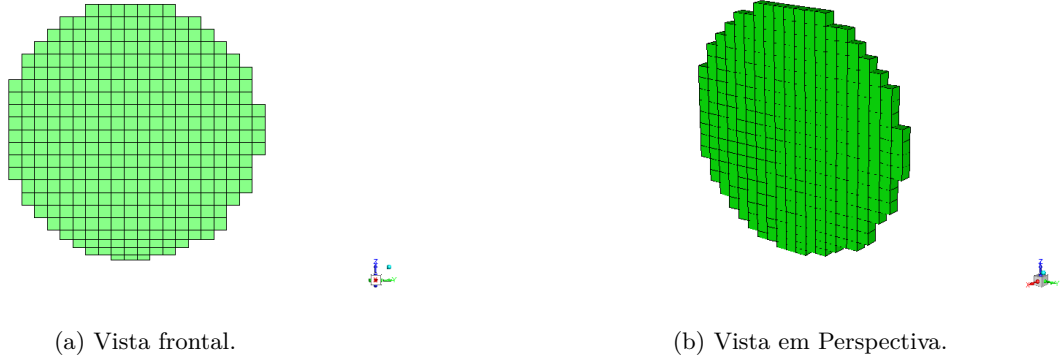
Para que o software entenda que existe uma região específica atuando como um sumidouro de energia, é necessário acrescentar um termo-fonte que aplique uma força contrária à do escoamento e esteja posicionado nas coordenadas do domínio onde o aerogerador teoricamente deveria estar. A forma de aplicar esse termo fonte é detalhada na próxima seção.

### 3.4 UDF e Termos-fonte

Uma função definida pelo usuário, ou UDF (*User-Defined Function*), é uma função que o próprio usuário programa e que pode ser carregada dinamicamente dentro do solucionador do ANSYS FLUENT para aprimorar as funcionalidades padrão do software. Uma UDF pode ser utilizada, por exemplo, para definir as condições de contorno, propriedades dos materiais e termos-fonte para o regime de escoamento e inicializar uma solução ou aprimorar o pós-processamento.

As UDFs são escritas na linguagem de programação C usando qualquer editor de texto, e o arquivo de código-fonte é salvo com a extensão ".c".

Figura 6 – Geometria do Disco Atuador.



Fonte: O Autor.

Neste trabalho foram implementadas UDFs para definir os perfis de velocidade, de energia cinética turbulenta ( $k$ ) e da taxa de dissipação ( $\varepsilon$ ) na entrada, assim como para o ajuste do comprimento de rugosidade aerodinâmica, para os termos-fonte que complementam as equações de transporte de  $k$  e de  $\varepsilon$  e, por fim, o termo-fonte responsável pela representação e funcionalidade do disco atuador. O bloco de texto com a UDF completa encontra-se no Apêndice A.

A seguir, é apresentado o termo-fonte  $S_k$ , proposto por Laan, Kelly e Sørensen (2017), que se faz necessário na equação de transporte da energia cinética turbulenta ( $k$ ) para que o perfil não decaia ao longo do escoamento em situações de estratificação não-neutra:

$$S_k = \frac{u_*^3}{kL} \left( 1 - \frac{\Phi_h}{\sigma_\theta \Phi_m} - \frac{C_{KD}}{4} \Phi_m^{-\frac{7}{2}} \Phi_\varepsilon^{-\frac{3}{2}} f_{st}(\zeta, \beta) \right), \quad \zeta > 0 \quad (3.2)$$

sendo zeta o parâmetro de estabilidade,  $\sigma_\theta$  o número de Prandtl turbulento,  $\beta$ ,  $\Phi_m$  e  $\Phi_h$  funções analíticas utilizadas para estratificação estável e instável e  $\Phi_\varepsilon$  a taxa de dissipação turbulenta normalizada. A constante  $C_{KD}$  é definida por:

$$C_{KD} = \frac{k^2}{\sigma_k \sqrt{C_\mu}} \quad (3.3)$$

e a função de estabilidade  $f_{st}(\zeta, \beta)$  por:

$$f_{st}(\zeta, \beta) = (2 - \zeta) - 2\beta\zeta(1 - 2\zeta + 2\beta\zeta) \quad (3.4)$$

Para obter o termo-fonte  $S_k$ , é necessário calcular a taxa de produção ou destruição turbulenta da energia cinética turbulenta (TKE) devido ao empuxo, que pode ser escrita como  $B$ , e é adaptada de Laan, Kelly e Sørensen (2017):

$$B = -\mu_T \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \frac{\zeta}{\sigma_\theta} \frac{\Phi_h}{\Phi_m^2} \quad (3.5)$$

Na UDF da energia cinética turbulenta, o termo-fonte  $S_k$  é então multiplicado por  $\rho$  e subtraído de  $B$ .

Por conseguinte, Laan, Kelly e Sørensen (2017) mostram que a inconsistência na equação de transporte de  $\varepsilon$  pode ser resolvida com uma parametrização da constante  $C_{\varepsilon,3}$ , de acordo com 3.6:

$$C_{\varepsilon,3}(\zeta) = \frac{\sigma_\theta}{\zeta} \frac{\Phi_m}{\Phi_h} \left( C_{\varepsilon,1} \Phi_m - C_{\varepsilon,2} \Phi_\varepsilon + [C_{\varepsilon,2} - C_{\varepsilon,1}] \Phi_\varepsilon^{-\frac{1}{2}} f_\varepsilon(\zeta) \right) \quad (3.6)$$

em que  $f_\varepsilon(\zeta)$  é definido por:

$$f_\varepsilon(\zeta) = \begin{cases} \Phi_m^{\frac{5}{2}} \left( 1 - \frac{3}{4} \gamma_1 \zeta \right) & \zeta < 0 \\ \Phi_m^{-\frac{5}{2}} (2\Phi_m - 1) & \zeta > 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

Com a aplicação desses dois termos-fonte na simulação, é possível executar o programa considerando apenas o domínio vazio, sem disco, e verificar se o perfil ainda irá decair ao longo da extensão do domínio ou se irá se manter. Caso se mantenha, significa que o modelo funcionou como esperado para uma condição de estratificação térmica não neutra e é possível seguir para as simulações, agora com a inserção do disco atuador.

Para a definição do termo-fonte de sumidouro de quantidade de movimento utilizado pelo disco atuador, foi utilizada a Eq. (2.9), porém com uma velocidade de vento livre considerada constante para toda a área do disco, a fim de facilitar sua modelagem. Dessa forma, é preciso encontrar uma maneira de calcular a velocidade média para a área do disco. Primeiramente, são obtidos os parâmetros de comprimento de rugosidade aerodinâmica, velocidade de fricção e Comprimento Característico de Obukhov do ERA5 para os dias típicos a serem simulados, conforme a Tabela 3. Feito isso, pode-se calcular a velocidade do vento para cada altura dentro da área do disco, partindo do ponto mais baixo da pá até o ponto mais alto, ou seja, de 90 m até 217 m. Obtida a velocidade média, ainda é preciso calcular o fator de indução axial, que depende dos coeficientes de potência,  $C_p$ , e empuxo,  $C_t$ , conforme visto na Eq. (2.10).

Esses dois parâmetros adimensionais são característicos do modelo de turbina escolhido e são disponibilizados pelo NREL (NREL, 2024). Ao calcular os dois parâmetros, é realizada uma interpolação linear com base nos valores de operação da turbina disponibilizados, a fim de corresponderem à velocidade média de vento calculada.

Tendo todos os parâmetros necessários, calcula-se a força de empuxo conforme a Eq. (3.8) e, conseqüentemente, o termo-fonte para o disco atuador, que corresponde ao empuxo por unidade de volume em 3.9:

$$T = 2\rho \bar{U}_\infty^2 a(1-a) A_{célula} \quad (3.8)$$

$$S_u = -T/v \quad (3.9)$$

Como o termo fonte é aplicado em cada célula,  $v$  é o volume da célula e  $A_{célula}$  é a área da célula.

Por fim, considerando a importância do comprimento de rugosidade aerodinâmica associado à CLA, é realizado um ajuste por UDF nele, baseado no estudo de Blocken, Stathopoulos e



Carmeliet (2007). Esse ajuste consiste na modificação da rugosidade que é utilizada pelo software, que é baseada em experimentos com rugosidade de grãos de areia. Assim, o comprimento de rugosidade aerodinâmica assume um valor 20 vezes maior do que a rugosidade de areia.

Com os termos-fonte prontos, resta definir as funções de entrada da simulação, que também são inseridas no formato de UDF, e as condições de contorno aplicadas ao software.

### 3.5 Funções de Entrada e Condições de Contorno

Para solucionar as equações apresentadas na seção 2.4, é essencial especificar e implementar corretamente as condições de contorno e as aproximações iniciais da simulação no software a ser utilizado. Na fronteira de entrada do domínio, devem ser prescritos os perfis de velocidade horizontal, temperatura, energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação. Considerando a presença de condições homogêneas e estacionárias, tem-se que o perfil de velocidade do vento é descrito por perfis logarítmicos com os parâmetros de escala  $L_{obk}$  e  $u$ , presentes na Equação (2.1), de acordo com os conceitos apresentados na seção 2.4.

Os perfis de entrada para a TKE ( $k$ ) e sua taxa de dissipação ( $\varepsilon$ ) também são obtidos em função do comprimento adimensional,  $z/L_{obk}$ , como mostram as Eqs. (3.10) e (3.11), respectivamente:

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \left( \frac{\Phi_\varepsilon}{\Phi_m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa(z + z_0)} \Phi_\varepsilon \quad (3.11)$$

sendo  $u_*$  a velocidade de fricção,  $C_\mu$  uma constante,  $\kappa$  a constante de von Kármán,  $z$  a altura no ponto de análise e  $z_0$  o comprimento de rugosidade aerodinâmica.

Dentro do software Fluent, a característica geral do solucionador é baseada em pressão, em regime estacionário. O perfil de velocidade  $U(z)$  é aplicado na entrada e no topo do domínio. Os perfis de  $k$  e  $\varepsilon$  são aplicados na entrada, no topo, no interior do domínio e também no disco atuador. Para as laterais do domínio é aplicada uma condição de simetria, enquanto que para a parede é aplicada a condição de parede estacionária, sem deslizamento, além do ajuste de comprimento de rugosidade aerodinâmica.

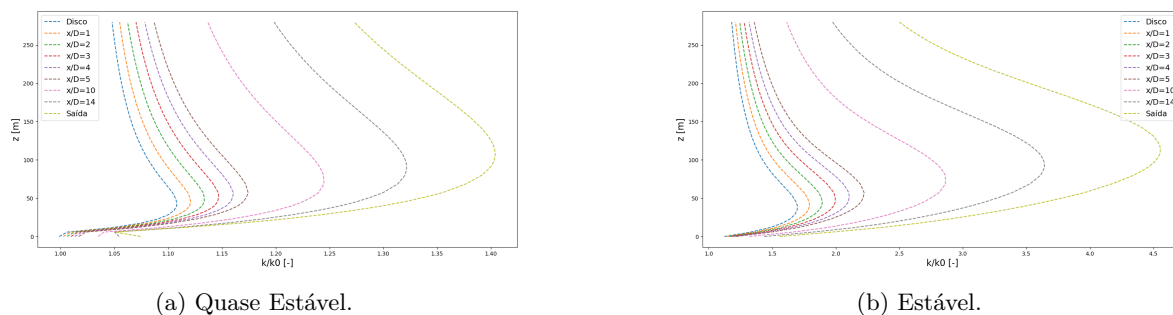
## 4 RESULTADOS

As simulações no software Fluent foram divididas em 3 partes: primeiramente sem o disco atuador, para verificar se o perfil de estratificação estável modelado se mantém ao longo de todo o domínio para as duas escalas de estabilidade observadas; em seguida, simulação com o disco atuador em CLA de classificação Quase Estável; e por fim disco atuador em CLA Estável. Os resultados obtidos foram analisados no software CFD Post, responsável por fazer o pós-processamentos dos resultados numéricos, possibilitando produzir gráficos, figuras e tabelas de dados que facilitam e enriquecem a análise da simulação.

#### 4.1 Estabilidade dos Perfis de Estratificação

A primeira simulação realizada no software Fluent foi sem o disco atuador e sem os termos-fonte, a fim de verificar o comportamento do modelo  $k - \varepsilon$  *standard*. A maior variação entre os perfis de  $U$ ,  $k$  e  $\varepsilon$  observados acontece para Energia Cinética Turbulenta. Sua magnitude para os casos Quase Estável e Estável é exibida na Figura 7.

Figura 7 – TKE para  $k - \varepsilon$  *standard*.



Fonte: O Autor.

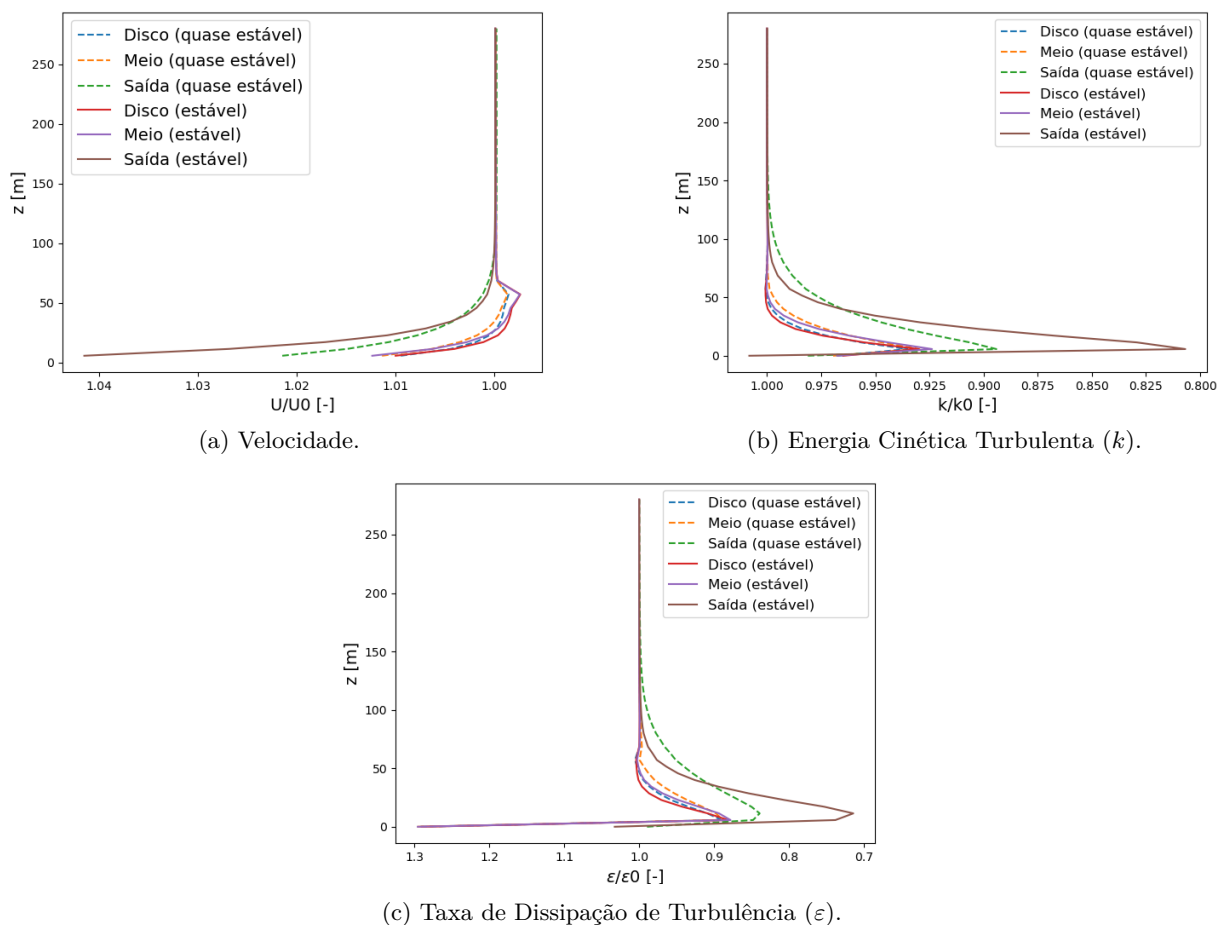
É possível perceber que para o caso Quase Estável a variação chega a 140% em relação ao seu valor na entrada do domínio. Para o caso Estável, a variação é ainda maior, com a turbulência na saída do domínio chegando a 450% do seu valor entrada.

Em seguida, são feitas as simulações com os termos-fonte do modelo  $k - \varepsilon$  aplicados, com o objetivo de analisar se foram corretamente inseridos na UDF e se seus perfis se mantêm ao longo de todo o domínio computacional. A partir da simulação dos casos Quase Estável ( $L_{obb} = 476, 94$ ) e Estável ( $L_{obb} = 111, 31$ ), é possível analisar o comportamento dos perfis de velocidade do vento, energia cinética turbulenta ( $k$ ) e taxa de dissipação da turbulência ( $\varepsilon$ ). Na Figura 8 foram escolhidos três pontos do domínio a fim de mostrar os resultados obtidos para os perfis: na região do disco, na metade do domínio e também na saída, para ambos os casos de estabilidade. os três perfis foram adimensionalizados por  $U_0$ ,  $k_0$  e  $\varepsilon_0$ , respectivamente.

Pode-se perceber que próximo à parede do domínio,  $k$  e  $\varepsilon$  possuem um comportamento contrário ao desejado, com saltos repentinos, mais pronunciados na saída do domínio. Com o aumento da altura o perfil vai se ajustando, de forma que ao atingir a área varrida pelas pás da turbina eólica, zona de interesse desse estudo, seu comportamento é praticamente o mesmo da entrada do domínio.

Comparando a variação da TKE no modelo  $k - \varepsilon$  *standard* da Figura 7 com sua versão melhorada da Figura 8b, pode-se perceber a efetividade das correções aplicadas. Com os termos-fonte aplicados, o perfil da energia cinética turbulenta na altura do eixo do rotor é praticamente constante ao longo de todo domínio, o que não ocorre no modelo  $k - \varepsilon$  *standard*. A Tabela 6 exhibe os valores médios e mínimos para o perfil da energia cinética turbulenta, na região do disco (entre 90 m e 217 m de altura) em relação ao perfil na entrada do domínio, para simulação sem o disco atuador, e também os resultados para os valores mínimos obtidos na saída do domínio.

O principal ponto a se destacar é que ao chegar à região onde estaria situado o disco

Figura 8 – Estabilidade do modelo  $k - \varepsilon$ .

Fonte: O Autor.

Tabela 6 – Validação dos perfis de  $k$  ao longo do domínio sem o disco atuador.

Condição	Posição	$k/k_0$ [%]	Altura [m]
Quase Estável	Disco (Média)	99,990	-
Quase Estável	Disco (Mínima)	99,974	108,57
Quase Estável	Saída	89,410	5,71
Estável	Disco (Média)	99,996	-
Estável	Disco (Mínima)	99,979	97,14
Estável	Saída	80,682	5,71

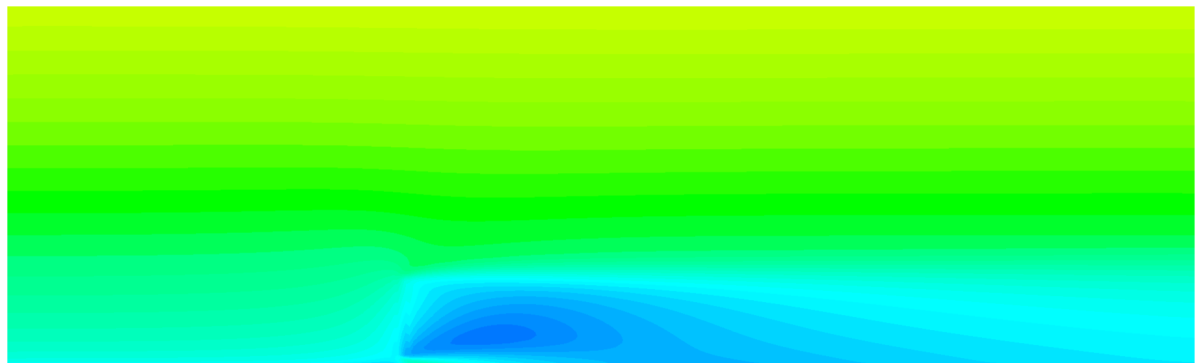
Fonte: O Autor.

atuador, o perfil da energia cinética de turbulência mantém, em média, 99,99% da sua magnitude na entrada do domínio, tanto para o caso Quase Estável quanto para o Estável. A partir dos 90 m de altura, para a mesma região, a menor magnitude corresponde a 99,97% do valor da entradas. Além disso, pode-se observar que na saída do domínio, onde ocorre o maior decaimento, os valores mais baixos encontram-se muito próximos à parede, a aproximadamente 6 m de altura, chegando a aproximadamente 81% do inicial. Esses resultados mostram que o modelo cumpre sua função de simular o perfil de estratificação térmica estável, principalmente na região de atuação do aerogerador.

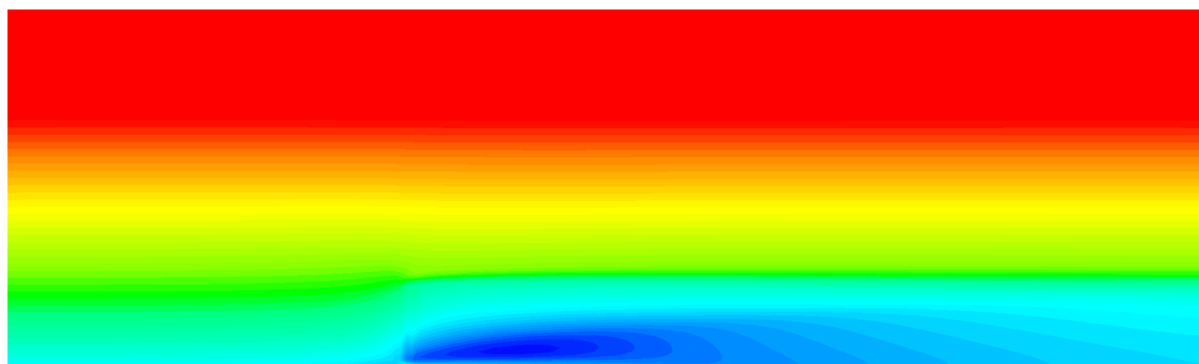
## 4.2 Simulação com Disco Atuador

Com o perfil do escoamento estável validado, foi possível prosseguir para a simulação com o disco atuador inserido no domínio e analisar o efeito de esteira associado. Ao cortar o domínio ao meio no eixo  $Y$  (criando um plano nos eixos  $X$  e  $Z$ ), foi possível exibir os resultados para os contornos de velocidade vertical, exibidos em vista lateral na Figura 9.

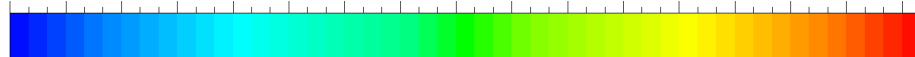
Figura 9 – Contorno do Perfil de Velocidade (Plano  $XZ$ ).



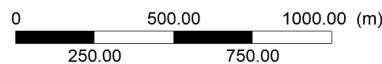
(a) Perfil Quase Estável.



0.0 1.2 2.4 3.7 4.9 6.1 7.3 8.6 9.8 11.0 12.2 13.5 14.7 15.9 17.1 18.4 19.6



Velocidade [ m/s ]



(b) Perfil Estável.

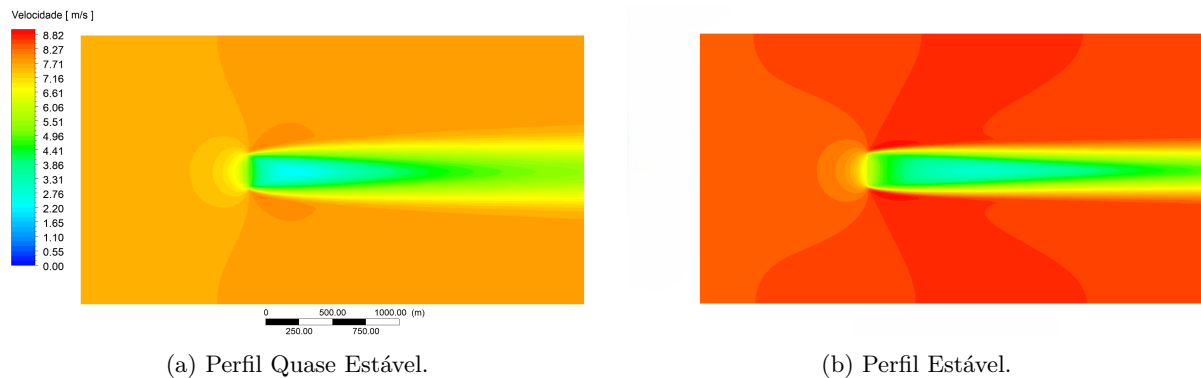
Fonte: O Autor.

Pode-se perceber o surgimento de uma região de baixa velocidade logo atrás do disco atuador, sendo muito mais marcante e prolongada no caso Estável.

Ainda analisando o perfil de velocidade do vento, mas dessa vez com um corte na altura do centro do disco (criando um plano horizontal nos eixos  $X$  e  $Y$ ), pode-se observar o prolongamento da esteira até a saída do domínio por uma vista superior na Figura 10. Pode-se observar uma velocidade de vento livre mais alta para o caso Estável em relação ao Quase Estável, o que é característico desse perfil de estratificação. Entretanto, é possível visualizar que dentro da esteira

surge uma região de baixa velocidade mais destacada no caso Estável do que no caso Quase Estável, o que indica que quanto mais estável for o perfil, maior o prolongamento do efeito de esteira.

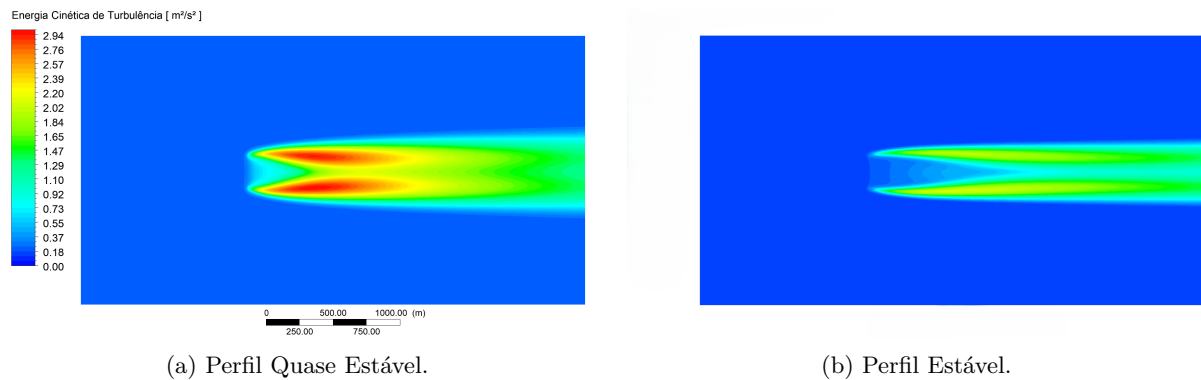
Figura 10 – Contorno do Perfil de Velocidade (Plano  $XY$ ).



Fonte: O Autor.

Utilizando o mesmo plano em corte horizontal, é possível visualizar o comportamento da energia cinética de turbulência vista à altura do eixo do rotor, exibida na Figura 11. Pode-se perceber que para o caso Quase Estável, há uma zona de maior turbulência logo após o escoamento atravessar o disco, o que faz com que o vento se recupere mais rapidamente. No caso Estável a turbulência é menor ao atravessar o disco, o que prolonga a esteira por maiores distâncias.

Figura 11 – Contorno da Energia Cinética Turbulenta (Plano  $XY$ ).

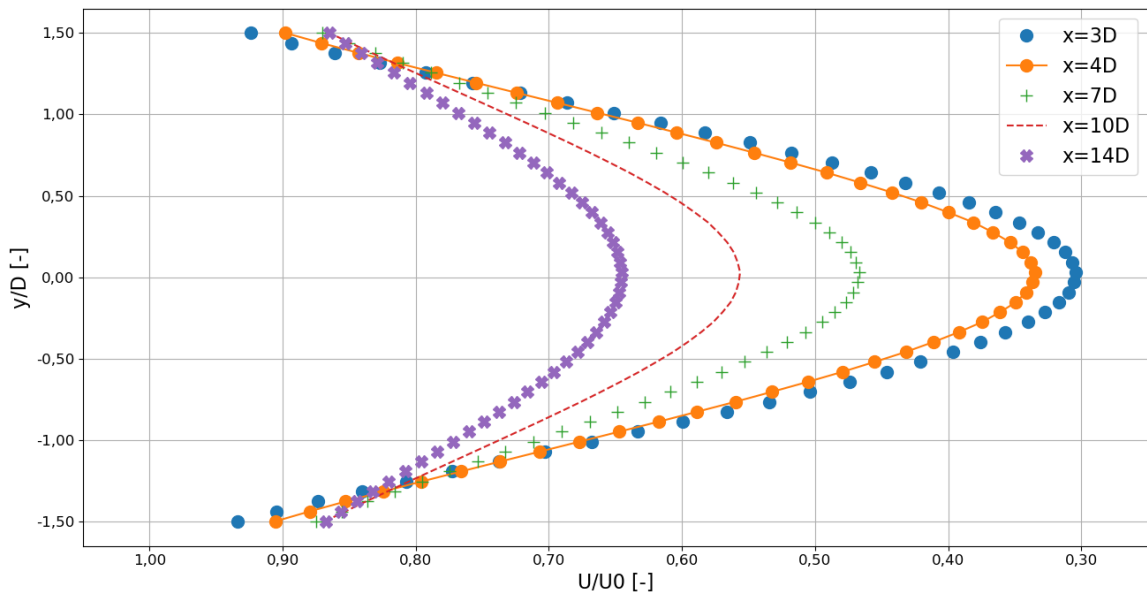


Fonte: O Autor.

#### 4.2.1 Resultados do Efeito de Esteira

Para comparar o efeito de esteira entre as duas classificações de estabilidade atmosférica simuladas, é observado o comportamento da velocidade do vento na altura do eixo do disco, com um corte em plano horizontal, de forma que se tenha uma vista superior do domínio (um plano nos eixos  $X$  e  $Y$ ). A Figura 12 exhibe a esteira para o caso Quase Estável, considerando diferentes pontos ao longo do domínio, na direção do escoamento.

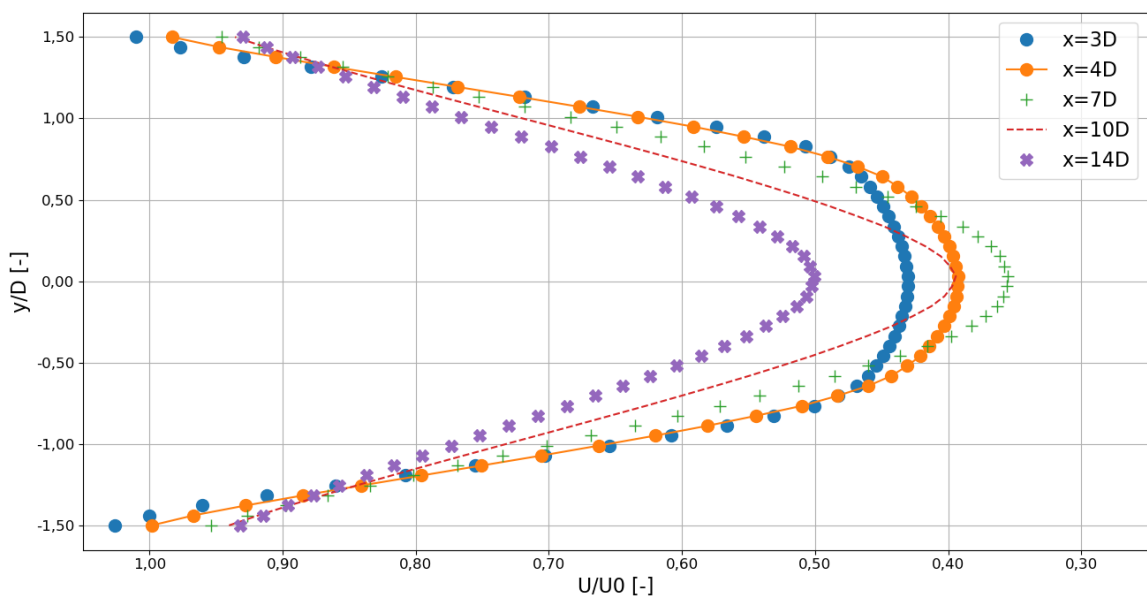
Figura 12 – Esteira na altura do eixo - Quase Estável.



Fonte: O Autor.

A Figura 13 também exibe a esteira, mas para o caso Estável, nos mesmos pontos de verificação.

Figura 13 – Esteira na altura do eixo - Estável.

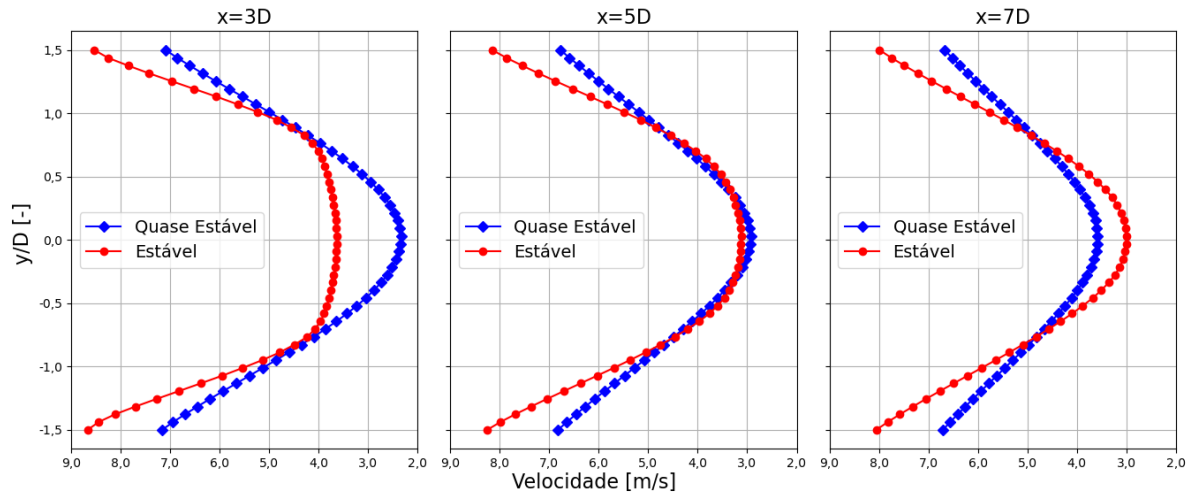


Fonte: O Autor.

O caso Quase Estável apresenta o seu ponto de menor velocidade no centro do plano horizontal, a 3 diâmetros de distância do aerogerador, chegando a aproximadamente 2,3 m/s. A partir dessa distância, o vento começa a recuperar velocidade. Já para o caso Estável, a velocidade mínima nessas mesmas condições é de 3,0 m/s, a uma distância de 7 diâmetros. Dessa forma, tem-se uma diferença de 4D entre os casos Quase Estável e Estável, o equivalente a 504 m.

Ambos os resultados podem ser visualizados com mais detalhes na Figura 14.

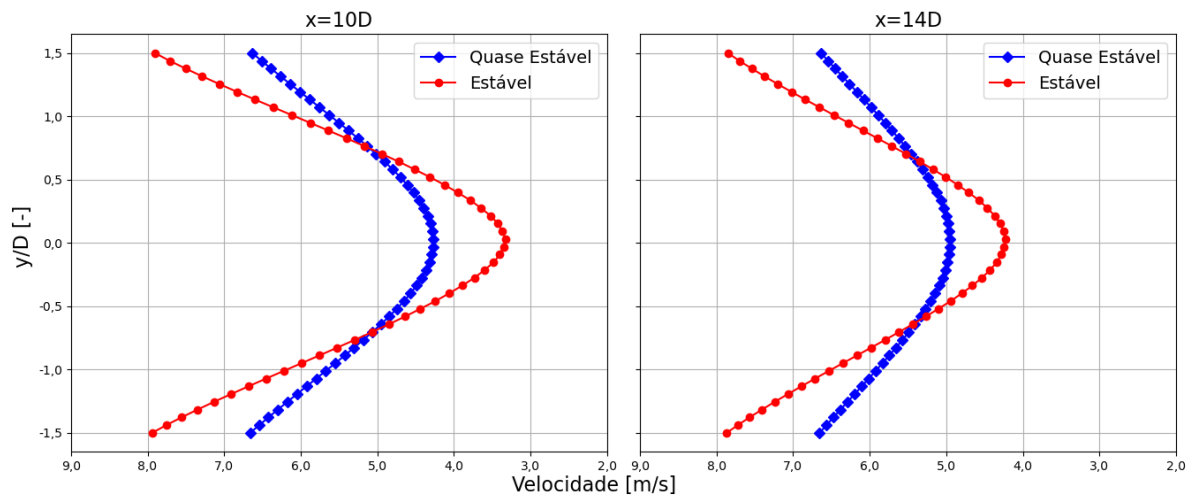
Figura 14 – Magnitude da Esteira (3, 5 e 7 diâmetros).



Fonte: O Autor.

Tanto na análise do contornos em corte quanto nos gráficos é possível perceber que a esteira não se recupera totalmente até o fim do domínio. A Figura 15 compara a esteira para os dois casos de estabilidade, a 10 e 14 diâmetros de distância do disco, respectivamente. A saída do domínio se dá em 20 diâmetros de distância do disco.

Figura 15 – Magnitude da Esteira (10 e 14 diâmetros).



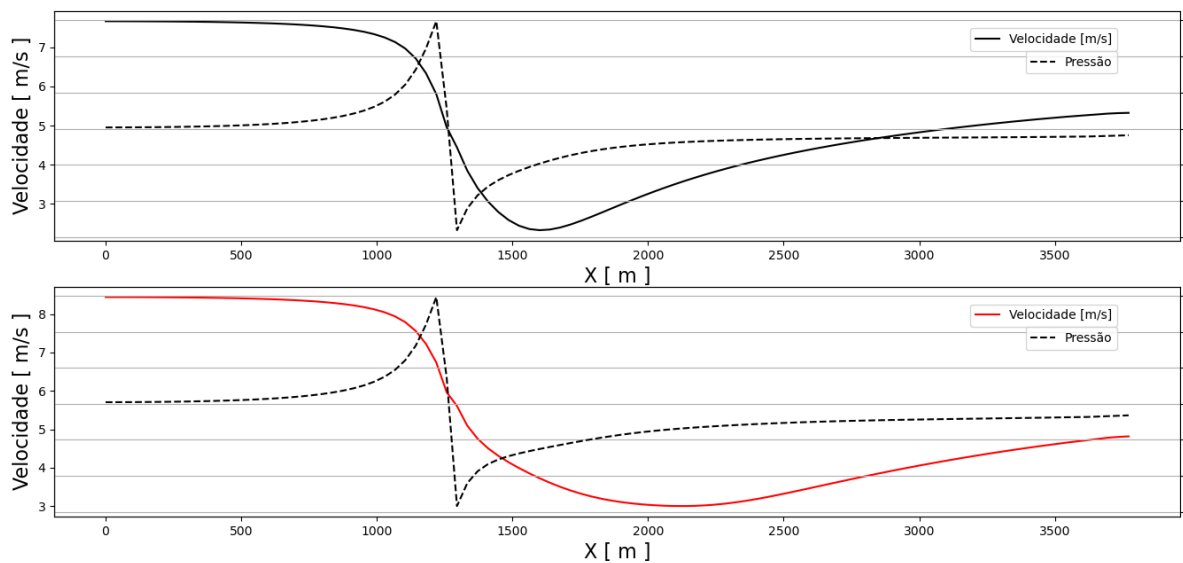
Fonte: O Autor.

Em seu estudo, Baungaard, Laan e Kelly (2022) também utilizaram o modelo do disco atuador em simulação RANS para análise da esteira em uma turbina. Os autores destacam que o modelo  $k - \varepsilon$  subestima o efeito de esteira, quando comparado com o método de simulação LES (*Large Eddy Simulation*, Simulação de Grandes Escalas). Dessa forma, eles utilizaram um fator de correção  $f_P$  para melhorar a precisão do efeito de esteira. Os resultados de seu estudo mostraram que, com a correção, houve uma melhora no perfil da esteira, ficando mais próxima

dos resultados obtidos em simulações LES. No entanto, não foi possível implementar o fator de correção neste trabalho.

Outra análise realizada foi observar a relação entre o perfil de velocidade e a pressão, colocando uma linha ao centro do disco, na altura do cubo, percorrendo todo o domínio na direção do escoamento. Os resultados dessa análise para ambas situações de estabilidade são exibidos na Figura 16, com o gráfico superior representando o caso Quase Estável e no gráfico inferior o caso Estável.

Figura 16 – Velocidade e Pressão na altura do cubo.



Fonte: O Autor.

O ponto de mínimo em ambas as curvas de velocidade identifica a mesma magnitude observada anteriormente na análise comparativa do efeito de esteira para os dois casos, bem como a recuperação mais tardia para o caso Estável. Além disso, a redução da velocidade do escoamento antes de chegar no disco, juntamente com o aumento da pressão, estão de acordo com a Teoria do Disco Atuador apresentada por Burton (2011) em seu livro. Ao atravessar o disco, há uma queda de pressão abrupta no escoamento. Conforme a pressão vai se recuperando, o mesmo acontece com a velocidade do vento, de forma gradual até se estabilizar, o que é compatível com a Teoria do Disco Atuador utilizada para o trabalho.

## 5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi conseguir simular corretamente o perfil de estratificação térmica estável dentro do software ANSYS Fluent e, a partir da Teoria do Disco Atuador, analisar os efeitos dessa condição da atmosfera sobre um aerogerador *offshore*.

Para realizar a simulação da CLA com estratificação térmica estável, o primeiro obstáculo era o decaimento do perfil do escoamento ao longo do domínio, conforme reportado na literatura pelos trabalhos de Richards e Hoxey (1993), Alinot e Masson (2005) e Laan, Kelly e Sørensen (2017) e mostrado nas simulações com modelo  $k - \epsilon$  *standard* da Figura 7. Esse problema foi



superado com a inserção dos termos-fonte para as equações de transporte, propostos no artigo de Laan, Kelly e Sørensen (2017).

Foi aplicada a Teoria da Similaridade de Monin Obukhov, fazendo necessária a obtenção do Comprimento Característico de Obukhov e outros parâmetros climatológicos para dias específicos onde manifestava-se a presença da estratificação térmica de caráter estável. Os parâmetros de perfil estável obtidos no ERA5 puderam ser validados ao compará-los com as medições do LiDAR instalado no mesmo local escolhido para a simulação do estudo. Entretanto, essa validação foi possível apenas para o dia 13 de maio de 2024, data correspondente à classificação de estabilidade da CLA para o primeiro caso do estudo (Quase Estável), uma vez que o sensor ainda não estava operando para o dia 19 de novembro de 2023, data obtida para o segundo caso (Estável).

A Teoria do Disco Atuador foi implementada como um termo-fonte na simulação, considerando uma velocidade média constante para toda a região do disco. As características técnicas da turbina de 5 MW da NREL escolhida para este trabalho foram de suma importância para o cálculo do fator de indução axial e, conseqüentemente, do termo de empuxo responsável pelo sumidouro de quantidade de movimento. Os resultados apresentados se mostraram condizentes com a teoria.

Ao agregar os conceitos, ferramentas e metodologias estudados na simulação do software ANSYS Fluent, foi possível finalmente analisar os resultados obtidos e verificar o comportamento da esteira para os dois casos, classificados como Quase Estável e Estável. Observou-se que o ponto de mínima velocidade na esteira para o caso Estável ocorre 4 diâmetros de disco de distância após o ponto mínimo do caso Quase Estável. Além disso, foi possível perceber que a esteira não se recupera totalmente em nenhum dos casos observados.

Por fim, pode-se concluir que o trabalho cumpriu com seu objetivo de modelar a estratificação térmica estável para a simulação em software de CFD e avaliar o efeito de esteira para esse caso específico da Camada Limite Atmosférica sobre um aerogerador em condições *offshore* utilizando a Teoria do Disco Atuador.

### 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para trabalho futuros, pode-se sugerir:

- Utilizar um domínio mais longo, a fim de determinar o ponto de recuperação total da esteira;
- Adicionar um aerogerador a jusante do primeiro, a fim de avaliar o impacto do efeito de esteira;
- Refinar o modelo do disco atuador ou até mesmo modelar o rotor do aerogerador em CFD e executar simulações transientes;
- Análise da produção de energia do aerogerador em casos de estratificação térmica estável e os impactos econômicos sobre um parque eólico offshore;
- Aplicar a correção  $f_P$  utilizada por Baungaard, Laan e Kelly (2022).

## REFERÊNCIAS

- ALBORNOZ, C. P. et al. Review of atmospheric stability estimations for wind power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 163, p. 112505, 2022.
- ALINOT, C.; MASSON, C. k-epsilon model for the atmospheric boundary layer under various thermal stratifications. 2005.
- BARRIATTO, L. C. Efeitos da estabilidade atmosférica na modelagem do escoamento para aplicações no setor de energia eólica. 2018.
- BAUNGAARD, M.; LAAN, M. P. V. D.; KELLY, M. Rans modeling of a single wind turbine wake in the unstable surface layer. *Wind Energy Science*, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 7, n. 2, p. 783–800, 2022.
- BLOCKEN, B.; STATHOPOULOS, T.; CARMELIET, J. Cfd simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric environment*, Elsevier, v. 41, n. 2, p. 238–252, 2007.
- BURTON. *Wind energy handbook*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- CUSTÓDIO, R. dos S. *Energia eólica para produção de energia elétrica*. [S.l.]: Eletrobrás, 2009.
- DYER, A. A review of flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorology*, Springer, v. 7, p. 363–372, 1974.
- EMEIS, S. *Wind energy meteorology: atmospheric physics for wind power generation*. [S.l.]: Springer, 2018.
- EPBR, A. *Mapa da Energia Eólica Offshore no Brasil*. 2023. Wiki do abnTeX2. Disponível em: <<https://epbr.com.br/mapa-da-energia-eolica-offshore-no-brasil/>>. Acesso em: 27 abr 2024.
- EPE. *Plataforma Interativa de Energia Eólica Onshore no Brasil*. 2024. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plataforma-interativa-de-energia-eolica-onshore-no-brasil>>. Acesso em: 27 abr 2024.
- FLUENT, A. Ansys fluent theory guide. *Ansys Inc., USA*, p. 49–51, 2022.
- FROUDE, W. *On the elementary relation between pitch, slip, and propulsive efficiency*. [S.l.], 1920.
- GASCH, R.; TWELE, J. *Wind power plants: fundamentals, design, construction and operation*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011.
- GRYNING, S.-E. et al. On the extension of the wind profile over homogeneous terrain beyond the surface boundary layer. *Boundary-layer meteorology*, Springer, v. 124, p. 251–268, 2007.
- HANNA, S. Introduction to micrometeorology . by sp arya. academic press, 2001. 420 pp. isbn 0 12 059354 8.£ 53.95. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 497, p. 441–443, 2003.
- IBAMA. *Complexos Eólicos Offshore - Projetos com Processos de Licenciamento Ambiental Abertos no IBAMA*. 2024. Diretoria de Licenciamento, CENEF/CG-TEF. Disponível em: <<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/mapas-de-projetos-em-licenciamento-complexos-eolicos-offshore>>. Acesso em: 27 abr 2024.
- JONKMAN, J. et al. *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development*. [S.l.], 2009.

- LAAN, M. P. V. D. et al. An improved k-epsilon model applied to a wind turbine wake in atmospheric turbulence. *Wind Energy*, Wiley Online Library, v. 18, n. 5, p. 889–907, 2015.
- LAAN, M. P. van der; KELLY, M. C.; SØRENSEN, N. N. A new k-epsilon model consistent with monin–obukhov similarity theory. *Wind Energy*, Wiley Online Library, v. 20, n. 3, p. 479–489, 2017.
- MACHADO, Á. D. Análise comparativa do uso de discos atuadores e da modelagem do rotor para estimar o efeito de bloqueio em parques eólicos. 2021.
- NREL. *NREL 5MW 126 RWT corrected.csv*. 2024. Wiki do abnTeX2. Disponível em: <[https://github.com/NREL/turbine-models/blob/master/Offshore/NREL\\_5MW\\_126\\_RWT\\_corrected.csv?plain=1](https://github.com/NREL/turbine-models/blob/master/Offshore/NREL_5MW_126_RWT_corrected.csv?plain=1)>. Acesso em: 05 abr 2024.
- OLIVEIRA, D. F.; CARMO, B. S. Aerodynamic modelling and simulation of offshore wind turbines using actuator models. 2023.
- RICHARDS, P.; HOXEY, R. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-epsilon turbulence model. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, Elsevier, v. 46, p. 145–153, 1993.
- STULL, R. B. *An introduction to boundary layer meteorology*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. v. 13.
- WENZEL, G. M. Análise numérica da esteira de turbinas eólicas de eixo horizontal: estudo comparativo com modelos analíticos. 2010.
- WHITE, F. M. *Mecânica dos fluidos*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2018.

## APÊNDICE A – FUNÇÃO DEFINIDA PELO USUÁRIO (UDF).

Para a UDF do dia 19 de novembro de 2023, apenas foram alterados os parâmetros apresentados na Tabela 3.

```

/* --- UDF para o dia 13 de maio de 2024 - 16:00 --- */
#include "udf.h"
#define karman 0.4187
#define u_star 0.194841
#define z0 0.0000539345
#define L 476.938
#define beta 5.0
#define C_mu 0.033
#define C_e1 1.1776
#define C_e2 1.92
#define loc 2
#define sigma_theta 1.0
#define sigma_k 1.0

/* ----- PERFIL DE VELOCIDADE ----- */
DEFINE_PROFILE(velocidade , t , i)
{
    double x[ND_ND] , z , zeta ;
    face_t f ;
    begin_f_loop ( f , t )
    {
        F_CENTROID(x , f , t) ;
        z = x[loc] ;
        zeta = (z+z0)/L ;
        F_PROFILE(f , t , i) = (u_star / karman) * (log((z+z0)/z0) - (-beta * zeta)) ;
    }
    end_f_loop ( f , t )
}

/* ----- PERFIL DA TAXA DE DISSIPACÃO DO EPSILON ----- */
DEFINE_PROFILE(epsilon , t , i)
{
    double x[ND_ND] , z , zeta , phim , phie ;
    face_t f ;
    begin_f_loop ( f , t )
    {
        F_CENTROID(x , f , t) ;
        z = x[loc] ;
        zeta = (z+z0)/L ;
        phim = 1.0 + beta*zeta ;
        phie = phim - zeta ;
        F_PROFILE(f , t , i) = (pow(u_star , 3) / (karman*(z+z0))) * phie ;
    }
    end_f_loop ( f , t )
}

/* ----- PERFIL DA ENERGIA CINÉTICA TURBULENTA K ----- */
DEFINE_PROFILE(tke , t , i)
{

```

```

double x[ND_ND], z, zeta, phim, phie;
face_t f;
begin_f_loop(f, t)
{
    F_CENTROID(x, f, t);
    z = x[loc];
    zeta = (z+z0)/L;
    phim = 1.0 + beta*zeta;
    phie = phim - zeta;
    F_PROFILE(f, t, i) = (pow(u_star, 2) / (sqrt(C_mu))) * sqrt(phie/phim);
}
end_f_loop(f, t)
}

/* - - - - - AJUSTE DA RUGOSIDADE EQUIVALENTE - - - - - */
DEFINE_PROFILE(rugosidade, t, i)
{
    face_t f;
    begin_f_loop(f, t)
    {
        F_PROFILE(f, t, i) = 20 * z0;
    }
    end_f_loop(f, t)
}

/* - - - - - TERMO FONTE S_k (zeta > 0) - - - - - */
DEFINE_SOURCE(tke_source, c, t, dS, eqn)
{
    double x[ND_ND], z, zeta, phim, phie, phi_h, c_kd, f_st, termo1, termo2, B, sk_source;
    C_CENTROID(x, c, t);
    z = x[loc];
    zeta = (z+z0)/L;
    phim = 1.0 + beta*zeta;
    phie = phim - zeta;
    phi_h = sigma_theta + beta * zeta;
    c_kd = pow(karman, 2.0) / (sigma_k * sqrt(C_mu));
    f_st = (2.0 - zeta) - 2.0 * beta * zeta * (1.0 - 2.0 * zeta + 2.0 * beta *
        zeta);
    termo1 = phi_h / (sigma_theta * phim);
    termo2 = (c_kd / 4.0) * pow(phim, -3.5) * pow(phie, -1.5) * f_st;
    real mu_t = C_MU_T(c, t);
    B = - mu_t * (pow(C_DUDZ(c, t), 2.0) + pow(C_DVDZ(c, t), 2.0)) * (zeta /
        sigma_theta) * (phi_h / pow(phim, 2.0));
    sk_source = (pow(u_star, 3) / (karman * L)) * (1.0 - termo1 - termo2);
    dS [eqn] = 0.0;
    return B - (C_R(c, t) * sk_source);
}

/* - - - - - TERMO FONTE S_e - - - - - */
DEFINE_SOURCE(se_source, c, t, dS, eqn)
{
    double x[ND_ND], z, zeta, phim, phie, phi_h, f_e, B, c_3e, source;

```

```

C_CENTROID(x,c,t);
z = x[loc];
zeta = (z+z0)/L;
phim = 1.0 + beta*zeta;
phie = phim - zeta;
phi_h = sigma_theta + beta * zeta;
f_e = pow(phim, -5.0 / 2.0) * (2.0 * phim - 1.0);
real mu_t = C_MU_T(c,t);
real k = C_K(c,t);
real d = C_D(c,t);
B = - mu_t * (pow(C_DUDZ(c,t), 2.0) + pow(C_DVDZ(c,t), 2.0)) * (zeta /
    sigma_theta) * (phi_h / pow(phim, 2.0));
c_3e = (sigma_theta / zeta) * (phim / phi_h) * (C_e1 * phim - C_e2 * phie + (
    C_e2 - C_e1) * pow(phie, -0.5) * f_e);
source = c_3e * (d / k) * B;
dS [eqn] = 0.0;
return source;
}

/* - - - - - TERMO FONTE DO DISCO ATUADOR - - - - - */
DEFINE_SOURCE(disco_termofonte,c,t,dS,eqn)
{
    double x[ND_ND],a,U_medio,A_d,v,T,S_u;
    a = 0.409116;
    U_medio = 7.033164;
    A_d = 100.0; /* area da celula */
    v = 1000.0; /* volume da celula */
    T = 2 * C_R(c,t) * pow(U_medio,2) * a * (1 - a) * A_d;
    S_u = - T / v;
    dS [eqn] = 0.0;
    return S_u;
}

```

## APÊNDICE B – ALGORITMO PARA CÁLCULO DO COMPRIMENTO CARACTERÍSTICO DE OBUKHOV.

```

import sys
import numpy as np
import netCDF4 as nc4
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import os

nc = nc4.Dataset('adaptor.mars.internal-1720789163.926649-13070-8-9e2ccfbd-cfdb
-49c4-9390-be03161934f6.nc')
lon = nc.variables['longitude'] #longitude
lat = nc.variables['latitude'] #latitude
tempo = nc.variables['time'] #registro de tempo

from netCDF4 import num2date, date2num, date2index #bibliotecas para manipulacao
de datas

```

---

```

data = num2date(tempo[:], tempo.units) #converter numero para data
inicio = data[0].strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S") #inicio do intervalo
fim = data[len(data)-1].strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S") #final do intervalo
aux=pd.date_range(start=inicio ,end=fim, freq='1H') + pd.Timedelta(hours=-3)#
    variavel auxiliar para criacao de indice baseado em data
idx=pd.DatetimeIndex(aux) #criacao de indice

data = {}
data['sp'] = pd.DataFrame(nc.variables['sp'][:,0,0], index=idx, columns=['sp'])
data['2d'] = pd.DataFrame(nc.variables['2d'][:,0,0], index=idx, columns=['2d'])
data['2t'] = pd.DataFrame(nc.variables['2t'][:,0,0], index=idx, columns=['2t'])
data['ie'] = pd.DataFrame(nc.variables['ie'][:,0,0], index=idx, columns=['ie'])
data['ishf'] = pd.DataFrame(nc.variables['ishf'][:,0,0], index=idx, columns=['ishf
    '])
data['iews'] = pd.DataFrame(nc.variables['iews'][:,0,0], index=idx, columns=['iews
    '])
data['inss'] = pd.DataFrame(nc.variables['inss'][:,0,0], index=idx, columns=['inss
    '])
data['sdfor'] = pd.DataFrame(nc.variables['sdfor'][:,0,0], index=idx, columns=['
    sdfor'])
data['sst'] = pd.DataFrame(nc.variables['sst'][:,0,0], index=idx, columns=['sst'])
df = pd.concat(data.values(), axis=1)
#%#
def qswat(t, p):
    """
    Computa saturacao q (com respeito a agua)
    In  t   : Temperatura                (K)
        p   : Pressao                    (Pa)
    Out qswt: Umidade Especifica de Saturacao (kg/kg)
    """
    rkbol = 1.380658e-23
    rnavo = 6.0221367e+23
    r = rnavo * rkbol
    rmd = 28.9644
    rmv = 18.0153
    rd = 1000 * r / rmd # Constante dos gases para o ar
    rv = 1000 * r / rmv # Constante dos gases para vapor d'agua
    restt = 611.21
    r2es = restt * rd / rv
    r3les = 17.502
    r4les = 32.19
    retv = rv / rd - 1 # Tv = T(1+retv*q)
    rtt = 273.16 # Ponto de fusao (0 Celsius)
    foew = r2es * np.exp((r3les * (t - rtt)) / (t - r4les))
    qs = foew / p
    zcor = 1 / (1 - retv * qs)
    qs = qs * zcor
    return qs

rd = 287.06 # Constante do gas
retv = 0.6078 # Tv = T*(1+retv*q)
cp = 1004.7 # capacidade calorifica do ar a pressao cte

```

```

lmelt = 2500800 # calor latente de evaporacao
vk = 0.4        # constante de VonKarman
g = 9.81       # aceleracao da gravidade

q2 = qswat(df['2d'], df['sp']) # q2 valor de saturacao em 2d
tv2 = df['2t'] * (1 + retv * q2) # temperatura virtual
rho = df['sp'] / (rd * tv2)      # densidade do ar
tau = np.sqrt(df['iew']**2 + df['inss']**2)
                                # Tensao superficial turbulenta
ust = np.maximum(np.sqrt(tau / rho), 0.001) # Velocidade de friccao

wt = -df['ishf'] / (rho * cp)    # fluxo de calor turbulento
wq = -df['ie'] / rho            # fluxo de mistura turbulento
wtv = wt + retv * df['2t'] * wq # fluxo de calor turbulento virtual
tvst = -wtv / ust              # Escala de temperatura turbulenta
qst = -wq / ust                # Escala de mistura turbulenta
Linv = vk * g * tvst / (tv2 * ust**2) # Comprimento de Obukhov inverso
Lobk_range = 500 # Faixa de valores uteis de Linv para controle
Lobk = np.maximum(np.minimum(1/Linv, Lobk_range), -Lobk_range)

df2 = pd.concat([Lobk, -wtv, df['2t'], df['sst']], axis=1, keys=['L', 'Qs', 'T2m', 'SST'])
#%
y = [0]*(len(df))
fig, ax = plt.subplots(2)
ax[0].plot(Lobk, '-o')
ax[1].plot(df2['T2m'] - df2['SST'])
ax[1].plot(df.index, y)

```

## APÊNDICE C – CARACTERÍSTICAS TURBINA NREL 5 MW.

Tabela 7 – Características Técnicas do Aeroogerador de Referência - 5 MW.

Classificação	5 MW
Orientação, Configuração do Rotor	Montante, 3 Pás
Controle	Velocidade Variável, Passo Coletivo
Trem de Transmissão	Alta Velocidade, Caixa de Engrenagens Múltiplas
Diâmetro do Rotor, do Cubo	126 m, 3 m
Altura do cubo	154 m
Velocidade do Vento de Início, Nominal, de Corte	3 m/s, 11,4 m/s, 25 m/s
Velocidade de Rotação de Início, Nominal	6,9 rpm, 12,1 rpm
Velocidade Nominal de Ponta de Pá	80 m/s
Massa do Rotor	110.000 kg
Massa da Nacele	240.000 kg
Massa da Torre	347.460 kg
Eficiência do Gerador Elétrico	94,40%

Fonte: Jonkman et al. (2009).