

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

GUILHERME TRODO LIMA DA SILVA

**EFEITO DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA NA ESTEIRA DE UMA TURBINA
UTILIZANDO LES POR MEIO DO MODELO PALM**

Alegrete

2024

GUILHERME TRODO LIMA DA SILVA

**EFEITO DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA NA ESTEIRA DE UMA TURBINA
UTILIZANDO LES POR MEIO DO MODELO PALM**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de

Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Maroneze

Alegrete

2024

GUILHERME TRODO LIMA DA SILVA

**EFEITO DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA NA ESTEIRA DE UMA TURBINA
UTILIZANDO LES POR MEIO DO MODELO PALM**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Monografia defendida e aprovada em 13 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rafael Maroneze
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Adriano Roberto da Silva Carotenuto
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Luiz Eduardo
Medeiros
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **RAFAEL MARONEZE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/12/2024, às 10:20, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ADRIANO ROBERTO DA SILVA CAROTENUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/12/2024, às 10:20, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIZ EDUARDO MEDEIROS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/12/2024, às 10:21, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1624669** e o código CRC **ABD83F96**.

AGRADECIMENTO

Agradeço a minha família por todo o suporte, incentivo e amor incondicional.

Aos amigos que sempre estiveram presentes durante os mais variados momentos.

A todos os professores e funcionários da UNIPAMPA pelos ensinamentos e vivências compartilhadas.

Ao meu orientador Dr. Rafael Maroneze pela inspiração deste trabalho, além da paciência, o tempo disponibilizado e todo o conhecimento compartilhado

A Alegrete e aos demais colegas por todas as experiências proporcionadas.

RESUMO

Este trabalho surge do crescente interesse e importância das usinas eólicas no Brasil, com destaque para projeto do Complexo Eólico Três Divisas, no Rio Grande do Sul, que contribuirá significativamente para a geração de energia renovável no estado. O estudo enfoca a utilização da dinâmica de fluidos computacional (CFD), especificamente a simulação de grandes turbilhões (LES), para analisar o comportamento da esteira gerada por turbinas eólicas. A pesquisa explora como fatores como estratificação térmica e velocidade do vento afetam a formação e dispersão da esteira e a eficiência da geração de energia eólica. O estudo revela que a estratificação térmica influencia diretamente a dispersão da esteira, com maior dispersão em condições convectivas e menor dispersão em condições estáveis. Além disso, observa-se que, para baixas velocidades de vento, o aumento da velocidade de entrada do escoamento leva ao aumento da esteira até certo ponto. A geração de energia também é afetada pela estratificação térmica, sendo três vezes maior nas condições mais convectivas em comparação com as condições mais estáveis. O estudo utiliza o modelo atmosférico PALM para simulações e propõe melhorias para futuras pesquisas, como aumentar a resolução da grade e expandir o domínio da simulação, além de incluir mais turbinas para analisar os efeitos na geração. O trabalho contribui para uma melhor compreensão dos fatores que impactam a geração de energia eólica e a eficácia dos projetos eólicos, sendo útil para a compreensão e aplicação de projetos de simulação eólica.

Palavras-Chave: Energia eólica; LES; Estratificação térmica; CFD; Camada limite atmosférica; Turbulência.

ABSTRACT

This work arises from the growing interest and importance of wind farms in Brazil, with a focus on the Três Divisas Wind Complex project in Rio Grande do Sul, which will significantly contribute to renewable energy generation in the state. The study focuses on the use of Computational Fluid Dynamics (CFD), specifically Large-Eddy Simulation (LES), to analyze the behavior of the wake generated by wind turbines. The research explores how factors such as thermal stratification and wind speed affect the formation and dispersion of the wake and the efficiency of wind energy generation. The study reveals that thermal stratification directly influences wake dispersion, with greater dispersion under convective conditions and less dispersion under stable conditions. Additionally, it is observed that, at low wind speeds, increasing the inflow velocity leads to an increase in the wake length up to a certain point. Energy generation is also affected by thermal stratification, being three times higher under more convective conditions compared to more stable conditions. The study uses the atmospheric model PALM for simulations and proposes improvements for future research, such as increasing grid resolution and expanding the simulation domain, as well as adding more turbines to analyze the effects on generation. This work contributes to a better understanding of the factors that impact wind energy generation and the effectiveness of wind projects, being useful for understanding and applying wind simulation projects.

Keywords: Wind energy; LES; Thermal stratification; CFD; Atmospheric boundary layer; Turbulence.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Representação simplificada da interação entre uma turbina eólica e a camada limite turbulenta de entrada | 17 |
| Figura 2- LES | 19 |
| Figura 3- Perfil NREL 5MW | 22 |
| Figura 4- Disco ADM-R | 23 |
| Figura 5- Perfil..... | 24 |
| Figura 6- Pá NREL 15MW | 26 |
| Figura 7- Ciclo diário CLP | 27 |
| Figura 8- Domínio..... | 30 |
| Figura 9- Recirculação | 30 |
| Figura 10- VAPOR Exemplo Slice | 32 |
| Figura 11- VAPOR Exemplo Slice+3D..... | 32 |
| Figura 12- VAPOR Exemplo de 3D | 33 |
| Figura 13- Ncview Geração Ug10_1.0 | 33 |
| Figura 14 - 3D da Velocidade de 5m/s a condição estável de -0,25K/h | 35 |
| Figura 15 - Velocidade 5m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina com -0,25K/h de troca térmica | 35 |
| Figura 16 - 3D da Velocidade de 5m/s a condição neutra 0,0K/h..... | 36 |
| Figura 17 - Velocidade 5m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina sem troca térmica..... | 36 |
| Figura 18 - 3D da Velocidade de 5m/s a condição convectiva 0,5K/h..... | 37 |
| Figura 19 - Velocidade 5m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina com 0,5K/h de troca térmica | 38 |
| Figura 20 - Perfil de Vel. Média para a velocidade de 5m/s, no plano horizontal sobre centro do eixo da turbina | 39 |
| Figura 21 – Perfil de Vel. Média para a velocidade de 5m/s, no plano vertical que passa pelo centro do eixo da turbina..... | 39 |
| Figura 22 - 3D da Velocidade de 10m/s a condição estável -0,25K/h | 40 |
| Figura 23 - Velocidade 10m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina com -0,25K/h de troca térmica | 40 |
| Figura 24 - 3D da Velocidade de 10m/s a condição neutra 0,0K/h..... | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 - Velocidade 10m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina sem troca térmica..... | 41 |
| Figura 26 - 3D da Velocidade de 10m/s a condição convectiva 0,5K/h..... | 42 |
| Figura 27 - Velocidade 10m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina com 0,5K/h de troca térmica | 42 |
| Figura 28 – Perfil de Vel. Média para a velocidade de 10m/s, no plano horizontal sobre o eixo da turbina..... | 43 |
| Figura 29 – Perfil de Vel. Média para a velocidade de 10m/s, no plano vertical que passa pelo centro do eixo da turbina..... | 43 |
| Figura 30 - 3D da Velocidade de 15m/s a condição estável -0,25K/h..... | 44 |
| Figura 31 - Velocidade 15m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina com -0,25K/h de troca térmica | 44 |
| Figura 32 - 3D da Velocidade de 15m/s a condição neutra 0,0K/h..... | 45 |
| Figura 33 - Velocidade 15m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina sem troca térmica..... | 45 |
| Figura 34 - 3D da Velocidade de 15m/s a condição convectiva 0,5K/h..... | 46 |
| Figura 35 - Velocidade 15m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina com 0,5K/h de troca térmica | 46 |
| Figura 36 - Perfil de Vel. Média para a velocidade de 15m/s, no plano horizontal sobre o centro do eixo da turbina..... | 47 |
| Figura 37 - Perfil de Vel. Média para a velocidade de 15m/s, no plano vertical que passa pelo centro do eixo da turbina..... | 47 |
| Figura 38 – Distribuição vertical de temperatura no escoamento..... | 48 |

LISTA DE GRAFICOS

| | |
|--------------------------------------|----|
| Gráfico 1 Geração Estável | 48 |
| Gráfico 2 Geração Neutra | 49 |
| Gráfico 3 - Geração Convectiva | 49 |
| Gráfico 4 - Geração NREL 15MW | 49 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Especificações NREL 15MW | 26 |
| Tabela 2 - Parâmetros de inicialização PALM | 54 |
| Tabela 3 - Parâmetros Temporais PALM | 55 |
| Tabela 4 - Parâmetros do Aerogerador PALM | 55 |

SUMARIO

| | |
|---|----|
| AGRADECIMENTO | 5 |
| RESUMO | 6 |
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 2. JUSTIFICATIVA | 14 |
| 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 4.1. Escoamentos turbulentos e esteira | 17 |
| 4.2. Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) | 18 |
| 4.3. Simulação de grandes turbilhões (LES)..... | 18 |
| 4.4. Modelos de SGS | 20 |
| 4.5. Modelos de parametrização de turbinas | 21 |
| 4.5.1. Modelo de Atuador de Linha | 21 |
| 4.5.2. Modelo de Disco Atuador com Rotação (ADM-R)..... | 22 |
| 4.6. PALM | 25 |
| 4.7. Turbina NREL 15MW | 25 |
| 4.8. Ciclo diário - CLP | 26 |
| 4.9. VAPOR..... | 28 |
| 5. METODOLOGIA | 29 |
| 5.1. Simulação numérica:..... | 29 |
| 5.2. Visualização | 31 |
| 6. RESULTADOS | 34 |
| 6.1. Comprimento de Esteira | 34 |
| 6.1.1. Vento 5m/s | 34 |
| 6.1.2. Vento 10m/s | 40 |
| 6.1.3. Vento 15m/s | 44 |
| 6.3. Geração de Energia | 48 |

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 50 |
| 8. REFERÊNCIAS | 52 |
| APENDICE A | 54 |

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética e a preocupação com o meio ambiente têm impulsionado a busca por fontes de energia limpas e sustentáveis. No contexto brasileiro, as usinas eólicas têm se destacado como uma importante fonte de geração de energia, representando grande parte da capacidade instalada de geração para o sistema elétrico nacional. Além disso, o potencial de crescimento desse setor ainda é significativo.

No estado do Rio Grande do Sul além das plantas eólicas já existentes, há o projeto de construção do Complexo Eólico Três Divisas, localizado nos municípios de Alegrete, Quaraí e Uruguaiana, na Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul. O governo estadual está comprometido em tornar o estado mais competitivo na produção de energias renováveis e busca viabilizar novos projetos nesse setor. O Complexo Eólico Três Divisas terá 17 parques eólicos com capacidade instalada de 810 megawatts, além de gerar empregos diretos durante a fase de implantação (Secom/RS).

Atualmente, com o avanço da capacidade de processamento computacional, ferramentas de dinâmica de fluidos computacional tem se tornado cada vez mais acessíveis. Este estudo tem como objetivo analisar a viabilidade do uso de simulação dinâmica dos fluidos computacional (CFD), empregando a simulação dos grandes turbilhões, do inglês Large-Eddy Simulation (LES), para investigar o comportamento da esteira gerada por uma turbina eólica. Além disso, o estudo analisará os efeitos da estratificação térmica da camada limite atmosférica na esteira gerada pelo aerogerador em condições neutras, estáveis e instáveis.

O presente trabalho considera o modelo PALM, eficaz para simulações atmosféricas. Observa que o comprimento da esteira varia tanto com a velocidade de entrada do escoamento quanto com a estratificação térmica, onde as mais longas foram identificadas em condições estáveis e neutras, enquanto esteiras menores ocorreram em regimes convectivos. Por fim, a geração de energia foi significativamente influenciada pela estratificação térmica, sendo mais de três vezes maior em condições convectivas, quando comparadas às condições estáveis.

2. JUSTIFICATIVA

Devido à crescente demanda por energia e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, atualmente existe grande incentivo em pesquisas e busca por fontes de energia limpas e sustentáveis. A utilização de usinas eólicas contribui significativamente para a geração de energia no Brasil, sendo uma opção ambientalmente amigável. As usinas eólicas representam a segunda maior fonte de geração de energia elétrica limpa no Brasil, além de demonstrar um grande potencial de expansão (ABEEólica).

Além disso, o Rio Grande do Sul está apostando no hidrogênio verde (H2V) como o combustível do futuro. O governador estadual afirmou que o estado busca se destacar nesse setor e estabelecer políticas públicas para estimular investimentos em energia de hidrogênio.

O hidrogênio verde é considerado uma solução promissora para a crise climática global e é obtido por meio da eletrólise da água, usando energia elétrica de fontes renováveis, como eólica e solar. O H2V pode ser utilizado como combustível para veículos, matéria-prima para indústrias siderúrgicas, químicas e petroquímicas, e poderá abastecer navios e aviões no futuro. O hidrogênio verde é sustentável, não emitindo CO2 e é visto como uma alternativa aos combustíveis fósseis (Secom/RS).

O Rio Grande do Sul possui vantagens competitivas para a produção de H2V, como o potencial para geração de energia renovável, infraestrutura portuária e logística, recursos naturais em abundância e universidades e centros de ciência e tecnologia. O Porto de Rio Grande desempenha um papel estratégico na cadeia logística desse projeto, sendo responsável pelo recebimento de equipamentos e movimentação dos parques. A Portos RS lançou a marca Portos RS - Port Energy Platform para atrair investimentos e mostrar as potencialidades do estado no setor de energia renovável, incluindo o distrito industrial de Rio Grande, que possui a infraestrutura necessária para receber esses investimentos. O estado busca desenvolver a cadeia de hidrogênio verde para impulsionar o desenvolvimento econômico regional, gerar empregos e reduzir o consumo de combustíveis fósseis (Secom/RS).

Compreender e saber simular o comportamento dos escoamentos relacionados à geração de energia eólica é fundamental para melhorar a eficiência das turbinas

eólicas e parques eólicos. Um maior entendimento dos escoamentos turbulentos permitirá o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes, reduzindo os custos de produção de energia e maximizando a quantidade de energia gerada por unidade instalada, aumentando a produção de energia limpa, reduzindo a dependência de fontes de energia não renováveis e mitigando os impactos ambientais associados.

A utilização da simulação dos grandes turbilhões (LES) possibilita o estudo detalhado dos escoamentos turbulentos e da esteira gerada. Essa abordagem permite visualizar e analisar o comportamento do escoamento do fluido em diferentes condições, fornecendo informações valiosas para otimizar projetos, reduzindo a necessidade de experimentos em escala e conseqüentemente, reduzindo os custos e o tempo associados a cada projeto (SAGAUT, 2006).

3. OBJETIVOS

O objeto principal é estudar o efeito da estratificação térmica na esteira gerada por uma turbina eólica NREL 15 MW por meio de simulações numéricas LES utilizando o modelo atmosférico PALM.

Os objetivos específicos são:

- Definir comprimento de esteira e turbulência gerados pela turbina eólica;
- Compreender e utilizar simulação numérica LES e os modelos de SGS;
- Compreender o impacto da estratificação térmica da camada limite planetária na geração de energia eólica.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

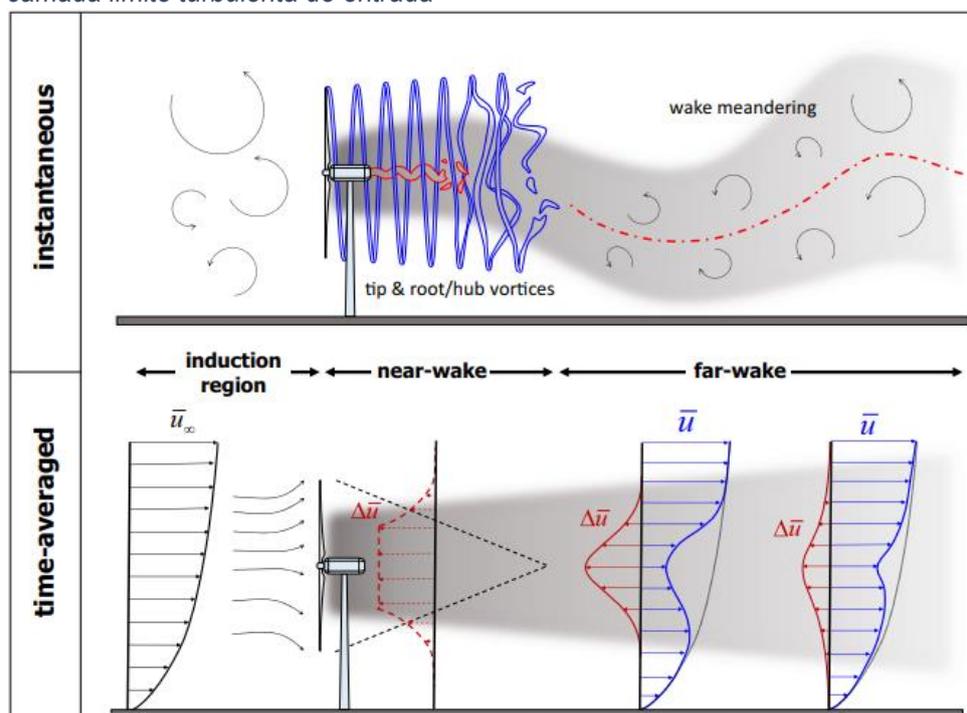
A seguir serão apresentados os conceitos teórico essenciais para o desenvolvimento do presente trabalho.

4.1. Escoamentos turbulentos e esteira

De acordo com Porté-Agel (2019) presença de uma turbina eólica afeta o escoamento tanto anteriormente a ela, quanto posteriormente. A região a montante afetada pela turbina é chamada de região de indução. Estudos anteriores de outros autores mostraram que o principal impacto da turbina nessa região é a redução da velocidade do vento.

A região a jusante da turbina é chamada de esteira. A esteira de uma turbina eólica geralmente é dividida em duas regiões (Vermeer, 2003): (i) a região imediatamente a jusante da turbina, com uma extensão de 2–4 diâmetros do rotor, chamada de esteira próxima, e (ii) a região mais distante a jusante, chamada de esteira distante. A Figura 1 apresenta as diferentes regiões afetadas pela presença da turbina eólica.

Figura 1 Representação simplificada da interação entre uma turbina eólica e a camada limite turbulenta de entrada



Fonte: Porté-Agel, 2019

A esteira próxima é diretamente influenciada pela presença da turbina eólica, de modo que características da turbina, como o perfil das pás, a geometria do cubo e da nacela, podem afetar o campo de fluxo nessa região (Crespo, 1999). Como resultado, a esteira próxima é caracterizada por uma distribuição de fluxo altamente complexa, tridimensional e heterogênea.

Em contraste, a esteira distante é menos influenciada pelos detalhes específicos da turbina. Em vez disso, parâmetros globais da turbina, como os coeficientes de empuxo e potência, bem como as condições do fluxo de entrada, geralmente são suficientes para prever a distribuição média do fluxo nessa região (Porté-Agel, 2019).

4.2. Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)

Segundo Potter (2014), o comportamento do escoamento de qualquer fluido é descrito pela união da equação da continuidade, das equações de Navier-Stokes e da conservação da energia, portanto esses escoamentos são governados por equações diferenciais parciais, acopladas e não lineares, tornando a solução analítica possível apenas para limitados e muito idealizados problemas.

Ao passar dos anos, o avanço tecnológico e surgimento dos computadores, permitiu o desenvolvimento de novas ferramentas, como a dinâmica de fluidos computacional (CFD), possibilitando a solução de uma maior quantidade de problemas.

Sagaut (2006) define CFD como o estudo de fluidos em movimento por meio de simulações numéricas e é um campo em constante avanço. A ideia básica é utilizar algoritmos apropriados para encontrar soluções para as equações que descrevem o movimento dos fluidos.

Segundo Versteeg (2007), os métodos mais utilizados na engenharia são divididos em três categorias: Médias de Reynolds para Navier-Stokes (RANS), Simulação Numérica Direta (DNS) e o modelo utilizado no presente trabalho, Simulação de Grandes Turbilhões o qual é abordado a seguir:

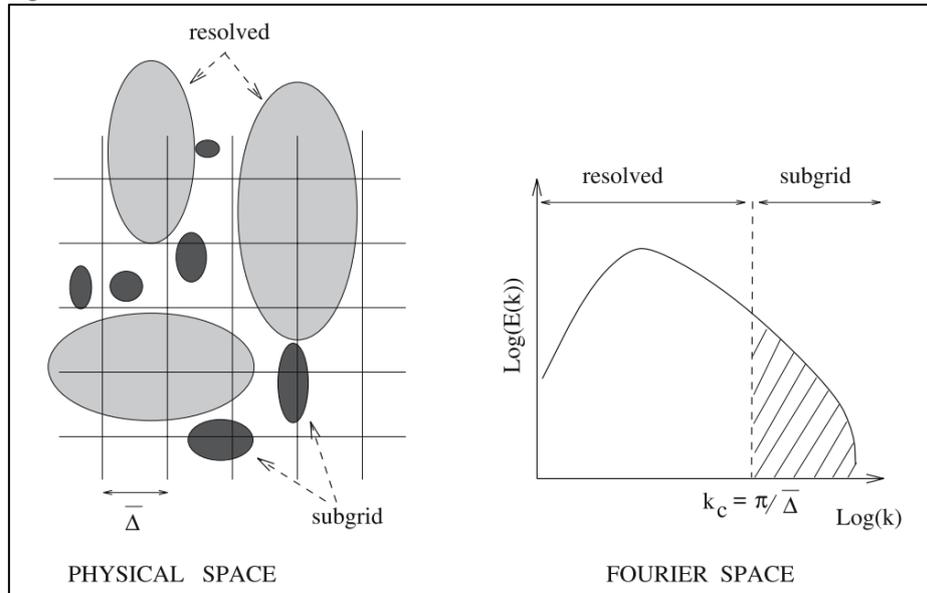
4.3. Simulação de grandes turbilhões (LES)

A Simulação de Grandes Turbilhões (LES) é um método que consiste na aplicação de um filtro espacial às equações de Navier-Stokes, com o

objetivo de filtrar os turbilhões maiores, que são resolvidos explicitamente, dos menores, cujos efeitos são parametrizados. Os efeitos dos turbilhões menores, não resolvidos explicitamente, sobre o escoamento são representados por meio de parametrizações incluídas no modelo de subgrade (Subgrid-Scale - SGS).

A premissa básica do LES é que o escoamento turbulento pode ser descrito como uma combinação de estruturas com diferentes escalas de comprimento e tempo. As estruturas maiores, denominadas "vórtices coerentes", são responsáveis pela maior parte da energia do escoamento, enquanto as menores, chamadas "vórtices dissipativos", são responsáveis pela dissipação da energia na forma de calor. O LES resolve diretamente as estruturas coerentes, enquanto modela as menores, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2- LES



Fonte: Sagaut, 2006

Segundo Wu e Porté-Agel (2010) e outros autores da literatura, o método LES para escoamento incompressível resolve a equação da continuidade, as equações filtradas de Navier-Stokes e a equação da conservação da energia, respectivamente dadas por:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_i \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) = - \frac{\partial \tilde{p}^*}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{f_i}{\rho} + F_p \delta_{i1} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_j} = - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

onde \tilde{u}_i é a velocidade filtrada na direção i (com $i = 1, 2, 3$ correspondendo às direções do escoamento (x), transversal (y) e vertical (z), respectivamente), $\tilde{p}^* = p/\rho + 1/2 \tilde{u}_i \tilde{u}_i$ é a pressão cinemática modificada, $\tau_{ij} = \tilde{u}_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j$ é o estresse cinemático de SGS, ν é a viscosidade cinemática do ar, f_i é uma força de corpo (por unidade de volume) usada para modelar o efeito da turbina no escoamento, F_p é um gradiente de pressão imposto, δ_{ij} é o delta de Kronecker, ρ é a densidade constante do ar (segundo a aproximação de Boussinesq) e $\tilde{\theta}$ é a temperatura potencial resolvida.

4.4. Modelos de SGS

SGS é a sigla para "*sub-grade scales*" (escala abaixo da grade, em português). Em CFD, as SGS se referem às estruturas turbulentas (vórtices) de pequenas dimensões, que são incapazes de ser resolvidas diretamente pela malha numérica utilizada na simulação. Como a maioria dos modelos de simulação numérica não pode resolver diretamente essas estruturas de pequena escala de forma direta, torna-se necessário o uso de modelos SGS para estimar sua influência no escoamento.

Os modelos SGS geralmente são baseados em suposições simplificadas sobre a natureza do escoamento em escalas menores do que a resolução da malha. Esses modelos usam equações adicionais para descrever a dissipação de energia e outras propriedades do movimento turbulento em escalas menores do que a malha (SAGAUT, 2006).

O modelo atmosférico PALM oferece três opções de modelos de subgrade, o primeiro modelo, o Modelo de Subgrade de Deardorff, é o padrão, e utiliza um fechamento de ordem 1.5 baseado na teoria de Deardorff (1980), com modificações feitas por Moeng e Wyngaard (1988) e Saiki et al. (2000). Esse modelo fornece difusividades turbulentas locais para momento e calor, derivadas da energia cinética de subgrade (SGS-TKE), além de incluir uma equação prognóstica para a SGS-TKE, com parametrizações para fluxo de calor e dissipação.

A segunda opção é o Modelo de Subgrade de Deardorff Modificado, que introduz melhorias no cálculo do comprimento de mistura para estratificação estável local, conforme descrito por Dai et al. (2020). Esse modelo é mais eficiente em simulações com espaçamento de malha mais grosseiras, mas pode aumentar os custos computacionais em configurações de malha fina.

Por fim, o Modelo Dinâmico de Subgrade utiliza a abordagem de Germano et al. (1991), aplicando filtros para calcular os coeficientes de forma dinâmica, com base em propriedades fundamentais da turbulência. Esse modelo elimina a necessidade de suposições para os estresses de subgrade e inclui limites dinâmicos, derivados por Mokhtarpoor e Heinz (2017), para garantir a estabilidade da simulação. Ele também permite o fenômeno de "backscatter", em que a viscosidade de subgrade pode assumir valores negativos.

O modelo de Deardorff padrão é geralmente preferido devido à sua estabilidade e eficiência computacional, enquanto as outras opções oferecem vantagens específicas dependendo das condições e objetivos da simulação (PALM, 2021).

4.5. Modelos de parametrização de turbinas

Dois modelos comumente utilizados na modelagem de turbinas eólicas são os '*actuator disk model*' e '*actuator line model*', os quais serão abordados a seguir:

4.5.1. Modelo de Atuador de Linha

O *Actuator Line Model* (ALM) é uma técnica usada em simulações CFD para representar as pás de uma turbina eólica como linhas virtuais de atuadores. Ele permite a modelagem simplificada do comportamento aerodinâmico das pás, considerando a interação com o escoamento de forma eficiente.

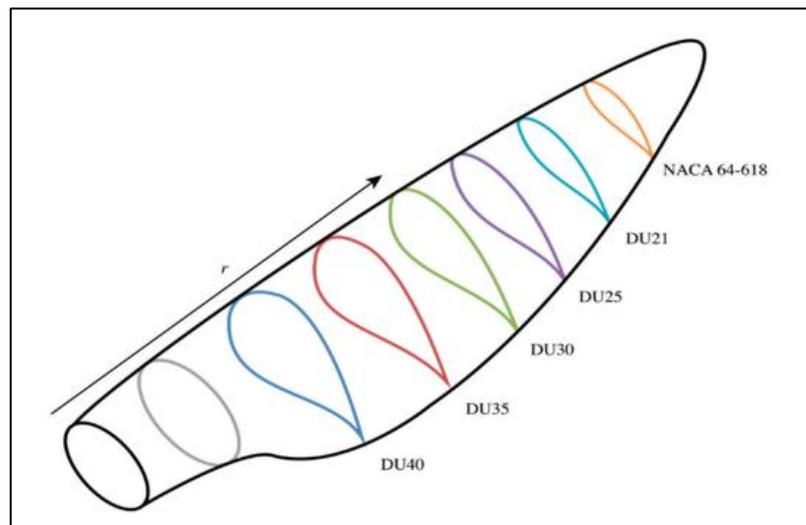
Em cada linha de atuadores, são aplicados modelos de forças baseados em teorias aerodinâmicas, como o modelo de sustentação e arrasto, ver Figura 3. Esses modelos consideram os perfis aerodinâmicos das pás, o

ângulo de ataque relativo ao escoamento e outras características relevantes (Troldborg, 2007).

O ALM é particularmente útil para estudar o desempenho e a interação das pás da turbina eólica com o escoamento em diferentes condições. Permitindo a análise de questões como carga nas pás, distribuição de forças, eficiência da conversão de energia e outros parâmetros relevantes para a operação e otimização das turbinas eólicas.

O método apresenta uma modelagem precisa das pás, capturando efeitos tridimensionais, como a distribuição de forças ao longo delas, resultando em uma excelente modelagem de interações fluido-estrutura, porém apresenta grande complexidade de implementação e demanda computacional.

Figura 3- Perfil NREL 5MW

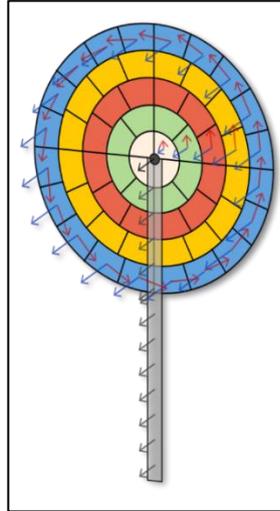


Fonte: Fernandez-Gamiz, 2017

4.5.2. Modelo de Disco Atuador com Rotação (ADM-R)

O modelo de disco atuador com rotação é um tipo de modelo utilizado em CFD para simular a rotação de um disco, que pode ser usado para simular o movimento das pás de uma turbina. Esse modelo funciona criando um disco virtual na simulação que é acionado por uma rotação em torno de seu eixo. O movimento do disco atua impondo um campo de velocidade no fluido ao redor dele, simulando assim o movimento das pás da turbina, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4- Disco ADM-R



Fonte: PALM, 2020

A parametrização de turbina com modelo de disco atuador com rotação é feita ajustando os parâmetros da simulação para que os resultados simulados sejam coerentes com os dados experimentais ou teóricos conhecidos. Isso pode incluir ajustar a velocidade de rotação do disco, a geometria das pás da turbina e as condições de contorno do fluido.

Essa parametrização permite considerar os efeitos aerodinâmicos dos aerogeradores sem a necessidade de simular o escoamento detalhado ao redor de cada pá. Isso proporciona uma redução nos custos computacionais e uma simplificação do modelo, mantendo a capacidade de capturar os efeitos globais dos aerogeradores na turbulência.

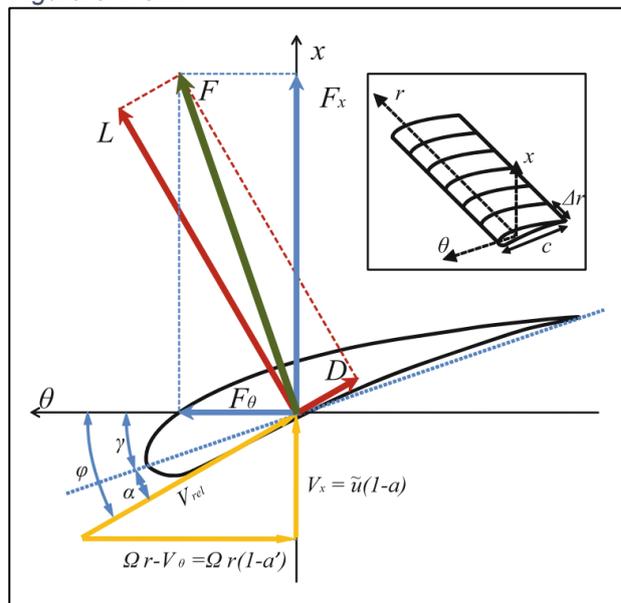
Segundo Abkar (2015), essa teoria considera que cada pá de uma turbina eólica pode ser dividida em N elementos de pá, que são assumidos como perfis aerodinâmicos bidimensionais e sem ação radial no escoamento. Através desse modelo, as forças de sustentação e arrasto atuando em cada elemento de pá (ver Figura 5) são parametrizadas com base na velocidade relativa do vento, na geometria do perfil da pá e nos dados tabulados do perfil aerodinâmico.

Para determinar as forças atuantes no disco do rotor, Abkar (2015) considera um elemento com um tamanho diferencial de $dA = r d\theta dr$ em um sistema de malha cilíndrica. A força resultante por unidade de área do rotor é dada por

$$\mathbf{f}_{disc} = \frac{d\mathbf{F}}{dA} = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 \frac{Bc}{2\pi r} (C_L \mathbf{e}_L + C_D \mathbf{e}_D) \quad (4)$$

onde B é o número de pás, c é o comprimento da corda local, C_L e C_D são os coeficientes de sustentação e arrasto, respectivamente, r é a distância radial entre o cubo e o centro do elemento da pá, e e_L e e_D denotam os vetores unitários nas direções de sustentação e arrasto, respectivamente. V_{rel} é a magnitude da velocidade local em relação à pá em rotação e é definida como $V_{rel} = (V_x, \Omega r - V_\theta)$, onde $V_x = V_x(r, \theta)$ e $V_\theta = V_\theta(r, \theta)$ são as velocidades axiais e tangenciais do escoamento incidente nas pás, respectivamente, no referencial inercial, e Ω é a velocidade angular da turbina.

Figura 5- Perfil



Fonte: Abkar, 2015

Na Figura 5, α é o ângulo de ataque, definido como $\alpha = \phi - \gamma$, onde $\phi = \tan^{-1} (V_x / (\Omega r - V_\theta))$ é o ângulo entre V_{rel} e o plano do rotor, e γ é o ângulo de passo local.

Abkar (2015) também observa que em LES, o escoamento através de turbinas eólicas, as velocidades tangenciais (V_θ) e axial (V_x) no plano do rotor estão prontamente disponíveis durante a simulação. Portanto, a velocidade local relativa à lâmina em rotação (V_{rel}) e o ângulo de ataque $\alpha = \phi - \gamma$ podem ser calculados. Em seguida, a força resultante é obtida usando a Eq. (5). Deve ser mencionado que, no modelo baseado na teoria do elemento de pá, os coeficientes de sustentação e arrasto são obtidos a

partir de dados aerodinâmicos tabulados do perfil aerodinâmico. Como resultado, o desempenho desse método é sensível aos dados aerodinâmicos da seção da pá fornecidos como entrada.

Quando comparado com o modelo anterior, o ADM-R apresenta menor resolução tridimensional e limitação na modelagem das pás, porém como o foco do projeto é o estudo do escoamento em si, este método será utilizado pois espera-se obter resultados aceitáveis com menor demanda computacional e simplicidade de implementação.

4.6. PALM

O PALM foi o modelo atmosférico utilizado realizar para as simulações LES, ele foi desenvolvido no Instituto de Meteorologia e Climatologia da Universidade Leibniz de Hannover, na Alemanha. Projetado para executar simulações em supercomputadores, o PALM suporta configurações com alta resolução espacial e grandes domínios, o que o torna ideal para estudos que exigem detalhamento e eficiência computacional. No entanto, o modelo também é flexível o suficiente para ser adaptado a ambientes com recursos computacionais modestos, possibilitando simulações em menor resolução e ampliando sua acessibilidade. Essa versatilidade permite que pesquisadores com diferentes níveis de acesso a infraestrutura computacional utilizem o PALM para realizar simulações numéricas eficazes em seus estudos.

Assim, o PALM combina alta resolução, eficiência e flexibilidade, sendo uma ferramenta indispensável para investigações em meteorologia, climatologia, dinâmica urbana e interações oceânicas. Sua capacidade de atender tanto a demandas de pesquisa avançada quanto a necessidades de infraestrutura limitada o torna uma plataforma acessível e valiosa para uma ampla gama de pesquisadores, conforme destacado por Maronga (2014).

4.7. Turbina NREL 15MW

A turbina utilizada neste estudo, será um NREL 15MW, desenvolvida pelo Departamento de Energia dos EUA, no Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL), a qual apresenta em seu relatório técnico as seguintes especificações apresentadas na Tabela 1 a seguir:

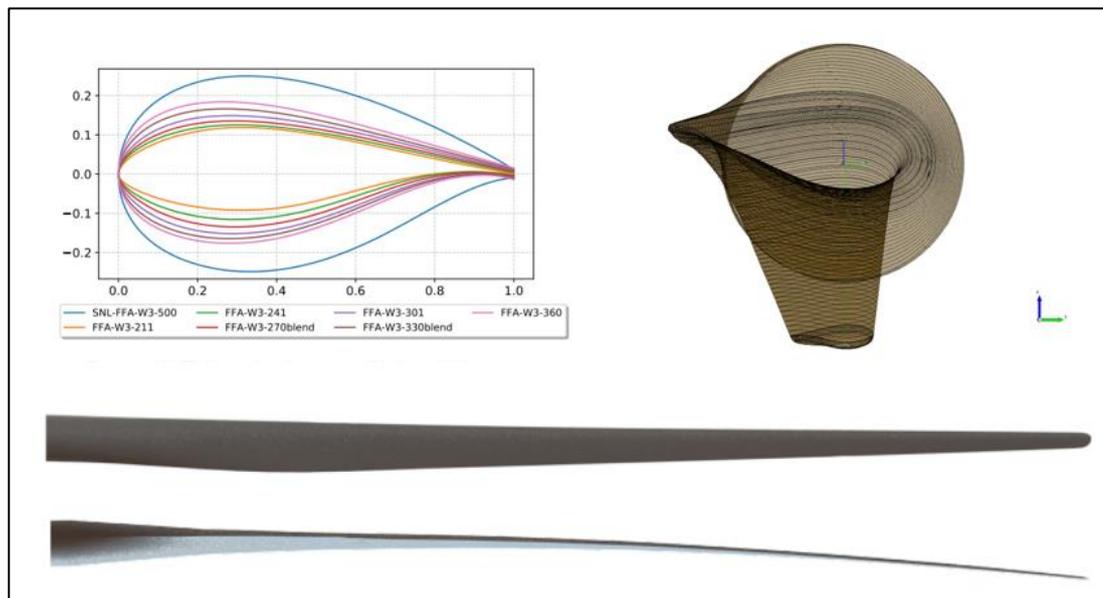
Tabela 1 - Especificações NREL 15MW

| Parâmetro | Especificação |
|-------------------------|---------------|
| Classe IEC | 1B |
| Potência Nominal | 15 MW |
| Diâmetro do Rotor | 240 m |
| Altura da Torre | 150 m |
| Velocidade Mínima Vento | 3 m/s |
| Velocidade de Corte | 25 m/s |
| Número de Pás | 3 |
| Massa Pá | 65 t |
| Massa do Rotor | 1017 t |
| Massa da Torre | 860 t |

Fonte: Adaptado de Gaertner, 2020

A família de curvas de aerofólios utilizadas e a representação de uma pá da turbina estão apresentadas na Figura 6.

Figura 6- Pá NREL 15MW



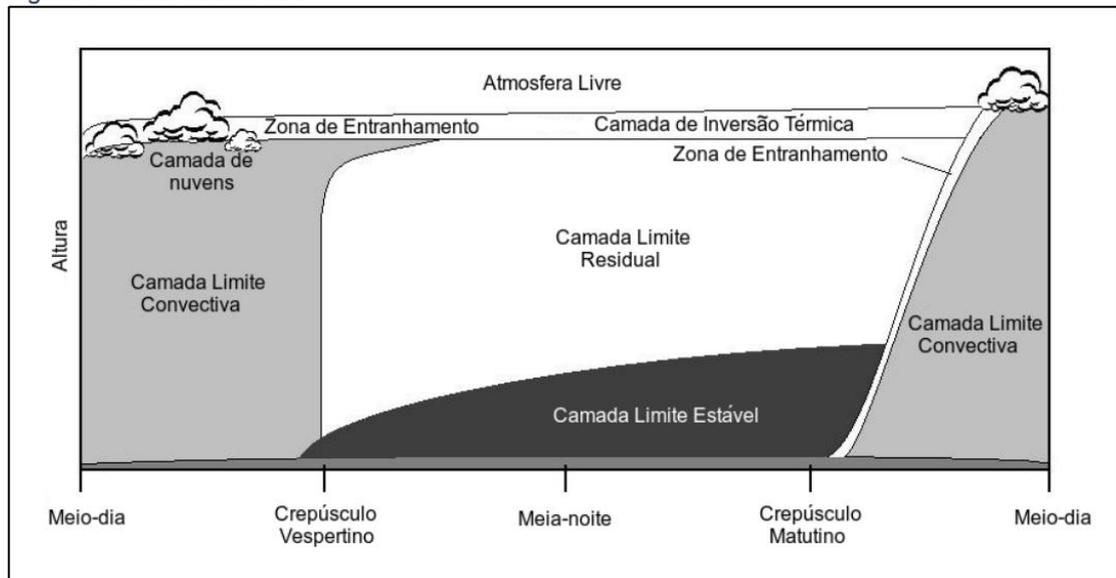
Fonte: Adaptado de Gaertner, 2020

4.8. Ciclo diário - CLP

Durante o amanhecer, a radiação solar aquece a superfície, formando a Camada Limite Convectiva (CLC), caracterizada pela convecção atmosférica. Conforme o dia avança, a CLC atinge seu máximo ao redor do meio-dia. Ao entardecer, a CLC desaparece, dando lugar à Camada Limite Estável (CLE), onde a atmosfera se torna mais estável e menos suscetível à convecção.

Acima da CLE, encontra-se a Camada Limite Residual (CLR), composta por resíduos da CLC, persistindo por um curto período após o pôr do sol, ver figura 7. Durante essas transições, a Camada Limite Planetária (CLP) pode adquirir um caráter neutro, conhecido como Camada Limite Neutra (CLN), especialmente em situações com intensos campos de velocidade ou cobertura de nuvens. Na região acima da CLP, chamada de Atmosfera Livre, a turbulência não é constante, mas a presença de jatos de vento pode gerar cisalhamento e formar a Turbulência de Ar Claro. Essas mudanças ao longo do ciclo diário influenciam o comportamento do escoamento atmosférico e as propriedades da atmosfera em diferentes camadas da Camada Limite Planetária (PUHALES, 2011).

Figura 7- Ciclo diário CLP



Fonte: Puhames adaptado de Stull (2011)

Sob condições convectivas, a camada limite possui uma extensão da ordem de quilômetros devido ao aumento da turbulência gerada pelo aquecimento da superfície, que origina células convectivas, uma vez que o ar quente é mais leve. Além disso, o cisalhamento do vento contribui para o aumento da turbulência. Por outro lado, sob condições estáveis, a camada limite é mais rasa devido à estabilidade térmica, que inibe a mistura vertical. Nesse contexto, qualquer parcela de ar perturbada que tenda a subir encontra regiões de menor densidade, sendo forçada a descer.

4.9. Plataforma VAPOR

O VAPOR é um produto do Laboratório de Sistemas Computacionais e de Informação do Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica. O suporte para o VAPOR é fornecido pela Fundação Nacional de Ciências dos EUA e pelo Instituto Coreano de Ciência e Tecnologia da Informação.

É uma Plataforma de Visualização e Análise para Pesquisadores Oceânicos, Atmosféricos e Solares, fornecendo um ambiente de visualização 3D interativo que também pode produzir animações e imagens de quadros estáticos, roda na maioria dos sistemas UNIX e Windows equipados com placas gráficas 3D modernas.

O modelo de dados VAPOR Data Collection (VDC) permite que os usuários acessem progressivamente a fidelidade de seus dados, permitindo a visualização de conjuntos de dados terascale em hardware de commodities. O VAPOR também pode importar diretamente formatos de dados, incluindo WRF, MOM, POP, ROMS e alguns arquivos GRIB e NetCDF (LI, 2019).

Os usuários podem realizar análises ad-hoc com o interpretador Python interativo do VAPOR, que permite a criação, modificação e visualização de novas variáveis com base nos dados do modelo de entrada.

5. METODOLOGIA

A seguir será apresentada a metodologia seguida para a realização do trabalho.

5.1. Simulação numérica:

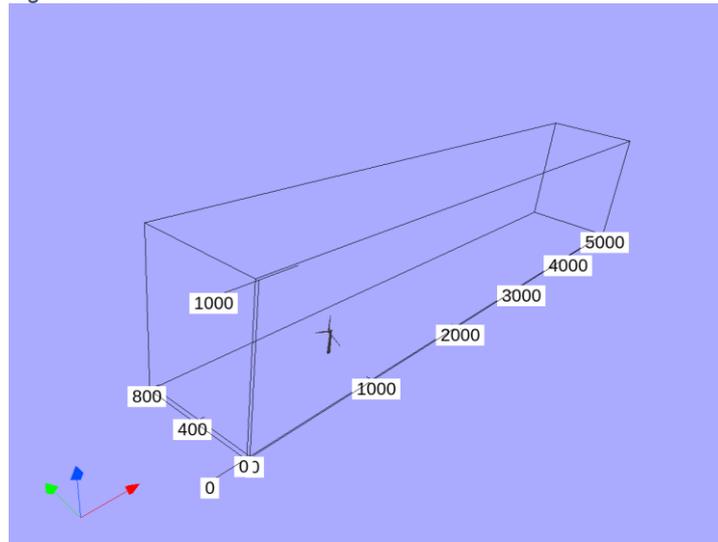
Para realizar as simulações numéricas, foi utilizado o modelo atmosférico PALM, amplamente utilizado para simulações de grandes turbilhões que envolvem escoamentos atmosférica.

As equações governantes que são resolvidas pelo PALM são a equação de continuidade, que descreve a conservação da massa, as equações de Navier-Stokes incompressíveis espacialmente filtradas, que descrevem a conservação do momento, e a equação para conservação das energias, para a temperatura potencial.

Na simulações realizadas no presente trabalho foi considerado um domínio computacional no formato de um paralelepípedo com dimensões cartesianas (x , y , z) de 5000, 800 e 1000 m, respectivamente, com o eixo da turbina eólica posicionado na coordenada (1000;400;150) m conforme representado na Figura 8. O eixo x foi alinhado com a direção do fluxo de entrada (velocidade de entrada), o eixo y é perpendicular ao eixo x e paralelo à superfície do solo, enquanto o eixo z é perpendicular a ambos os eixos anteriores. Essas dimensões foram escolhidas com base na necessidade de capturar as estruturas geradas pelos aerogeradores, assegurando uma resolução espacial adequada para representar a complexa interação entre o fluido e o aerogerador.

O domínio foi discretizado em uma malha com espaçamento de grade de 10 m, totalizando 500, 80 e 100 pontos de grade nas direções ortogonais x , y e z , respectivamente. É importante destacar que essa malha pode ser considerada relativamente grosseira para simulações de condições muito estáveis. No entanto, devido às limitações computacionais, a malha adotada foi escolhida com base na viabilidade computacional. Vale ressaltar que, quanto mais refinada for a malha, menor será o passo de tempo utilizado pelo modelo, o que resulta em um aumento significativo no tempo necessário para a realização de cada uma das simulações.

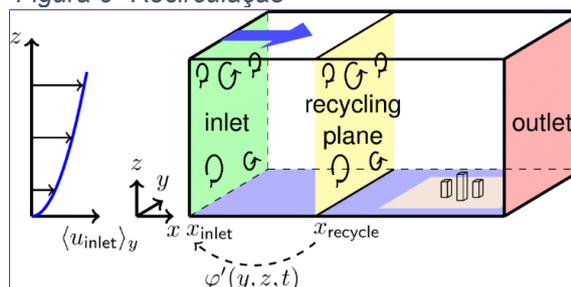
Figura 8- Domínio



Fonte: Elaboração Própria

Para garantir que a turbulência esteja presente no escoamento de entrada e uniforme ao longo de todo o domínio, foi empregada a técnica de recirculação. Essa técnica consiste na realização de uma simulação preliminar, em regime neutro, que estabelece as condições iniciais para as simulações subsequentes, permitindo que a turbulência se desenvolva de forma rápida, e tenha um custo computacional menor. A partir dessa simulação precursora, um plano de recirculação é inserido a uma distância fixa da região de entrada do domínio, e nesse plano, as flutuações em torno da média das variáveis do escoamento são estimadas. O sinal dessas flutuações é então incorporado ao escoamento na região de entrada. Dessa maneira, pode-se considerar que duas simulações simultâneas são realizadas: a primeira com o objetivo do desenvolvimento da turbulência em todo o domínio, evitando simulações longas, enquanto a segunda simula o escoamento com a turbulência homogênea na região de interesse da análise (Figura 9). O presente trabalho considerou uma região de recirculação com um comprimento de 300 m e uma altura de 600 m.

Figura 9- Recirculação



Fonte: Palm, 2021

Os campos das componentes do vetor velocidade e da temperatura potencial foram salvos a cada 600 segundos (10 minutos) em um arquivo NetCDF, e não a cada passo de tempo (ajustado automaticamente pelo modelo) em que as equações diferenciais parciais foram integradas. Esse intervalo foi escolhido para minimizar o espaço necessário para armazenar os dados de saída, considerando que uma simulação de 9 horas gera um volume significativo de dados. O tempo total de simulação foi definido em 9 horas para garantir que o escoamento atingisse uma condição estacionária, permitindo uma análise adequada dos efeitos de esteira.

Com o objetivo de avaliar a produção de energia da turbina eólica NREL 15 MW e investigar os efeitos da esteira gerados pelo aerogerador, foram consideradas três velocidades de vento de entrada (vento geostrófico): 5 m/s, 10 m/s e 15 m/s. Essas velocidades foram analisadas sob três diferentes condições de estabilidade atmosférica, descritas a seguir:

1. **Estável:** taxa de resfriamento superficial de -0,5 e -0,25 K/h;
2. **Neutra:** taxa de resfriamento superficial de 0 K/h;
3. **Instável:** taxa de aquecimento superficial de 0,5 e 1,0 K/h.

No total, foram realizadas 15 simulações, combinando as três velocidades de entrada com os diferentes regimes de estabilidade atmosférica.

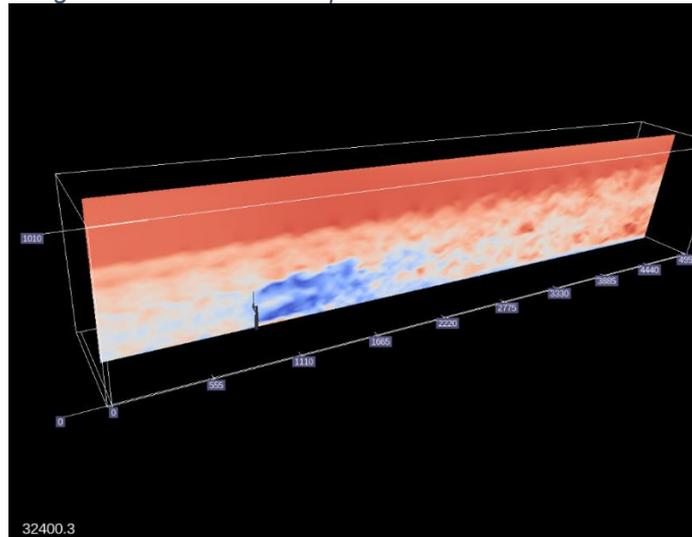
O namelist utilizado é apresentado detalhadamente no APENDICE A.

5.2. Visualização

Para visualização das simulações foram utilizados softwares para leitura de arquivos NetCFD, como o Vapor, o Ncview e scripts em Python. Para avaliar a esteira, foram feitos cortes no eixo da turbina com a ferramenta Slice, enquanto para análise 3D foi utilizada a ferramenta Volume, ambas disponíveis no VAPOR. Já o Ncview foi utilizado para obter a potência extraída pelo aerogerador. Exemplos da utilização do Vapor e Ncview serão apresentados a seguir.

A ferramenta Slice foi utilizada para realizar um corte no eixo central da turbina, possibilitando assim uma visualização geral do comportamento da velocidade, na Figura 10 é apresentado um exemplo do campo de velocidade.

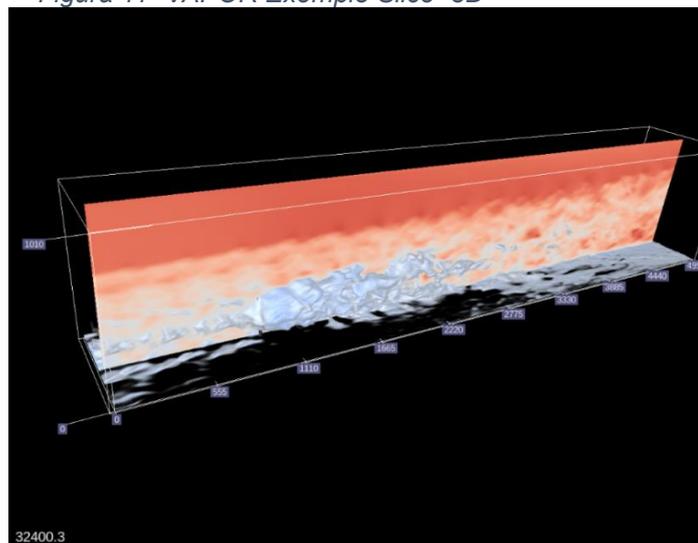
Figura 10- VAPOR Exemplo Slice



Fonte: Elaboração Própria

Para uma visualização da esteira em 3D, foi utilizada a ferramenta Volume, também do Vapor, para analisar o comportamento da esteira, a seguir é apresentado na figura 11, as áreas selecionadas.

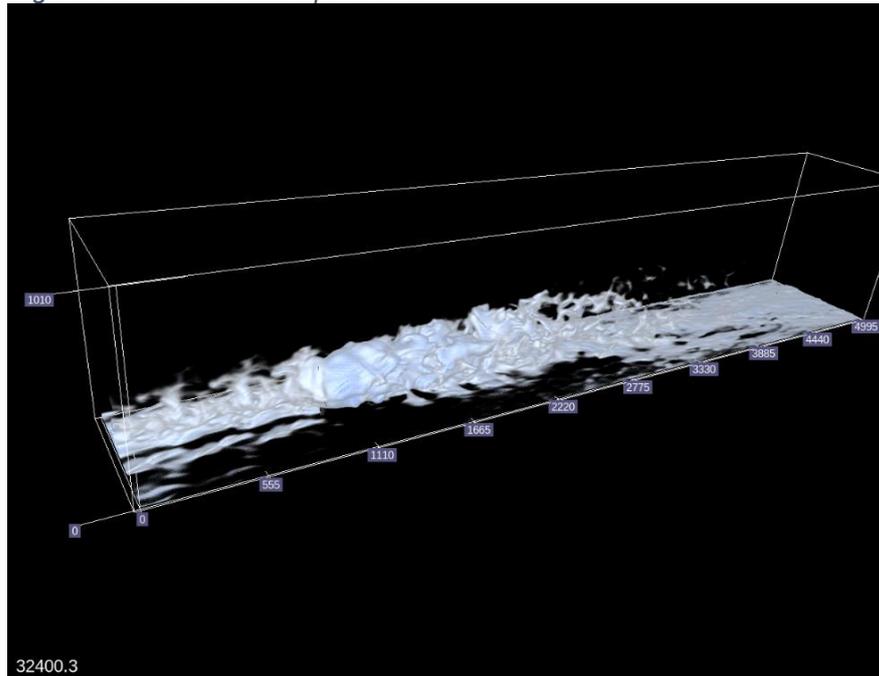
Figura 11- VAPOR Exemplo Slice+3D



Fonte: Elaboração Própria

Na figura 12, é apresentada a visualização da esteira em 3D, a qual foi utilizado um valor de 60% da velocidade de entrada, apresentando bons resultados para todo o desenvolvimento das simulações.

Figura 12- VAPOR Exemplo de 3D



Fonte: Elaboração Própria

A Figura 13, é apresentado um gráfico de geração, o qual foi obtido através do software Ncview.

Figura 13- Ncview Geração Ug10_1.0



Fonte: Geração Própria

6. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos das simulações e analisados os efeitos da estratificação térmica no comportamento da esteira e na extração de potência realizada pela turbina.

As simulações foram realizadas em computador pessoal com processador Intel(R) Core (TM) i7-11800, o qual tem frequência máxima de 2,30GHz, foram utilizados 8 núcleos por simulação, as 15 simulações resultaram em 225h de execução e arquivos totalizando 218GB.

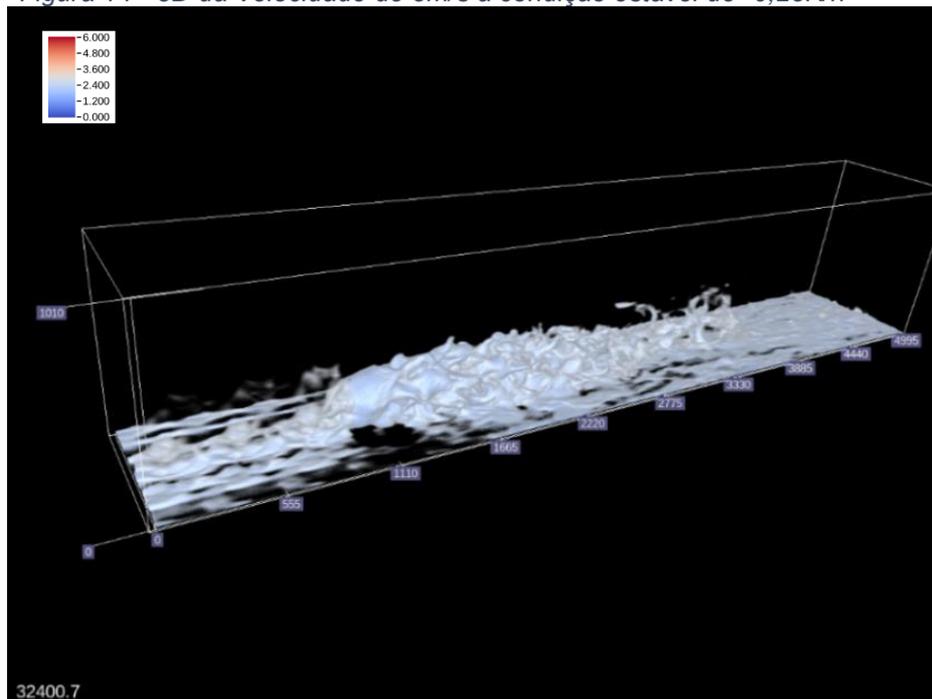
6.1. Comprimento de Esteira

A seguir, será analisado o comprimento da esteira gerada por uma turbina NREL 15MW, para as velocidades de entrada do vento de 5m/s, 10m/s e 15m/s, com troca térmica de -0.25K/h para o caso estável, 0.0K/h para o neutro e 0.5K/h para o convectivo. Todos os casos foram analisados no tempo de 32400 segundos, ou seja, 9 horas. Posteriormente serão comparadas as velocidades médias obtidas.

6.1.1. Vento 5m/s

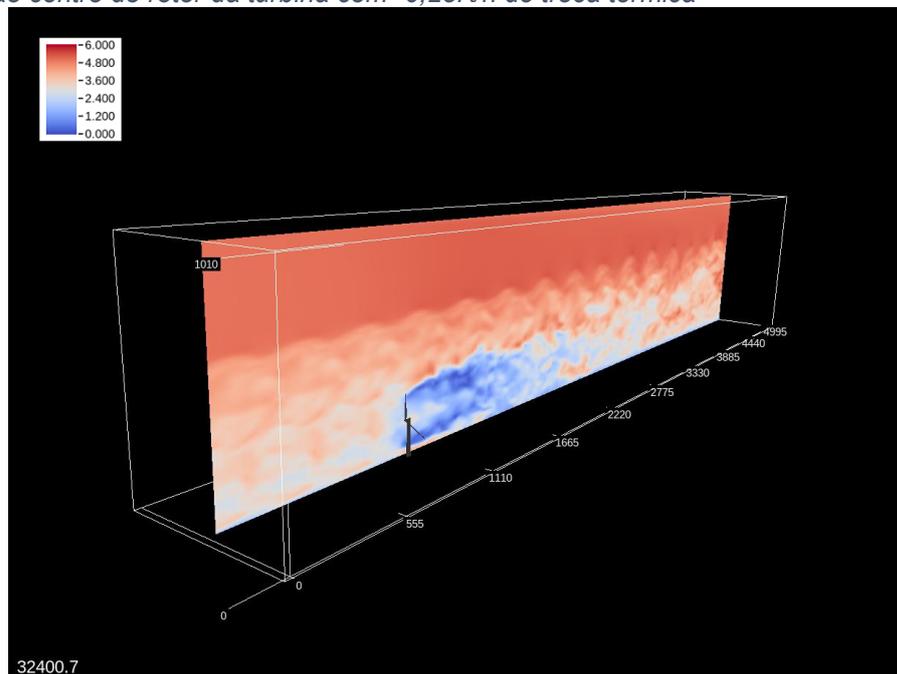
A Figura 14 apresenta a estrutura tridimensional da esteira gerada em uma condição de escoamento com velocidade de entrada de 5 m/s e taxa de resfriamento da superfície de -0,25 K/h, caracterizando uma condição atmosférica estável. Em contraste, a Figura 15 exibe o corte no plano XY, representando a velocidade horizontal média do escoamento ao longo do eixo, passando pelo centro do rotor. A visualização mostra uma esteira próxima com comprimento aproximado de 700 m, enquanto a esteira distante se estende até uma posição de 3330 m ao longo do eixo x. A extensão total da esteira, tanto na região próxima quanto distante, equivale a aproximadamente 9,7 diâmetros de turbina. Além disso, observa-se que o campo de velocidades é perturbado pela interação com a superfície e pela presença da turbina eólica apresentando oscilações a uma altura de aproximadamente 600 m, indicando o impacto da estratificação térmica e da interação do escoamento com o a turbina eólica.

Figura 14 - 3D da Velocidade de 5m/s a condição estável de -0,25K/h



Fonte: Geração Própria

Figura 15 - Velocidade 5m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina com -0,25K/h de troca térmica

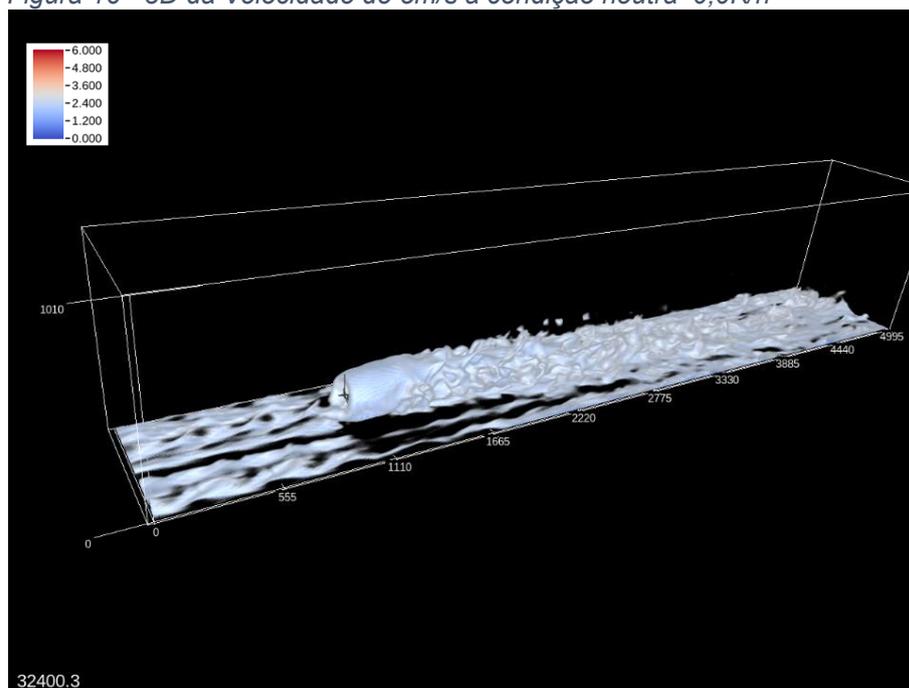


Fonte: Geração Própria

Na camada limite neutra (Figuras 16 e 17), a esteira próxima apresenta um comportamento horizontal, sem meandros, e seu comprimento é aproximadamente de 2,7 diâmetros de turbina, ou seja, 660 m. A esteira distante se estende até uma posição aproximada de 2775 m. A jusante dessa posição, ainda é possível observar estruturas turbulentas, cujas características

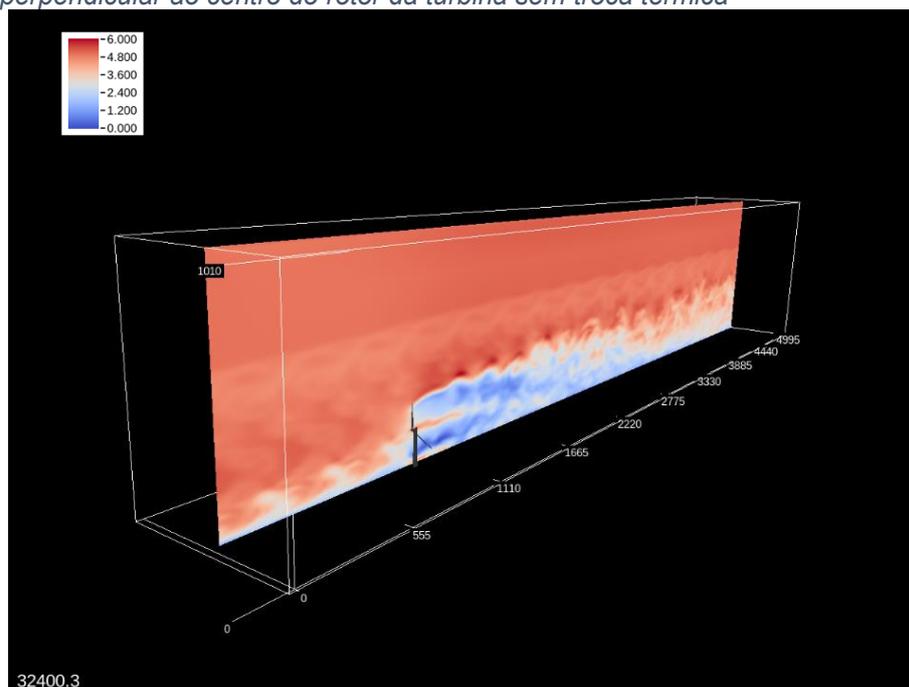
indicam que são típicas de um escoamento neutro, originadas da interação com a superfície do solo (estruturas partindo da superfície, Figura 16). De maneira semelhante à condição estável, o campo de velocidades é perturbado até uma altura de aproximadamente 600 m. No entanto, ao contrário da situação estável, não se observam oscilações significativas no escoamento.

Figura 16 - 3D da Velocidade de 5m/s a condição neutra 0,0K/h



Fonte: Elaboração Própria

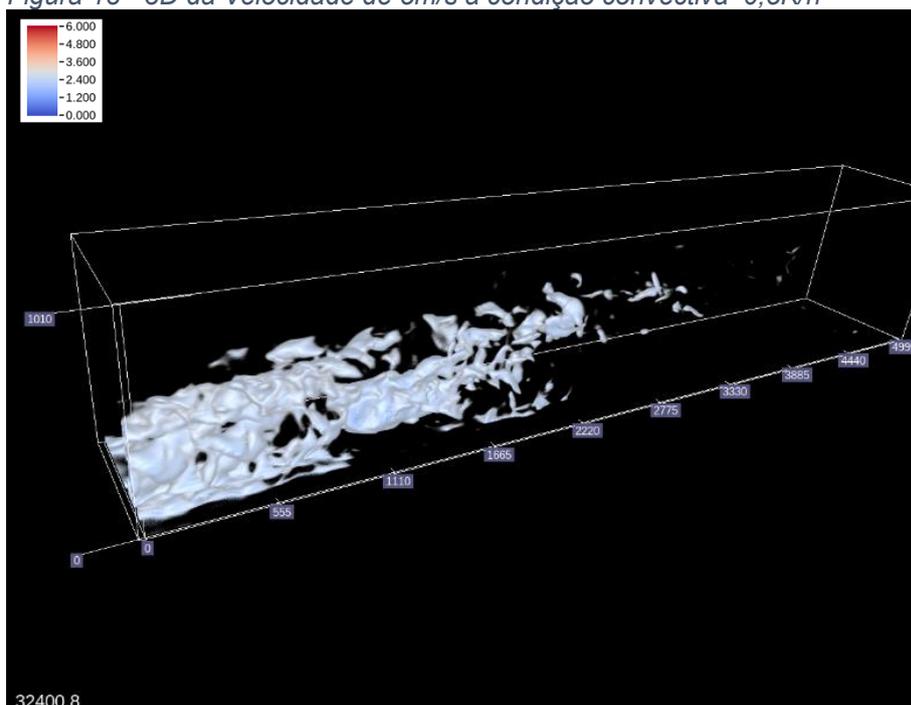
Figura 17 - Velocidade 5m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina sem troca térmica



Fonte: Elaboração Própria

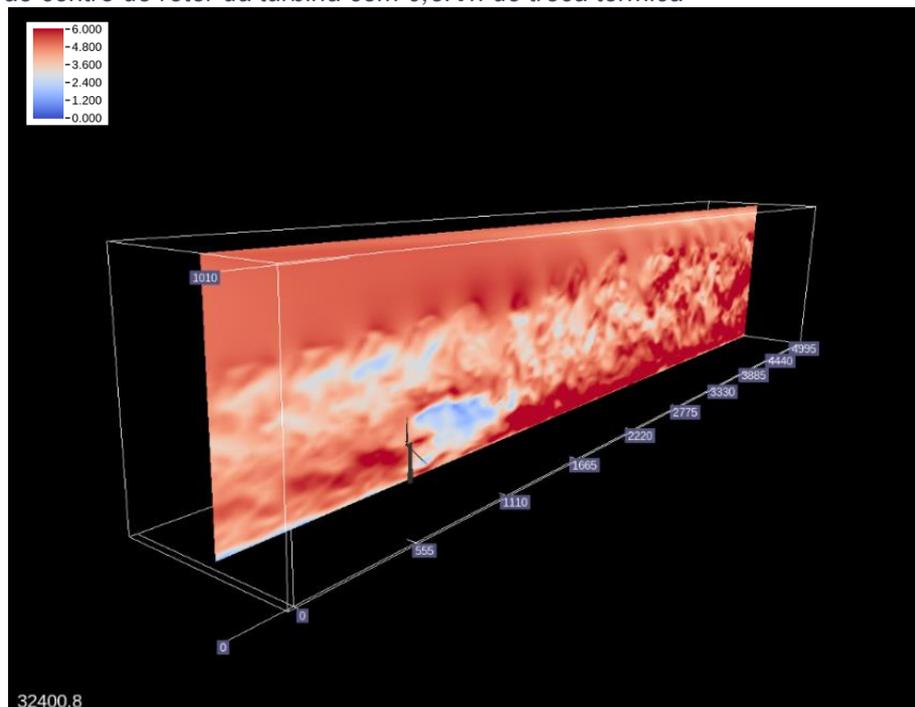
Para a camada limite atmosférica em uma condição convectiva, observa-se uma mudança significativa no comportamento da esteira. Com uma taxa de aquecimento superficial de 0,5 K/h, a esteira se dissipa rapidamente, apresentando um comprimento consideravelmente menor do que nas condições neutra e estável. O comprimento observado da esteira é de aproximadamente 665 m, o que corresponde a menos de 3 diâmetros da turbina (Figuras 18 e 19). Essa dispersão e redução no comprimento da esteira refletem os efeitos do aquecimento da superfície, que origina células convectivas, as quais aumentam a intensidade da turbulência. Essa turbulência desempenha um papel importante na homogeneização e uniformização do escoamento. No corte XY, observa-se que a altura da camada limite ultrapassa os 1000 m, com grande intensidade de turbulência, caracterizando uma dinâmica convectiva significativa no escoamento.

Figura 18 - 3D da Velocidade de 5m/s a condição convectiva 0,5K/h



Fonte: Elaboração Própria

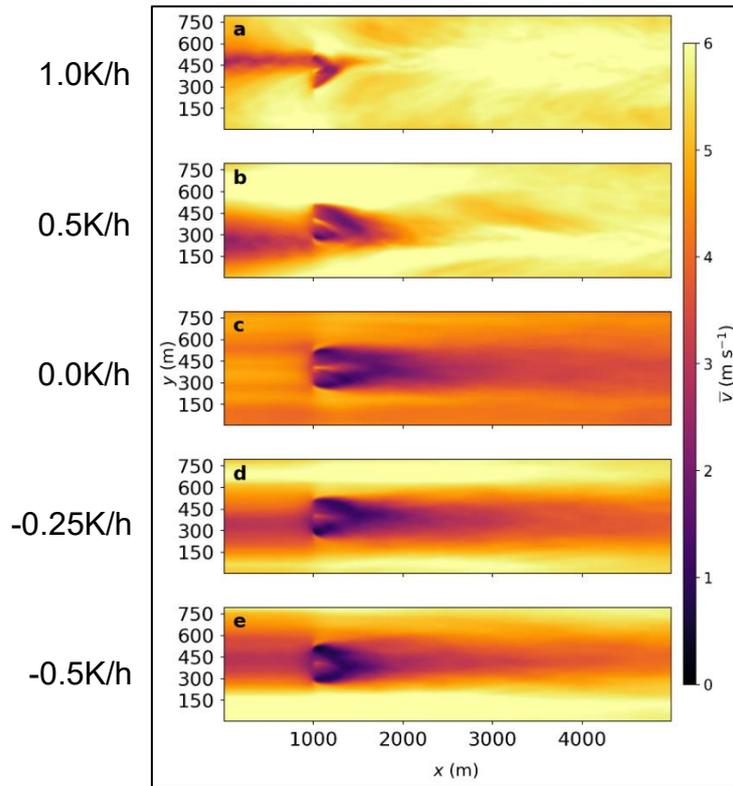
Figura 19 - Velocidade 5m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina com 0,5K/h de troca térmica



Fonte: Elaboração Própria

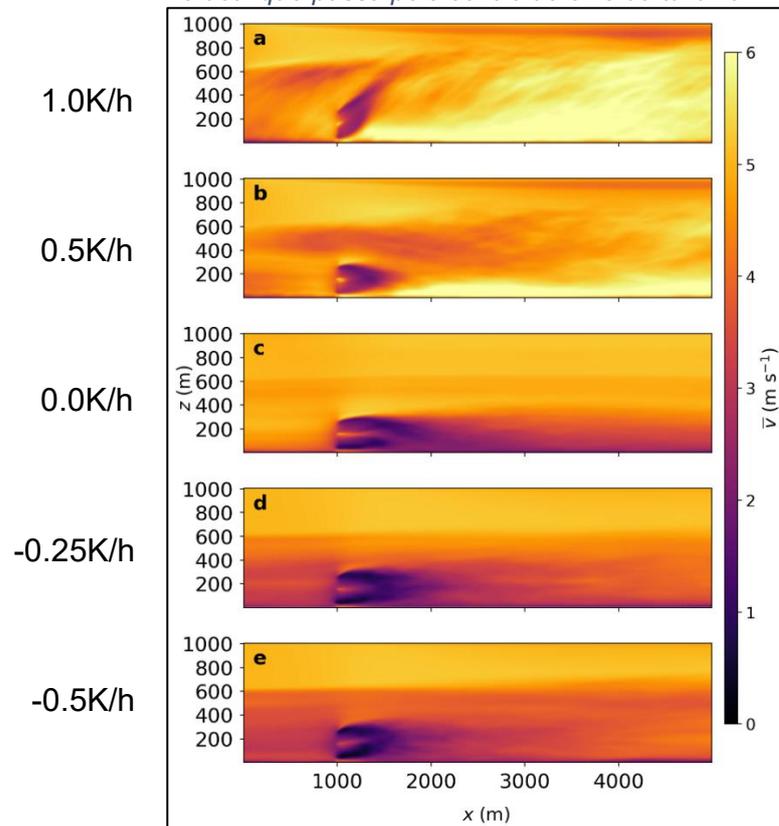
A seguir, as Figuras 20 e 21 apresentam os campos das velocidades médias horizontais para o escoamento em cortes verticais e horizontais, respectivamente, passando pelo centro do rotor do aerogerador. Como a velocidade do escoamento de entrada é de baixa intensidade, observa-se que, no caso mais convectivo, a esteira apresenta um comportamento ascendente, devido à taxa de aquecimento da superfície. Esse comportamento destaca a importância e a intensidade do movimento vertical das células convectivas. Nos casos estáveis e neutro, os comprimentos da esteira são aproximadamente semelhantes. No entanto, é possível observar que, nos casos estáveis, a velocidade do escoamento é menor na altura da turbina, devido à interação do escoamento com a estratificação térmica originada pelo resfriamento da superfície. Ao contrário do estudo realizado por Abkar (2015), o presente não assume que a intensidade da velocidade do vento seja igual em ambas as condições de estabilidade consideradas na altura do centro do rotor da turbina, representando situações mais próximas às observadas na natureza. É importante ressaltar que a presença de uma região de recirculação próxima à turbina eólica induz uma camada limite interna.

Figura 20 - Perfil de Vel. Média para a velocidade de 5m/s, no plano horizontal sobre centro do eixo da turbina



Fonte: Elaboração Própria

Figura 21 – Perfil de Vel. Média para a velocidade de 5m/s, no plano vertical que passa pelo centro do eixo da turbina

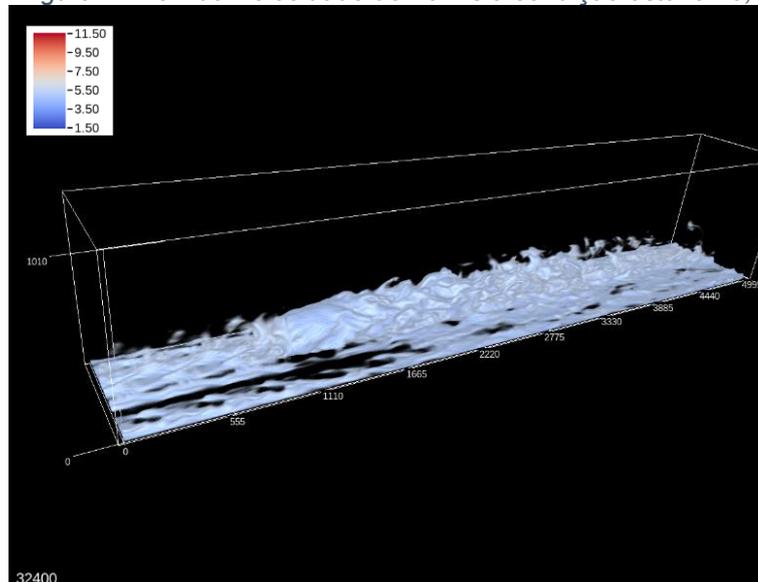


Fonte: Elaboração Própria

6.1.2. Vento 10m/s

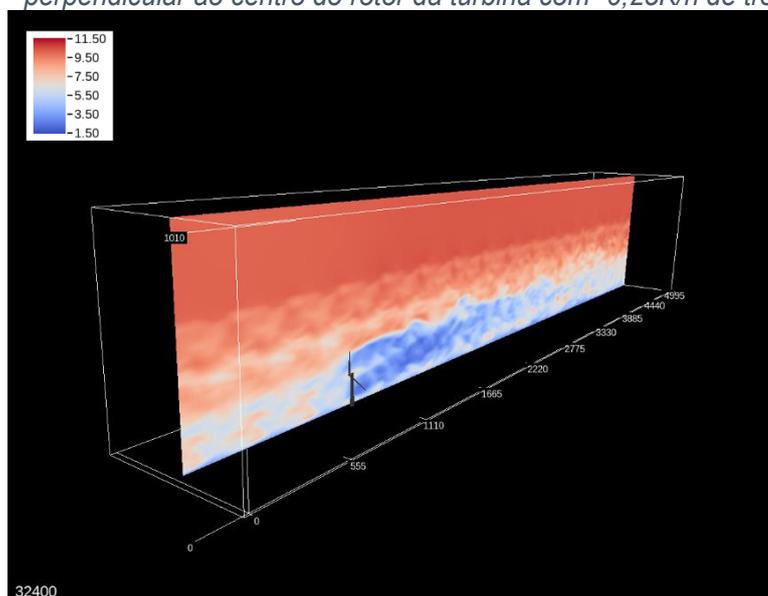
Para velocidade de 10m/s, o comportamento se mantém semelhante, porém ocorre um achatamento e prolongamento da esteira, com $-0,25K/h$ o comprimento de esteira próxima aumenta para 1220m, enquanto o comprimento total, quando somado com a esteira distante é de aproximadamente 2885m, ou 12 diâmetros de turbina, conforme mostrado na Figura 22. Em relação à altura da camada limite, esta continuou com aproximadamente 600m, porém apresentou menos meandros, como pode ser observado a Figura 23.

Figura 22 - 3D da Velocidade de 10m/s a condição estável $-0,25K/h$



Fonte: Elaboração Própria

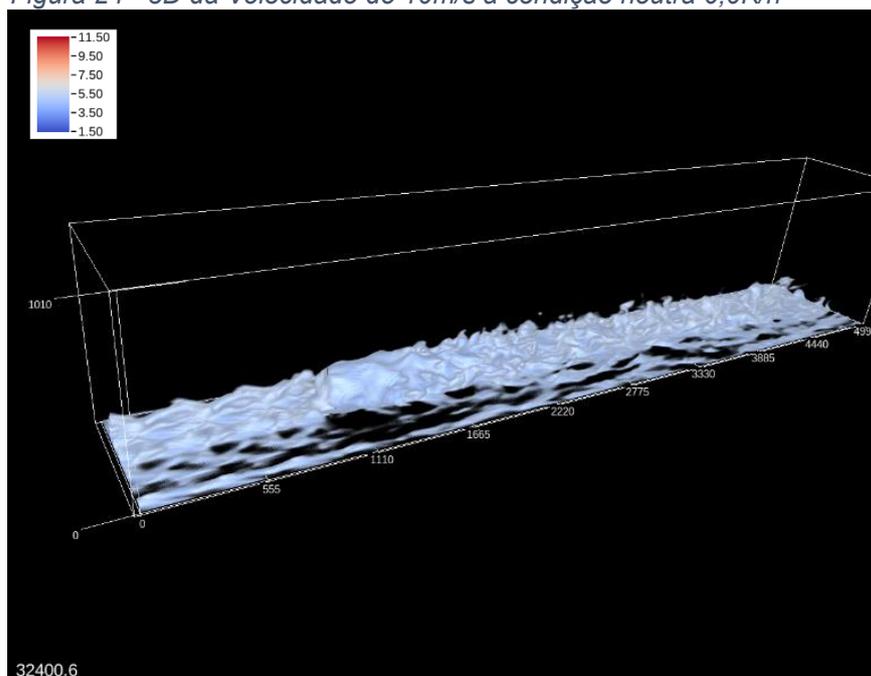
Figura 23 - Velocidade 10m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina com $-0,25K/h$ de troca térmica



Fonte: Elaboração Própria

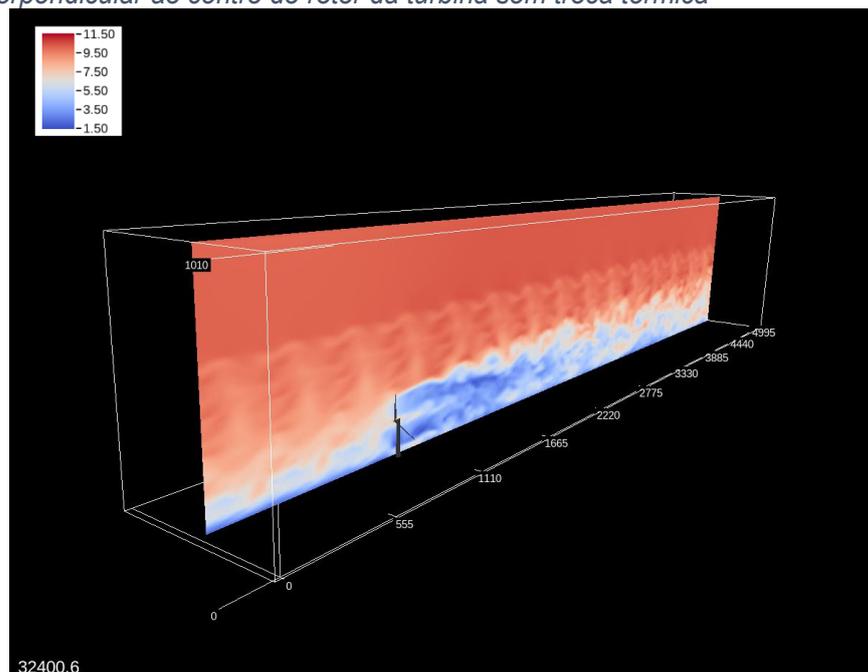
Para o caso neutro, nesta velocidade a esteira próxima tem comprimento semelhante da condição estável, de 1220m, enquanto o comprimento total fica próximo de 2330m ou 9,7 diâmetros de turbina (Figura 24). O plano XY da Figura 25, torna mais fácil a visualização do comprimento de esteira. A altura da camada limite também não foi alterada neste caso.

Figura 24 - 3D da Velocidade de 10m/s a condição neutra 0,0K/h



Fonte: Elaboração Própria

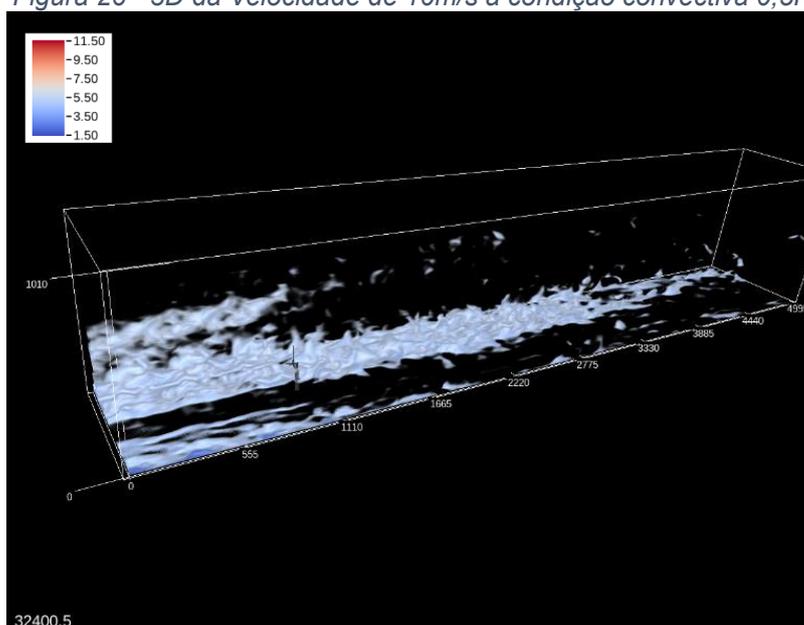
Figura 25 - Velocidade 10m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina sem troca térmica



Fonte: Elaboração Própria

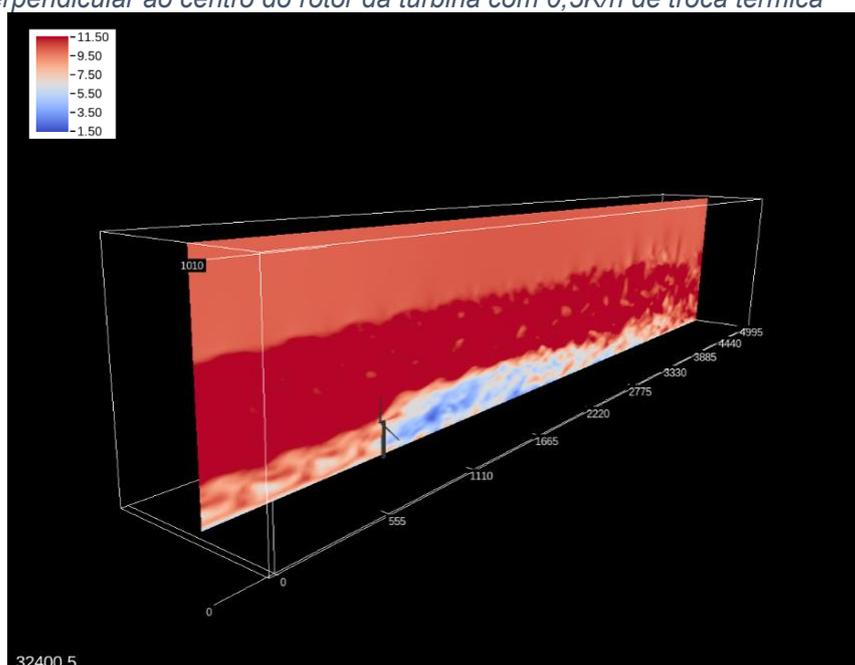
Na condição convectiva, nesta velocidade é apresentada dificuldade em apresentar o 3D da esteira, pois a variação de velocidade e a grande intensidade de turbulência dificultam para isolar o seu efeito (Figura 26). No corte do plano XY, houve uma diminuição perceptível na altura da camada limite atmosférica, sugerindo que o domínio não tem tamanho suficiente para o seu desenvolvimento total. Já o comprimento de esteira, pode ser bem visualizado, algo próximo de 1200m ou 5 diâmetros de turbina (Figura 27).

Figura 26 - 3D da Velocidade de 10m/s a condição convectiva 0,5K/h



Fonte: Elaboração Própria

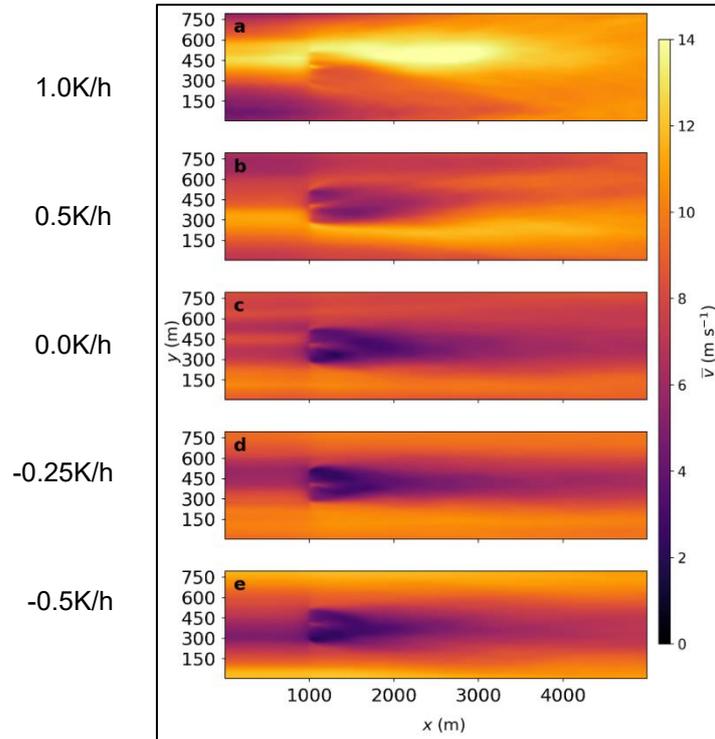
Figura 27 - Velocidade 10m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina com 0,5K/h de troca térmica



Fonte: Elaboração Própria

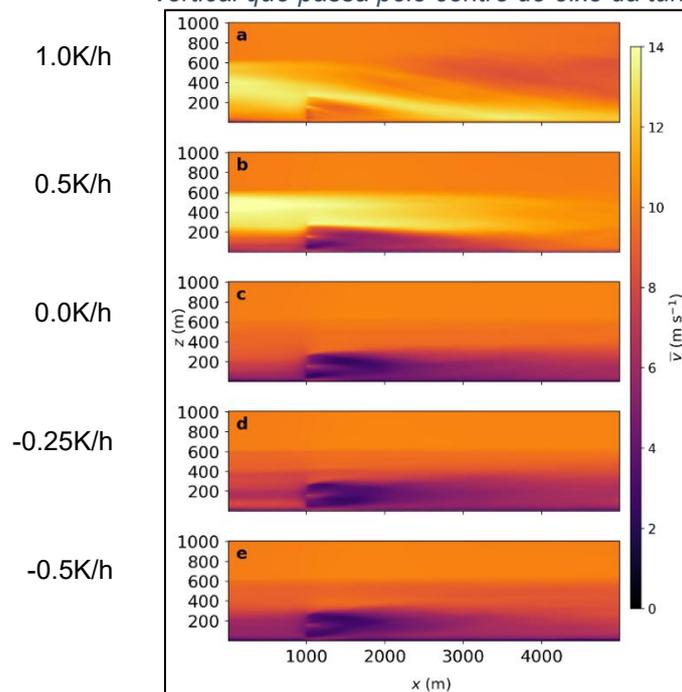
Comparando as velocidades médias apresentadas nas Figura 28 e 29, mais uma vez notamos as semelhanças no comprimento de esteira entre os casos neutros e estáveis, porém novamente é apresentado diferença da velocidade incidida sobre o eixo do aerogerador.

Figura 28 – Perfil de Vel. Média para a velocidade de 10m/s, no plano horizontal sobre o eixo da turbina



Fonte: Elaboração Própria

Figura 29 – Perfil de Vel. Média para a velocidade de 10m/s, no plano vertical que passa pelo centro do eixo da turbina

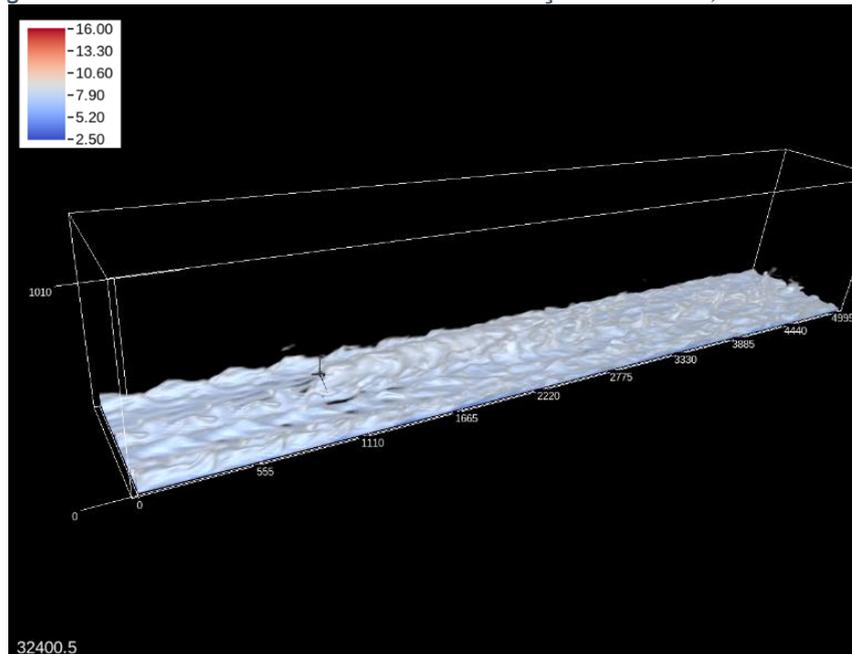


Fonte: Elaboração Própria

6.1.3. Vento 15m/s

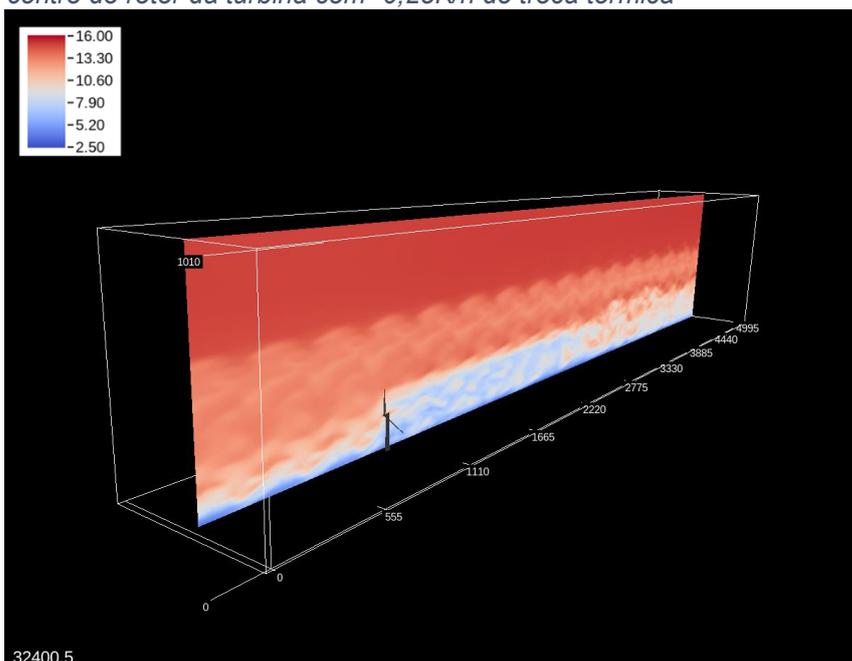
Na velocidade de escoamento de 15m/s, o caso estável foi o que apresentou a maior esteira, porém houve uma diminuição do seu comprimento em relação a velocidade anterior, medindo aproximadamente 1775m (Figura 30). Mais uma vez o corte no plano XY mostra uma melhor visualização da esteira, conforme Figura 31.

Figura 30 - 3D da Velocidade de 15m/s a condição estável -0,25K/h



Fonte: Elaboração Própria

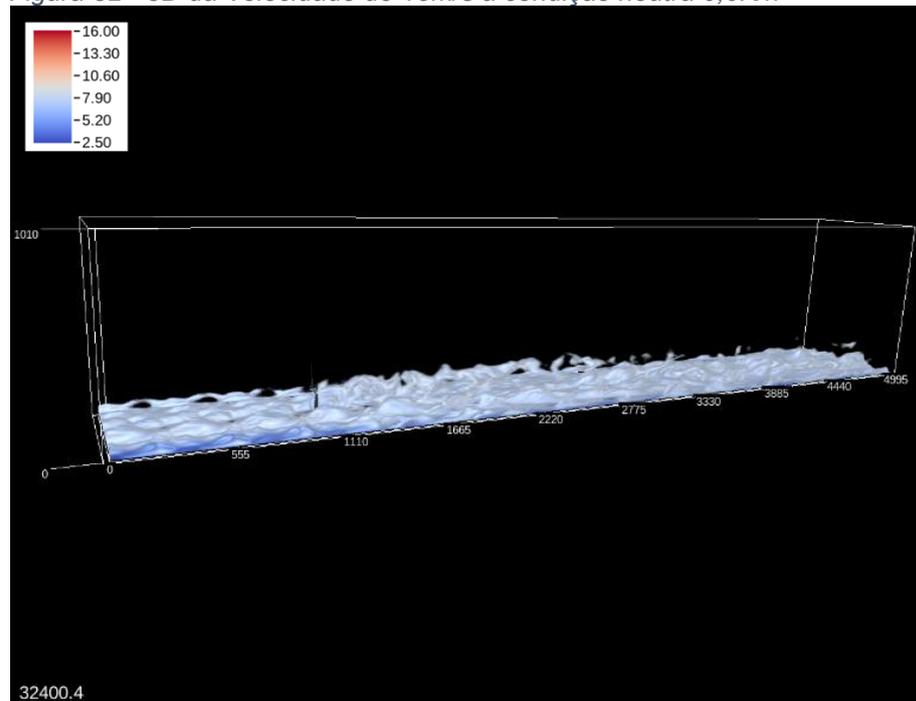
Figura 31 - Velocidade 15m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina com -0,25K/h de troca térmica



Fonte: Elaboração Própria

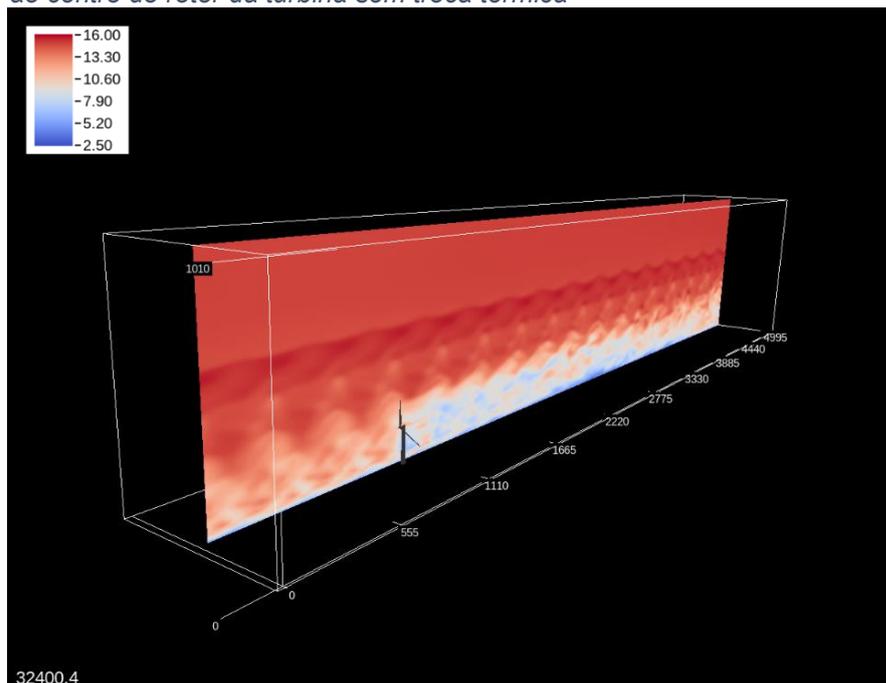
Na condição neutra, é difícil encontrar o comprimento de esteira, pois ela mistura-se com a turbulência gerada no solo, porém é possível identificar que o comprimento é menor, quando comparada com a esteira na velocidade anterior (Figura 32). Mesmo no corte XY percebe-se que a esteira se dissipa rapidamente, dificultando a medição de um comprimento efetivo (Figura 33).

Figura 32 - 3D da Velocidade de 15m/s a condição neutra 0,0K/h



Fonte: Elaboração Própria

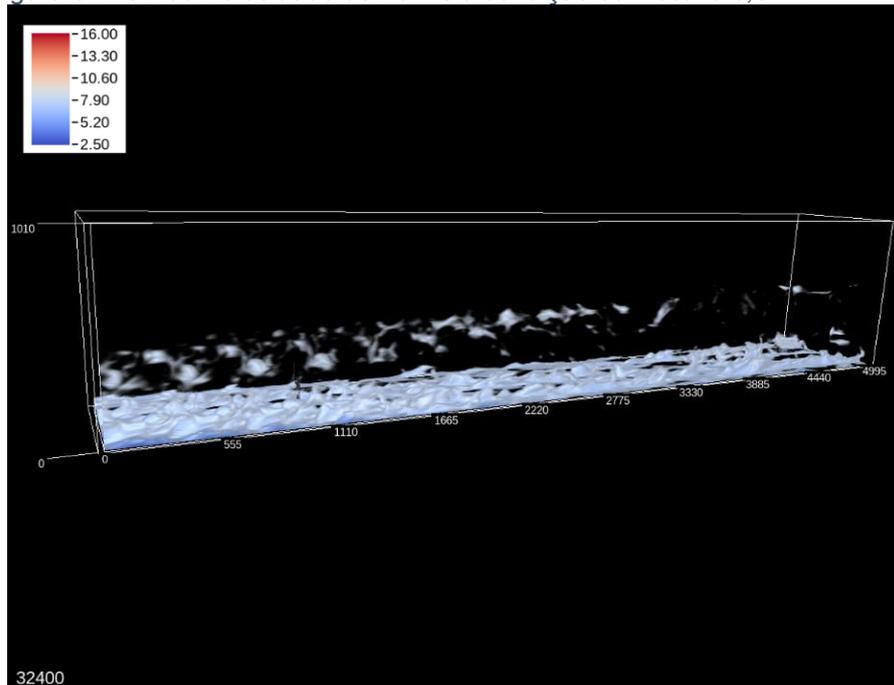
Figura 33 - Velocidade 15m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina sem troca térmica



Fonte: Elaboração Própria

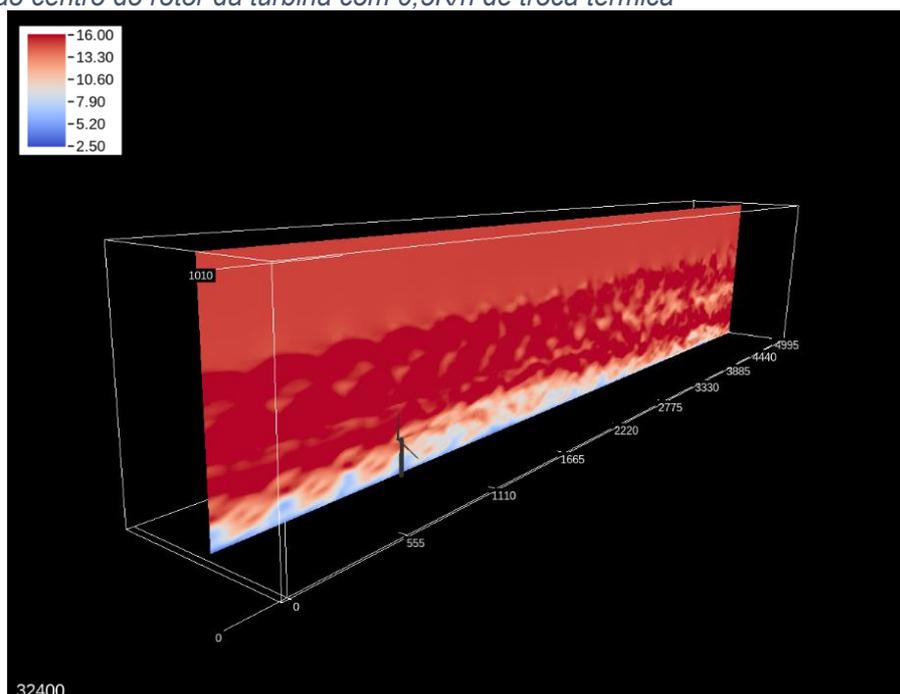
Para a condição convectiva, no 3D não foi possível isolar a esteira, pois o alto nível de turbulência varia a velocidade ao ponto de por alguns momentos os efeitos de esteira tornarem-se imperceptíveis quando comparados com o restante do escoamento (Figura 34). Mesmo no corte XY, mostrado na Figura 35, percebe-se a dificuldade em separar o que é efeito de esteira do comportamento normal desenvolvido no escoamento.

Figura 34 - 3D da Velocidade de 15m/s a condição convectiva 0,5K/h



Fonte: Elaboração Própria

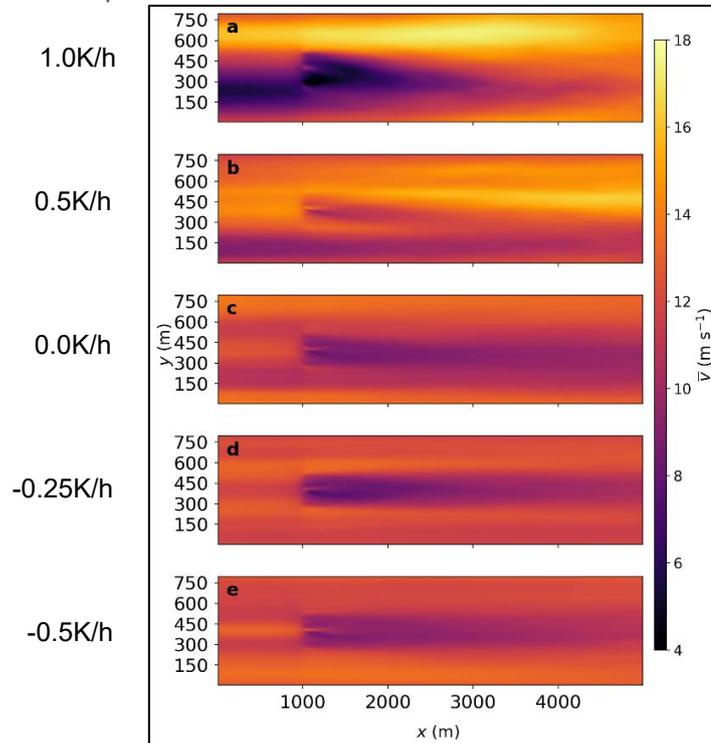
Figura 35 - Velocidade 15m/s no plano vertical médio para o plano x,y, perpendicular ao centro do rotor da turbina com 0,5K/h de troca térmica



Fonte: Elaboração Própria

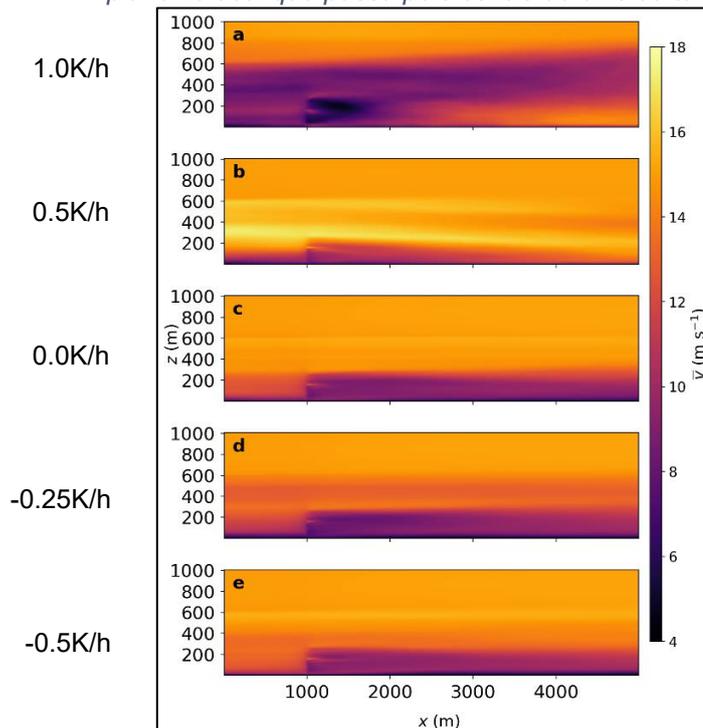
Ao observarmos as velocidades médias na altura da turbina, apresentadas na Figura 36 e 37, pode-se notar uma maior homogeneidade nos escoamentos, principalmente nos mais estáveis.

Figura 36 - Perfil de Vel. Média para a velocidade de 15m/s, no plano horizontal sobre o centro do eixo da turbina



Fonte: Elaboração Própria

Figura 37 - Perfil de Vel. Média para a velocidade de 15m/s, no plano vertical que passa pelo centro do eixo da turbina

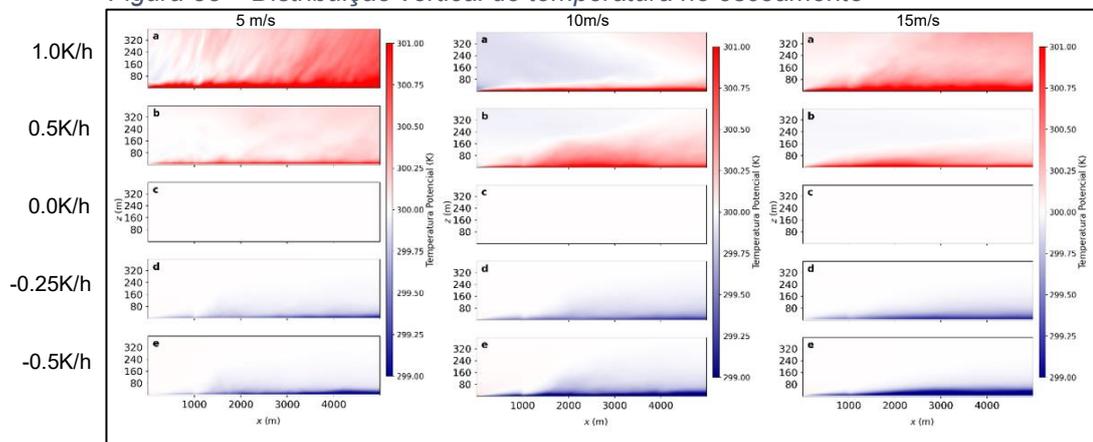


Fonte: Elaboração Própria

6.2. Temperatura

A seguir, é apresentado na Figura 38, o comportamento da temperatura no escoamento, na primeira coluna está a velocidade de 5m/s, na segunda 10m/s enquanto na última 15m/s, podemos ver que o comportamento depende tanto dos gradientes térmicos quanto da velocidade do escoamento, aqui percebe-se que o aumento da velocidade intensifica o transporte convectivo de calor e a mistura turbulenta, reduzindo os gradientes térmicos locais. Já para os casos mais estáveis esta troca térmica apresenta gradientes maiores e ocorre mais próxima da superfície. Também percebe-se a formação de uma camada limite de temperatura ao longo do escoamento.

Figura 38 – Distribuição vertical de temperatura no escoamento

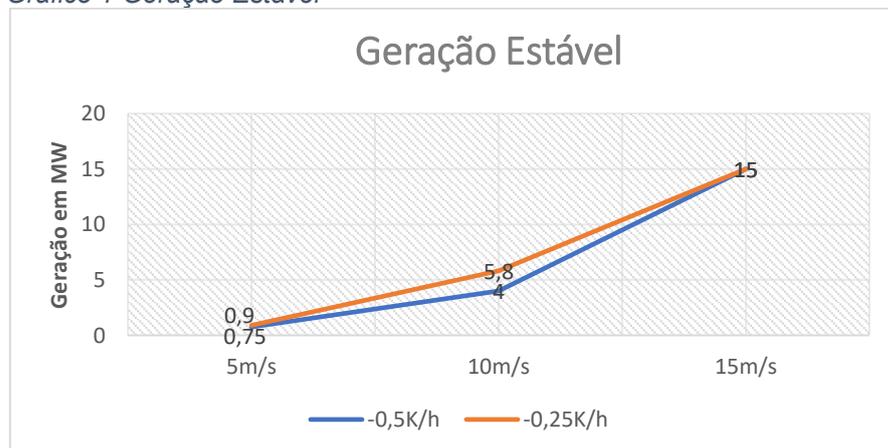


Fonte: Elaboração Própria

6.3. Geração de Energia

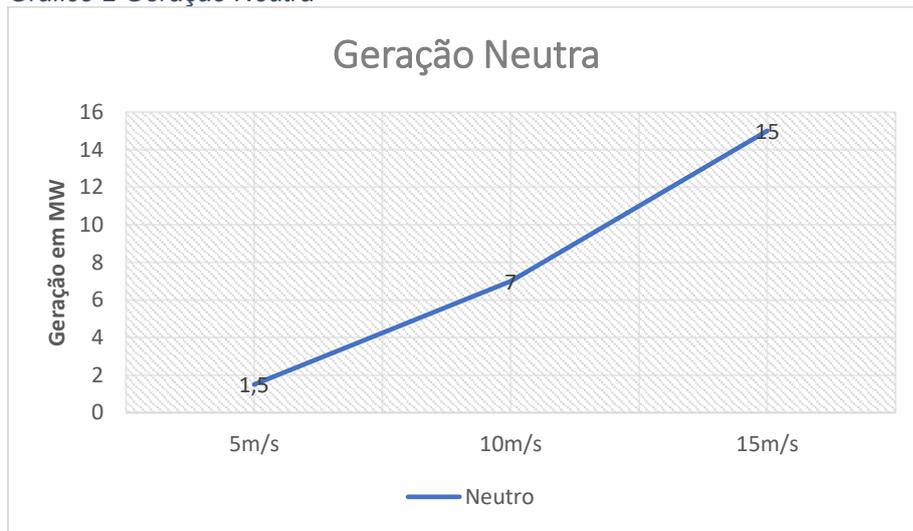
A seguir, os Gráficos 1, 2 e 3 mostram a geração de energia extraída pela turbina em relação a velocidade do vento, de acordo com cada condição de estabilidade atmosférica. Para tal, foi considerada a média da energia gerada nas duas últimas horas de simulação.

Gráfico 1 Geração Estável



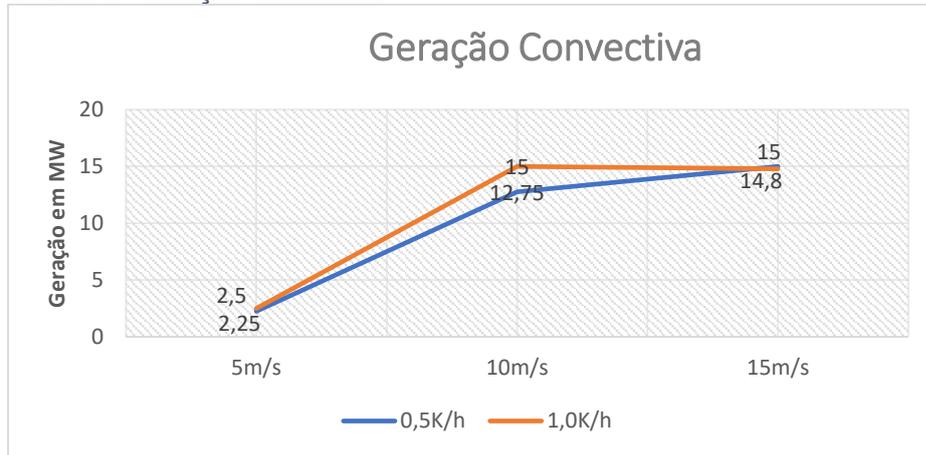
Fonte: Elaboração Própria

Gráfico 2 Geração Neutra



Fonte: Elaboração Própria

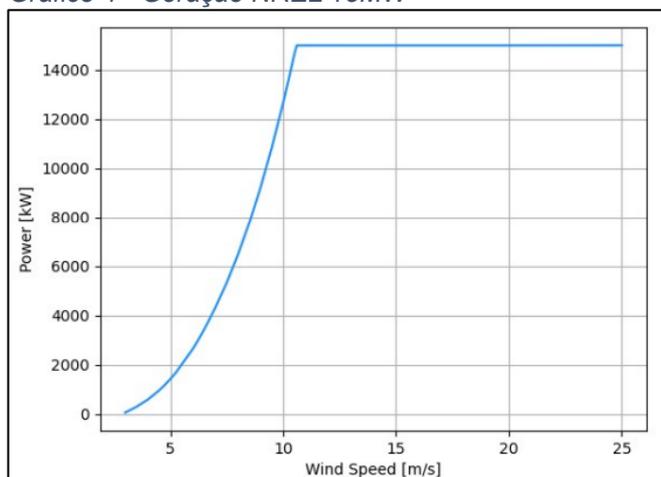
Gráfico 3 - Geração Convectiva



Fonte: Elaboração Própria

Comparando os resultados obtidos nas simulações com a geração fornecida no manual de especificações da turbina (Gráfico 4), podemos notar uma maior semelhança entre o caso convectivo e os dados fornecidos.

Gráfico 4 - Geração NREL 15MW



Fonte: GAERTNER (2020)

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho possibilitou obter conhecimento em relação aos efeitos da estratificação térmica na esteira gerada por uma turbina, além disso, possibilitou desenvolver conhecimento na área de CFD e aplicações do método LES, através do modelo atmosférico PALM, que se mostrou efetivo e versátil para a realização das simulações apresentadas.

Observou-se que o comprimento de esteira, varia tanto com a velocidade de entrada do escoamento, quanto com a estratificação térmica. O comportamento observado em relação a condição da camada limite atmosférica, mostrou que as maiores esteiras são apresentadas nos casos estáveis e neutros, enquanto as menores nos convectivos, no entanto, diferentemente do estudo proposto por Abkar (2015), a velocidade de incidência sobre o aerogerador não foi mantida constante, permitindo que o escoamento se ajustasse à taxa de resfriamento ou aquecimento da superfície, o que reflete de maneira mais realista a interação entre o vento e a condição de estabilidade atmosférica.

A variação no comprimento da esteira surge da diferença de densidade do ar, no caso convectivo, quando o ar é aquecido, ele forma plumas de menor densidade, as quais ascendem no escoamento, aumentando os efeitos de turbulência e favorecendo a dispersão da esteira, já na condição estável, essa característica é invertida, quando o ar tende a subir devido alguma perturbação, ele possui densidade maior que as camadas superiores, freando esse movimento, enquanto o ar na parte mais baixa tem a dispersão dificultada pelo solo como barreira.

Em relação aos efeitos da velocidade, notou-se que para baixas velocidades, a esteira aumenta conforme aumenta a velocidade de entrada do escoamento, porém há um ponto em que essa relação inverte, possivelmente pelo fato de a turbulência aumentar próximo a superfície, levando a perturbação gerada na turbina a ficar equiparável com os efeitos do próprio solo.

Em condições cíclicas, a temperatura da atmosfera próxima à superfície acompanharia de forma uniforme a taxa de transferência térmica. Contudo, como essas condições não foram aplicadas, a temperatura variou ao longo do escoamento. Isso levou à formação de uma camada interna originada da região de recirculação, causando variação térmica do ar ao longo do fluxo. O ar de

entrada, inicialmente com temperatura distinta, aquece ou esfria progressivamente enquanto se desloca, gerando uma diferença térmica ao longo do eixo x.

A geração de energia também foi influenciada pela estratificação térmica, para uma mesma velocidade de entrada no escoamento, a geração aumentou para valores maiores de troca térmica do solo para o ar, em velocidades mais baixas, a geração da condição mais convectiva foi três vezes maior, quando comparada com a mais estável.

Para trabalhos futuros sugere-se: o refinamento da grade e aumento do domínio, além de uma região de recirculação maior e mais distante, resultando em um melhor desenvolvimento do campo de velocidade do vento e diminuindo os efeitos de borda; e acrescentar uma segunda turbina a esteira da primeira, para analisar a geração na esteira.

8. REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. ABEEólica: Associação Brasileira de Energia Eólica, c2023. Página inicial. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/>>. Acesso em: 20 de jun. de 2023.

ABKAR, M.; PORTÉ-AGEL, F. **Influence of atmospheric stability on wind-turbine wakes: A large-eddy simulation study**. *Physics of Fluids* 1 March 2015; 27 (3): 035104. <https://doi.org/10.1063/1.4913695>

CRESPO, A.; HERNANDEZ, J.; FRANDSEN, S. Survey of modelling methods for wind turbine wakes and wind farms. **Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology**, v. 2, n. 1, p. 1-24, 1999.

DAI, Y. et al. Addressing the grid-size sensitivity issue in large-eddy simulations of stable boundary layers. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 178, p. 63-89, 2021.

DEARDORFF, J. W. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. **Boundary-layer meteorology**, v. 18, p. 495-527, 1980.

FERNANDEZ-GAMIZ U, et al. **Microtab Design and Implementation on a 5 MW Wind Turbine**. *Applied Sciences*. 2017; 7(6):536. <https://doi.org/10.3390/app7060536>

GAERTNER, E. et al. **IEA wind TCP task 37: definition of the IEA 15-megawatt offshore reference wind turbine**. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2020.

GERMANO, M. et al. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model. **Physics of Fluids A: Fluid Dynamics**, v. 3, n. 7, p. 1760-1765, 1991.

LI, S. et. al. VAPOR: **A Visualization Package Tailored to Analyze Simulation Data in Earth System Science**. *Atmosphere*. 2019; 10(9):488. <https://doi.org/10.3390/atmos10090488>

MARONGA, B. Monin–obukhov similarity functions for the structure parameters of temperature and humidity in the unstable surface layer: Results from high-resolution large-eddy simulations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, American Meteorological Society, v. 71, n. 2, p. 716–733, 2014.

MOENG, C.; WYNGAARD, J. C. Spectral analysis of large-eddy simulations of the convective boundary layer. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 45, n. 23, p. 3573-3587, 1988.

MOKHTARPOOR, R.; HEINZ, S. Dynamic large eddy simulation: Stability via realizability. **Physics of Fluids**, v. 29, n. 10, 2017.

Na agenda de transição energética, Estado busca atrair investimentos de energia eólica. **Governo do Estado do Rio Grande do Sul**, 2023. Disponível em: <<https://www.estado.rs.gov.br/na-agenda-de-transicao-energetica-estado-busca-atrair-investimentos-de-energia-eolica>>. Acesso em: 05 de jul. de 2023.

PORTÉ-AGEL, F.; BASTANKHAH, M.; SHAMSODDIN, S. Wind-turbine and wind-farm flows: a review. **Boundary-layer meteorology**, v. 174, n. 1, p. 1-59, 2020.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C.; RAMADAN, B. H. **Mecânica dos Flúidos** – Tradução da 4ª edição norte-americana. Cengage Learning Brasil, 2014. E-book. ISBN 9788522116690. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522116690/> . Acesso em: 05 jun. 2023.

PUHALES, F. S. et al. **Parametrização do transporte de energia cinética turbulenta na camada limite convectiva**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria.

RS aposta no hidrogênio verde como combustível do futuro. **Governo do Estado do Rio Grande do Sul**, 2023. Disponível em: <<https://estado.rs.gov.br/rs-aposta-no-hidrogenio-verde-como-combustivel-do-futuro>>. Acesso em: 05 de jul. de 2023.

SAGAUT, P.: **Large eddy simulation for incompressible flows: an introduction**, Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg, Germany, <https://doi.org/10.1007/b137536> , 2006

SAIKI, E. M.; MOENG, C.; SULLIVAN, P. P. Large-eddy simulation of the stably stratified planetary boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 95, p. 1-30, 2000.

VERMEER, L. J.; SØRENSEN, J. N.; CRESPO, A. Wind turbine wake aerodynamics. **Progress in aerospace sciences**, v. 39, n. 6-7, p. 467-510, 2003.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. [S.l.]: Pearson education, 2007.

WU, YT., PORTÉ-AGEL, F. **Large-Eddy Simulation of Wind-Turbine Wakes: Evaluation of Turbine Parametrisations**. *Boundary-Layer Meteorol* 138, 345–366 (2011). <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9569-x>

APENDICE A

No Apêndice A será apresentado o namelist usado para a realização das simulações, a Tabela 2 apresenta os parâmetros referentes a inicialização e definição no escoamento, posteriormente a Tabela 3 traz as entradas temporais utilizadas e por fim a Tabela 4 aborda as características utilizadas para a turbina.

Tabela 2 - Parâmetros de inicialização PALM

| Entrada | Descrição |
|--|---|
| nx = 499, | Pontos de grade no eixo X (nx+1) |
| ny = 79, | Pontos de grade no eixo Y (ny+1) |
| nz = 100, | Pontos de grade no eixo Z |
| dx = 10, | Passo no eixo X, em metros |
| dy = 10, | Passo no eixo Y, em metros |
| dz = 10, | Passo no eixo Z, em metros |
| psolver = multigrid, | Esquema utilizado para resolução das equações de Poisson, otimizado para desempenho |
| latitude = 0.0, | Latitude, escolhida 0 para evitar as forças de Coriolis. |
| longitude = 0.0, | Longitude |
| bc_lr = 'dirichlet/radiation', | Condição de contorno ao longo de X |
| bc_pt_b = 'dirichlet', | Condição de contorno da temperatura potencial no solo |
| pt_surface_heating_rate = -0.5, | Taxa linear de aumento da temperatura de superfície, em Kelvin/hora |
| initializing_actions = 'cyclic_fill', | Condição inicial e ações necessárias a serem realizadas no início do modelo. |
| ug_surface = 5.0, | Velocidade de entrada em X, em m/s |
| vg_surface = 0.0, | Velocidade de entrada em Y, em m/s |
| pt_surface = 300.0, | Temperatura potencial da superfície, em Kelvin |
| pt_vertical_gradient = 0.0, 1.0, | Gradiente do perfil de temperatura inicial |
| pt_vertical_gradient_level = 0.0, 800.0, | Altura que o gradiente definido por pt_vertical_gradient é aplicado. |
| turbulent_inflow_method = 'recycle_turbulent_fluctuation', | Método do escoamento turbulento |
| recycling_width = 300.0, | Comprimento da área de recirculação |
| inflow_damping_height = 600.0, | Altura da área de recirculação |

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 3 - Parâmetros Temporais PALM

| Entrada | Descrição |
|--|---|
| end_time = 32400., ! 9 h | Tempo total de simulação, em segundos |
| create_disturbances = .T., | Criar turbulências |
| netcdf_data_format = 3, | Formato de arquivo |
| dt_run_control = 0.0, | Intervalo de tempo no qual a saída de controle de execução deve ser gerada. |
| dt_data_output = 600.0, | Intervalo de tempo dos dados, em segundos |
| dt_dopr = 600.0, | Intervalo de tempo dos perfis verticais, em segundos |
| data_output = 'wspeed', 'wspeed_av', 'u', 'u_av', 'v', 'v_av', 'w', 'w_av', 'e', 'e_av', 'p', 'p_av', 'theta', 'theta_av', 'ti', 'ti_av' | Quais dados devem ser armazenados. |
| averaging_interval = 600.0, | Intervalo de tempo dos dados médios, em segundos |
| averaging_interval_pr = 600.0, | Intervalo dos dados médios verticais, em segundos |

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 4 - Parâmetros do Aerogerador PALM

| Entrada | Descrição |
|--|--|
| air_density = 1.225, | Densidade do ar, k/m ³ |
| dt_data_output_wtm = 0.00, | Intervalo dos dados extraídos |
| gear_efficiency = 1.0, | Eficiência de transferência |
| gear_ratio = 1.0, | Razão de transferência |
| generator_efficiency = 0.9655, | Eficiência do gerador |
| generator_inertia = 3.22e+06, | Inercia do gerador |
| generator_power_rated = 15.54e+06, | Potência do gerador |
| generator_speed_rated = 0.792, | Velocidade do gerador |
| generator_torque_max = 21.59e+06, | Torque máximo do gerador |
| generator_torque_rate_max = 10.74e+06, | Taxa máxima de torque |
| n_airfoils = 8, | Número de aerofólios utilizados no modelo de turbina |

| | |
|----------------------------------|--|
| n_turbines = 1, | Número de aerogeradores |
| pitch_control = .T., | Controle de ângulo de passo |
| pitch_rate = 2.0, | Taxa de ângulo de passo |
| region_15_min = 0.403, | Limite de velocidade do gerador, rad/s |
| region_2_min = 0.524, | Limite de velocidade do gerador, rad/s |
| region_2_slope = 24.77e+06, | Inclinação da região, Nm/(rad/s) ² |
| rotor_inertia = 310.62e+06, | Inercia do rotor, em kg/m ² |
| segment_length_tangential = 1.0, | Comprimento tangencial do segmento do rotor |
| segment_width_radial = 0.5, | Largura radial dos segmentos do rotor |
| smearing_kernel_size = 1.0, | Tamanho do kernel de difusão |
| speed_control = .T., | Ativar o controle de velocidade |
| tilt_angle = 6.0, | Ângulo de inclinação do plano do rotor, em graus |
| time_turbine_on = 0.0, | Atraso de acoplamento, em segundos |
| tip_loss_correction = .T., | Correção de perda de ponta |
| yaw_control = .F., | Ativar controle de direção |
| yaw_misalignment_max = 0.08726, | Máximo desalinhamento tolerado, em rad |
| yaw_misalignment_min = 0.008726, | Mínimo desalinhamento para desativar o atuador, em rad |
| yaw_speed = 0.0349, | Velocidade do atuador, rad/s |
| hub_x = 1000.0, | Distância em X do eixo, em metros |
| hub_y = 400.0, | Posição em Y do eixo, em metros |
| hub_z = 150.0, | Altura em Z do eixo, em metros |
| nacelle_radius = 6.0, | Raio da nacelle, em metros |
| pitch_angle = 0.0, | Ângulo, quando pitch_control= .F. |
| rotor_radius = 120.0, | Comprimento de pá, em metros |
| rotor_speed = 0.792, | Velocidade do rotor, rad/s |
| tower_cd = 1.2, | Coeficiente de arrasto da torre |
| tower_diameter = 8.0, | Diâmetro da torre, em metros |
| yaw_angle = 0.0, | Orientação do gerador |

Fonte: Elaboração Própria