

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JOÃO LUCAS SOARES DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DA TOPOGRAFIA NO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO EM UM PARQUE
EÓLICO: INTEGRAÇÃO DE DADOS REAIS DE TOPOGRAFIA E WRF**

Alegrete

2024

JOÃO LUCAS SOARES DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DA TOPOGRAFIA NO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO EM UM PARQUE
EÓLICO: INTEGRAÇÃO DE DADOS REAIS DE TOPOGRAFIA E WRF**

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

Co-orientador: Prof. Dr. Felipe Denardin
Costa

Alegrete

2024

JOÃO LUCAS SOARES DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DA TOPOGRAFIA NO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO EM UM PARQUE
EÓLICO: INTEGRAÇÃO DE DADOS REAIS DE TOPOGRAFIA E WRF**

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: 09 de julho 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 09/07/2024, às 16:01, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIZ EDUARDO MEDEIROS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/07/2024, às 18:30, 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 12/07/2024, às 15:39, 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 **1484756** e o código CRC **5F04E794**.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço meus pais pelo companheirismo, apoio, incentivo, carinho e por não medirem esforços para me dar uma ótima educação durante toda a minha caminhada.

Agradeço a minha família por ser essa base essencial de incentivo que me permitiu a chegar até aqui.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rafael Maroneze pelo tempo disponibilizado, ensinamentos e paciência ao decorrer deste estudo.

Aos colegas do LFCTA (Laboratório de Fluidodinâmica Computacional e Turbulência Atmosférica) que foram fundamentais no tratamento dos dados e análise.

A todos os colegas e amigos que estiveram ao meu lado durante o período da graduação.

RESUMO

O presente documento apresenta uma análise do escoamento da camada limite atmosférica em um parque eólico, usando dados reais de topografia e forçantes de entrada oriundo do modelo numérico de previsão do tempo WRF através do Modelo Atmosférico PALM, o qual permite a inserção de atributos globais, dados de topografia, propriedades de superfície, propriedades de vegetação, entre outros, que possibilita configurar as variáveis de entrada e os parâmetros de simulação para refletir as condições reais da região de interesse. A área de estudo selecionada foi a do Parque Eólico Cerro Chato I, II e III, localizada no município de Santana do Livramento no estado do Rio Grande do sul. A metodologia envolveu a preparação dos arquivos de entrada necessários para configurar e atualizar os parâmetros de entrada, incluindo arquivos estáticos de topografia e dinâmicos de condições de contorno para permitir a simulação pelo PALM. Foram realizadas duas simulações: a primeira apenas com os dados do WRF, sem dados de topografia, e a segunda com os dados do WRF e topografia. As simulações foram utilizadas para avaliar o escoamento da camada limite atmosférica e os efeitos das perturbações causadas pelos aerogeradores. Foi realizada uma análise para identificar as diferenças no escoamento devido ao terreno complexo em comparação com o terreno plano e entender sua influência no escoamento, bem como a investigação individual dos aerogeradores. Como resultados, observou-se que o comportamento do escoamento em todo o parque eólico se comportou de acordo com o estudo realizado por Abkar e Porté-Agel (2015) no que diz respeito a caracterização da camada limite convectiva (CLC) e a camada limite estável (CLE) e, também, na influência que a estabilidade térmica atmosférica tem na distribuição espacial do déficit médio de velocidade. De forma individual, todos os aerogeradores apresentaram uma produção superior no caso em que a topografia foi considerada, com um acréscimo médio individual de até 0,42MW de produção em um único aerogerador no período analisado.

Palavras-chave: Aerogerador. Camada limite atmosférica. CFD. Terreno complexo. Turbulência. WRF.

ABSTRACT

This document presents an analysis of the atmospheric boundary layer flow in a wind farm using real topography data and input forcings from the WRF numerical weather prediction model through the PALM Atmospheric Model. PALM allows for the inclusion of global attributes, topographical data, surface properties, vegetation properties, among others, which enables the configuration of input variables and simulation parameters to reflect the actual conditions of the region of interest. The selected study area was the Cerro Chato Wind Farm I, II, and III, located in the municipality of Santana do Livramento in the state of Rio Grande do Sul. The methodology involved the preparation of the necessary input files to configure and update the namelist, including static topography files and dynamic boundary condition files to allow for simulation by PALM. Two simulations were conducted: the first with only the WRF data, without topography, and the second with both WRF data and topography. The simulations were used to evaluate the atmospheric boundary layer flow and the effects of disturbances caused by wind turbines. An analysis was carried out to identify the differences in flow due to complex terrain compared to flat terrain and to understand its influence on the flow, as well as the individual investigation of the wind turbines. The results showed that the flow behavior throughout the wind farm was consistent with the study conducted by Abkar e Porté-Agel (2015) regarding the characterization of the convective boundary layer (CBL) and the stable boundary layer (SBL), as well as the influence of atmospheric thermal stability on the spatial distribution of the average velocity deficit. Individually, all wind turbines showed higher production in the case where topography was considered, with an individual average increase of up to 0.42 MW in production during the analyzed period.

Keywords: Atmospheric boundary layer. Computational Fluid Dynamics (CFD). Complex terrain. Turbulence. Wind turbine. WRF.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação idealizada do escoamento próximo a uma superfície plana e rígida (camada limite)	18
Figura 2 – Representação da variação diária da CLP	19
Figura 3 – Perfis típicos de velocidade média do vento, \tilde{u} , direção média do vento \tilde{d} e temperatura potencial média $\tilde{\theta}$ para a camada limite convectiva. Os perfis foram apresentados em função da altura normalizada z/z_i , onde z é a altura em relação ao solo e z_i a altura do topo da camada limite convectiva	20
Figura 4 – Perfis típicos de velocidade média do vento, \tilde{u} , direção média do vento \tilde{d} e temperatura potencial média $\tilde{\theta}$ para a camada limite estável. Os perfis foram apresentados em função da altura normalizada z/h , onde z é a altura em relação ao solo e h a altura do topo da camada limite estável .	21
Figura 5 – Representação do modelo LES. Círculos pretos que correspondem aos redemoinhos resolvidos diretamente, enquanto os círculos em vermelho são parametrizados pelo modelo de subgrade	23
Figura 6 – Representação da divisão do plano do rotor em anéis e segmentos do método avançado do disco atuador. Representado pelas setas azuis as forças axiais, pelas setas vermelhas as forças tangenciais, atuando no fluxo e as setas cinzas representam a força de impulso da torre	25
Figura 7 – Representação esquemática das forças que atuam em um elemento da pá	25
Figura 8 – Representação dos graus de liberdade do aerogerador dentro do WTM ...	27
Figura 9 – Fluxograma da metodologia empregada na obtenção dos dados deste estudo	32
Figura 10 – Captura de tela ilustrando a localização de 15 aerogeradores do parque Cerro Chato I. Georreferenciados em graus decimais	33
Figura 11 – Captura de tela com o bioma Pampa referenciado através do MapBiomias Web	34
Figura 12 – Captura de tela do software QGis com o Bioma Pampa e os 45 aerogeradores georeferenciados na área de trabalho	34
Figura 13 – Captura de tela do software QGis com a marcação da área a ser recortada para a exportação. Os pontos vermelho com branco são as localizações dos aerogeradores. Em vermelho o ponto central do parque eólico	35
Figura 14 – Captura de tela do software QGis com a região recortada e vetorizada. Cores simbólicas para referenciar a categorização o uso e ocupação do solo	36
Figura 15 – Captura de tela da tabela da coleção 8 de códigos de legenda do MapBiomias abreviada com os tipos de uso e ocupação do solo presentes no	

arquivo recortado	37
Figura 16 – Captura de tela do setup dos parâmetros de conversão ECMWF-IFS do PALM. Números a esquerda representando os valores de entrada do GeoTIFF e a direita representando os respectivos valores de leitura do PALM	39
Figura 17 – Captura de tela do comando de inicialização do namelist de conversão ..	40
Figura 18 – Captura de tela do comando de inicialização do PALM. sendo <code>example_mountain</code> o nome dado aos arquivos da simulação	45
Figura 19 – Posições dos aerogeradores analisados no estudo. Os aerogeradores 2, 16 e 20 com menor desempenho referenciados na cor vermelha. O aerogerador 21 com a maior variação entre a simulação com e a sem topografia, referenciado na cor amarela. Aerogerador 43, com maior produção média em ambos os casos, na cor verde	47
Figura 20 – Série temporal para a produção do aerogerador 2. Linha preta referencia o escoamento sem topografia e a linha laranja o escoamento com topografia	50
Figura 21 – Série temporal para a produção do aerogerador 16. Linha preta referencia o escoamento sem topografia e a linha laranja o escoamento com topografia	50
Figura 22 – Série temporal para a produção do aerogerador 20. Linha preta referencia o escoamento sem topografia e a linha laranja o escoamento com topografia	51
Figura 23 – Série temporal para a produção do aerogerador 43. Linha preta referencia o escoamento sem topografia e a linha laranja o escoamento com topografia	51
Figura 24 – Série temporal para a produção do aerogerador 21. Linha preta referencia o escoamento sem topografia e a linha laranja o escoamento com topografia	52
Figura 25 – Perfil da velocidade horizontal do vento. Utilizando como referência a linha cheia na cor laranja para às 15:00h e vermelha para às 23:00h com topografia (CT) e linha pontilhada na cor azul para às 15:00h e às 23:00h sem topografia (ST)	53
Figura 26 – Velocidade do vento horizontal à 90 metros de altura em relação a origem. A esquerda representando a camada limite convectiva às 15:00h do horário local. A direita representando a camada limite estável às 23:00h do horário local. Pontos em preto representando a localização dos aerogeradores e o ponto em cinza indicando o ponto frente ao parque analisado na Figura 25	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de conversão ECMWF-IFS de vegetação do PALM.....	38
Tabela 2 – Parâmetros de conversão ECMWF-IFS de água do PALM.....	38
Tabela 3 – Principais parâmetros de entrada do PALMpy	40
Tabela 4 – Principais parâmetros de entrada do WRF4PALM	41
Tabela 5 – Parâmetros principais do <i>namelist</i> no PALM.....	42
Tabela 6 – Relação dos aerogeradores. A distância em X sendo hub_x e Y sendo hub_y em relação a origem do domínio.....	43
Tabela 7 – Valores da potência gerada em cada aerogerador, com e sem topografia ..	48
Tabela 8 – Valores de diferença de potência gerada. Valores com topografia subtraídos de sem topografia, referenciados pela Tabela 7.....	49

LISTA DE SIGLAS

<i>ADM</i>	Actuator Disk Model
<i>ADM-R</i>	Actuator Disk and Rotation Model
<i>ANEEL</i>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>ASCII</i>	American Standard Code for Information Interchange
<i>CAM_x</i>	Comprehensive Air quality Model with extensions
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamic
<i>COSMO</i>	Consortium for Small-scale Modeling
<i>ECMWF-IFS</i>	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Integrated Forecast System
<i>EPSCG</i>	European Petroleum Survey Group
<i>INIFOR</i>	Mesoscale Interface for Initializing and Forcing PALM
<i>IPCC</i>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<i>LES</i>	Large-Eddy Simulation
<i>NREL</i>	National Renewable Energy Laboratory
<i>PIDS</i>	PALM Input Data Standard
<i>QGis</i>	Quantum geographic information system
<i>RS</i>	Rio Grande do Sul
<i>SGS</i>	Subgrid-scale Model
<i>SHP</i>	Shapefile
<i>SIN</i>	Sistema Interligado Nacional
<i>TIFF</i>	Tagged Image File Format
<i>UTM</i>	Universal Transversa de Mercator
<i>WRF</i>	Wather Research Foresting and Forecasting Model
<i>WTM</i>	Wind Turbine Model

LISTA DE SÍMBOLOS

\tilde{u}_i	Velocidade do vento na direção i
x_i	Coordenada espacial na direção i
t	Tempo
$\tilde{\Delta}$	Escala de filtragem espacial / Largura do filtro
\tilde{p}^*	Pressão cinemática modificada
τ_{ij}	Estresse cinemático de sub-grade
τ_{ij}^d	Parte desviadora da tensão cinemática SGS
ν	Viscosidade cinemática do ar
f_i	Força de corpo
F_p	Gradiente de pressão imposto
δ_{ij}	Delta de Kronecker
ρ	Densidade do ar
$\tilde{\theta}$	Temperatura potencial resolvida
q_j	Fluxo de calor SGS
g	Aceleração devido à gravidade
θ_0	Temperatura de referência
τ_{kk}	Traço do tensor de tensões τ_{ij}
C_S	Coeficiente de Smagorinsky
$ \tilde{S} $	Magnitude do tensor da taxa de deformação resolvida
\tilde{S}_{ij}	Tensor da taxa de deformação resolvida
Pr_{sgs}	Número de Prandtl SGS
f_l	Força de sustentação
f_d	Força de arrasto
U_{rel}	Velocidade relativa local
c_l	Coeficiente de sustentação das lâminas

c_d	Coeficiente de arrasto das lâminas
N_b	Número de pás do rotor
c	Corda da lâmina
r_{seg}	Distância do segmento ao centro do disco do rotor
ϕ	Ângulo entre a componente da velocidade do vento tangencial e a velocidade do vento relativa ao elemento da lâmina do rotor
U_N	Velocidade na direção axial
U_θ	Velocidade na direção tangencial
Ω	Velocidade de rotação do rotor
f_θ	Força projetada no plano tangencial
f_N	Força projetada no plano axial
$f_\epsilon(x, y, z)$	Força interpolada na grade cartesiana
N_{seg}	Número de segmentos do rotor
η	Núcleo de regularização
$d_{b,r}(x, y, z)$	Distância entre o centro do segmento atual do rotor e cada ponto da grade
ϵ_{min}	Zero da função polinomial
$f_{d,t}$	Força de arrasto da torre
$f_{d,n}$	Força de arrasto da nacele
U_{ref}	Velocidade de referência do vento
$c_{d,t}$	Coeficiente de arrasto da torre
$c_{d,n}$	Coeficiente de arrasto da nacele

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	JUSTIFICATIVA	16
3	OBJETIVOS	17
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
4.1	Camada Limite Planetária - CLP	18
4.1.1	Camada Limite Convectiva	19
4.1.2	Camada Limite Estável	20
4.2	Large-Eddy Simulation - LES	21
4.3	PALM	24
4.4	Wind Turbine Model - WTM	24
4.5	Ferramentas Utilizadas	28
4.5.1	Arquivos GeoTIFF	28
4.5.2	MapBiomas	28
4.5.3	Quantum Geographic Information System - QGIS	29
4.5.4	Weather Research Forecasting and Forecasting Model - WRF	29
4.5.5	Dados de entrada PALM (PALM Input Data Standard - PIDS)	29
4.5.5.1	Static com PALMpy	30
4.5.5.2	Dynamic com WRF4PALM	30
5	METODOLOGIA	31
5.1	Extração da topografia	33
5.1.1	MapBiomas	33
5.1.2	Qgis	34
5.1.3	PALMpy	36
5.2	Dados Dinamicos de Entrada	40
5.2.1	WRF4PALM	40
5.3	Setup PALM Les	41
5.3.1	Namelist	41
6	RESULTADOS	46
6.1	Comportamento do Escoamento	46
6.2	Análise Individual	54
7	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

O último relatório sobre mudanças climáticas do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) mostrou que estamos diante de mudanças sem precedentes no clima, sendo algumas delas irreversíveis. Centenas de pesquisadores analisaram milhares de evidências coletadas ao redor do planeta e alertaram que ocorrerá um aumento de ondas de calor, secas, entre outros desastres naturais extremos nos próximos dez anos. Uma das conclusões mais claras desse relatório é a respeito da responsabilidade do ser humano pelas mudanças climáticas (IPCC, 2023).

Diante disso, a geração de energia limpa e renovável é uma solução que vem sendo cada vez mais discutida e implementada com a crescente demanda por energia elétrica. Uma das possíveis soluções é a criação de parques eólicos. Sua popularização e eficácia aumentaram nas últimas décadas, devido à significativa atenção dada à melhoria na potência de saída e na eficiência de geração das turbinas eólicas.

Além de terem custo mais baixo, a médio e longo prazo, em relação às outras fontes energéticas, as energias renováveis contribuem diretamente na redução de custos das empresas, na responsabilidade socioambiental e na redução de emissões de gases de efeito estufa responsáveis pelas Mudanças Climáticas. A abundância dos recursos renováveis no Brasil traz uma grande oportunidade para negócios de todos os portes, impulsionando a economia local, além da melhoria direta na qualidade de vida de seus habitantes (Sebrae SC, 2023).

Diante da dificuldade para a construção de hidrelétricas na região sudoeste do Rio Grande do Sul, devido à falta de potencial hídrico, as usinas eólicas apresentaram-se como uma alternativa para a geração de energia. Em atividade desde 2011, o Complexo Eólico Cerro Chato, localizado no município de Santana do Livramento (RS), produz energia suficiente para atender ao consumo de aproximadamente 500 mil pessoas, o que equivale a mais de seis vezes a população do município. A energia gerada no complexo é transmitida para a Subestação Livramento 2, que está conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) abastecendo também as cidades vizinhas como Bagé e Alegrete.

Outro fato importante a ser destacado é que, na região oeste do estado do Rio Grande do Sul, até 2026, será construído o Complexo Eólico Três Divisas, no encontro dos municípios de Alegrete, Quaraí e Uruguaiana. O empreendimento ocupará área de mais de 20 mil hectares e prevê a instalação de 180 aerogeradores com 4,5MW (Megawatts) de potência unitária, que serão implantados em 18 parques eólicos diferentes, totalizando 810MW de potência. Esse número corresponde a quase metade da potência das usinas eólicas em operação atualmente no Rio Grande do Sul, que é de aproximadamente 1,8 mil MW, de acordo com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Somente durante a implementação, deverá movimentar em torno de 3,6 bilhões na economia local, cerca de 200 empregos serão gerados durante a fase de implementação e mais 40 cargos

diretos de média e alta qualificação durante a operação dos parques eólicos (SEMA, 2021).

A dinâmica de fluidos computacional (CFD - Computational Fluid Dynamics, em inglês) surge como uma alternativa competente para garantir a eficiência, segurança e agilidade na operação e implementação de empreendimentos dessa magnitude. O CFD consiste no estudo de escoamentos através de simulações numéricas computacionais e pode ser empregado tanto no desenvolvimento de pesquisas científicas de base quanto na criação de produtos tecnológicos (SAGAUT, 2005). No CFD, destaca-se a metodologia de simulação dos grandes turbilhões (LES - Large Eddy Simulation, em inglês), que resolve numericamente as equações de Navier-Stokes para as maiores escalas do escoamento e modela os efeitos da turbulência nas escalas menores.

O Modelo Atmosférico PALM (PALM) é um sistema de modelagem desenvolvido para simular o escoamento atmosférico na camada limite atmosférica e oceânica, aplicando o método da simulação de grandes turbilhões. Seu código fonte é escrito na linguagem de programação Fortran e é otimizado para ser utilizado em arquiteturas de computação em paralelo de alta performance, possibilitando sua execução eficiente em uma variedade de ambientes, incluindo áreas urbanas e parques eólicos.

O objetivo deste trabalho é simular o escoamento e o ciclo completo da camada limite atmosférica em um parque eólico, considerando os dados reais da topografia local, e investigar como o relevo complexo pode influenciar no desempenho das turbinas eólicas.

Devido à importância local e ao alto potencial eólico da fronteira oeste, optou-se por utilizar o layout dos Parques Eólicos Cerro Chato I, II e III. Foram então conduzidas duas simulações no modelo PALM, cada uma com duração de 29 horas, considerando os forçantes e condições de contorno provenientes do modelo de mesoescala Weather Research and Forecasting (WRF). Para investigar a influência do terreno, uma simulação foi realizada utilizando a topografia real do local onde os parques eólicos estão inseridos, enquanto a outra considerou o terreno completamente plano.

2 JUSTIFICATIVA

O estudo desses cenários a serem explorados são motivados pelo fato de a maioria das investigações encontradas na literatura são para a condição da camada limite neutra, esta condição vista com menor frequência quando considerado o ciclo diário da camada limite atmosférica. Assim como pela necessidade de compreender melhor como o escoamento do ar é influenciado por uma topografia complexa.

Segundo Feng e Shen (2014), nas últimas duas décadas, este problema complexo tem recebido cada vez mais atenção, contudo, a maioria dos trabalhos tem se concentrado nos parques eólicos em terrenos planos ou offshore, enquanto aqueles em terrenos complexos têm recebido pouca investigação.

O PALM destaca-se como uma ferramenta poderosa e versátil para simular uma ampla gama de fenômenos relacionados à turbulência na atmosfera e em outros meios fluídos. Sua capacidade de executar simulações de alta resolução e sua flexibilidade para lidar com diferentes cenários o tornam uma escolha valiosa para o estudo da dinâmica de fluidos e de processos atmosféricos específicos como os apresentados neste estudo.

3 OBJETIVOS

O objetivo geral é simular o escoamento e o ciclo completo da camada limite atmosférica em um parque eólico, utilizando dados reais da topografia e forçantes de entrada provenientes de modelos numéricos de previsão do tempo, projetados para pesquisas e aplicações operacionais.

Como objetivos específicos:

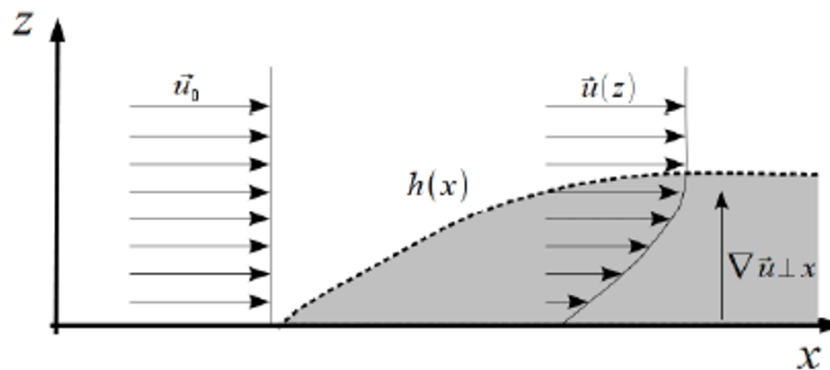
- Investigar o impacto que um relevo complexo pode causar no desempenho de uma turbina eólica em comparação ao terreno plano;
- Ampliar os estudos em parques eólicos com terrenos complexos;
- Identificar os aerogeradores com maior e menor produção dentro do parque.
- Fornecer um manual detalhado de como desenvolver e conduzir as simulações através do PALM, incluindo dados e condições de contorno externas.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Camada Limite Planetária - CLP

A definição de engenharia define a camada limite como a região do escoamento onde existe um intenso gradiente de velocidade. Onde a primeira lâmina de fluido tem velocidade nula devido à condição de contorno de não deslizamento e as camadas subsequentes tem sua velocidade aumentada gradativamente conforme aumenta sua distância da superfície, até atingir 99% da velocidade do escoamento livre (Figura 1).

Figura 1 – Representação idealizada do escoamento próximo a uma superfície plana e rígida (camada limite)

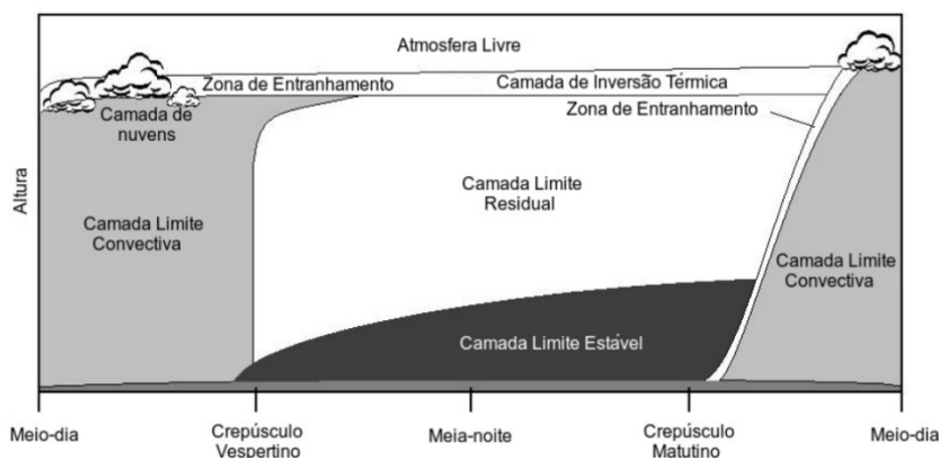


Fonte: Adaptado de Fox et al. (2006)

Podemos definir a camada limite planetária como aquela parte da troposfera que é diretamente influenciada pela presença da superfície terrestre e responde às forças da superfície com uma escala de tempo de cerca de uma hora ou menos. (STULL, 1988).

A CLP apresenta um ciclo diário que está dividido em duas fases. A CLP no período diurno é denominada camada limite convectiva, onde a turbulência é mantida principalmente pela convecção térmica, devido à transferência de calor da superfície e apresenta a maior extensão vertical, atingindo alguns quilômetros. Já no período noturno, a CLP é chamada de camada limite estável, onde a turbulência é mantida apenas pela produção mecânica devido ao cisalhamento do vento. A CLE possui uma extensão vertical menor que a CLC, atingindo apenas algumas centenas de metros. (MARQUES, 2017).

Figura 2 – Representação da variação diária da CLP



Fonte: Adaptado de Stull (1988)

Todo escoamento presente na camada limite planetária está continuamente em regime turbulento, caracterizado por ser caótico e imprevisível, com flutuações de velocidade, pressão e temperatura em diferentes pontos do escoamento. O regime de escoamento turbulento ocorre em fluidos com altas velocidades e viscosidades, comum em escoamentos em torno de objetos com geometrias complexas e em situações em que há transferência de calor e massa. Entretanto, para um número de Reynolds muito alto existe uma tendência a recuperar as simetrias do escoamento em um senso estatístico para regiões afastadas dos contornos do escoamento (FRISCH, 1995).

4.1.1 Camada Limite Convectiva

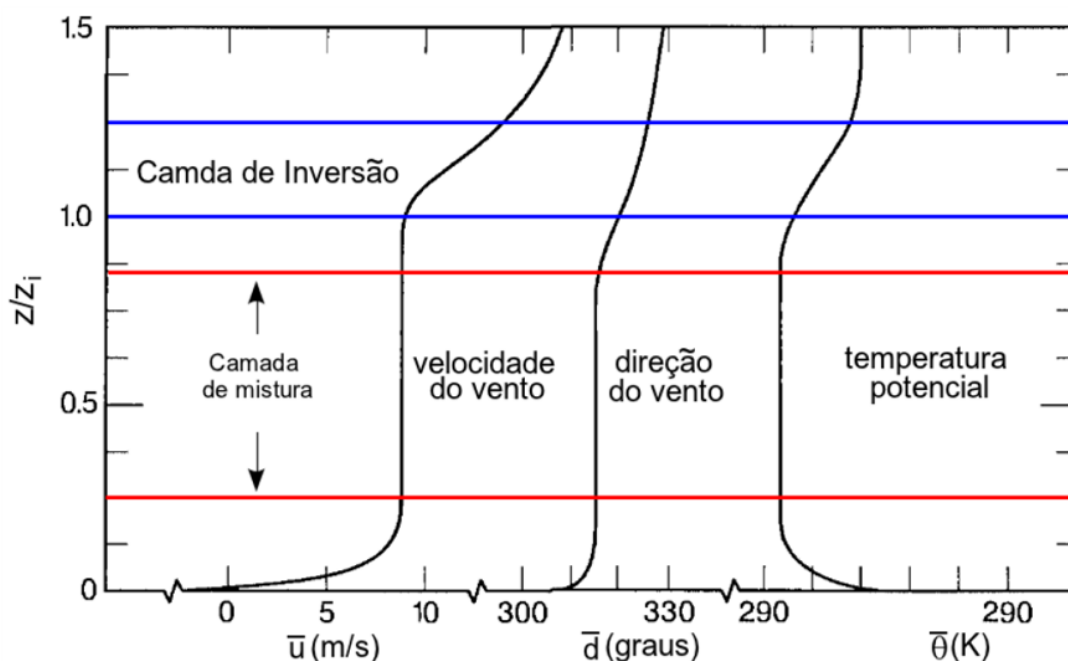
A camada limite convectiva se refere à região da atmosfera próxima à superfície terrestre, na qual ocorrem trocas de energia e massa entre o solo e a atmosfera. Isso ocorre devido ao aquecimento da superfície terrestre pela incidência de radiação eletromagnética solar.

Essa camada é caracterizada por um gradiente vertical de temperatura positivo, que faz com que as camadas de ar próximas ao solo se tornem menos densas e ascendam. Esse processo estabelece um escoamento turbulento na vertical, que é importante para a mistura de gases e partículas na atmosfera (PUHALES et al., 2011). Devido a característica desse convectivo, essa camada é denominada camada limite convectiva.

Quanto mais intensa é a turbulência, mais eficiente é o processo de transporte entre camadas inferiores para as superiores, promovendo uma eficiente troca de energia na forma de calor, momentum e matéria entre os níveis. A Figura 3 apresenta os perfis típicos de temperatura potencial, velocidade e direção do vento típicos de uma camada limite convectiva, podendo ser observado a grande faixa de extensão vertical ocupada

(altura) pela camada limite planetária (PUHALES et al., 2011).

Figura 3 – Perfis típicos de velocidade média do vento, \tilde{u} , direção média do vento \tilde{d} e temperatura potencial média $\tilde{\theta}$ para a camada limite convectiva. Os perfis foram apresentados em função da altura normalizada z/z_i , onde z é a altura em relação ao solo e z_i a altura do topo da camada limite convectiva

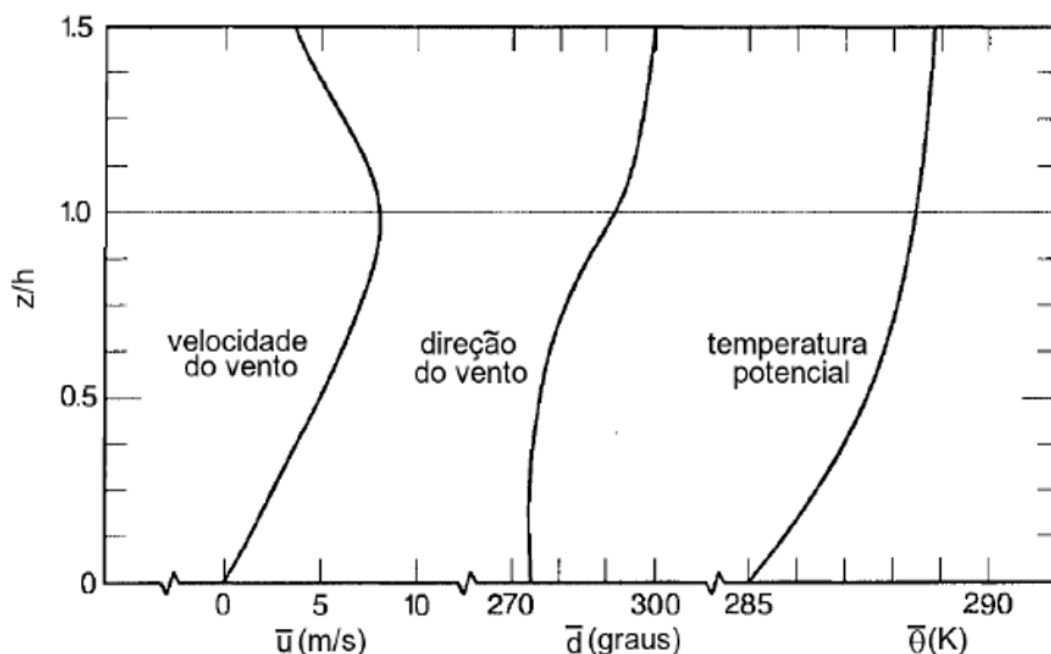


Fonte: Adaptado de Kaimal e Finnigan (1994)

4.1.2 Camada Limite Estável

Na ausência de radiação de onda curta oriunda do Sol, que ocorre tipicamente durante os períodos noturnos, o resfriamento radiativo da superfície origina uma estratificação térmica estável dentro da camada limite atmosférica, originando uma inversão no gradiente vertical de temperatura próximo a superfície, surgindo assim uma Camada Limite Estável (CLE) (SOUSA et al., 2022). Isso ocorre pois a atmosfera se torna mais quente que a superfície, passando a aquecê-la através da troca de energia na forma de calor. Nessa situação, os níveis inferiores da atmosfera se tornam menos aquecidos que os superiores, e os movimentos ascendentes das termas são freados pela força de empuxo, ou seja, uma parcela de fluido deslocada para cima, encontra regiões mais quentes, portanto menos densas, sendo forçadas a manter sua posição, sem que haja deslocamentos efetivos das parcelas de ar (PUHALES et al., 2011). Os perfis de velocidade, direção e temperatura potencial do vento característicos de uma camada limite estável são apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Perfis típicos de velocidade média do vento, \bar{u} , direção média do vento \bar{d} e temperatura potencial média $\bar{\theta}$ para a camada limite estável. Os perfis foram apresentados em função da altura normalizada z/h , onde z é a altura em relação ao solo e h a altura do topo da camada limite estável



Fonte: Adaptado de Kaimal e Finnigan (1994)

4.2 Large-Eddy Simulation - LES

O LES, é uma técnica para simulação de escoamentos turbulentos, que vem sendo utilizada e aplicada na meteorologia desde a década de 1970. Os primeiros estudos foram conduzidos por Lilly (1967) e Deardorff (1973, 1974). Inicialmente, as simulações LES eram executadas com grades “grosseiras”, espaçamentos superiores a 100 metros, devido às limitações dos recursos computacionais. No entanto, com o avanço do poder computacional, as simulações LES passaram ser realizadas em alta resolução, da ordem de 1-10 metros, permitindo uma representação mais detalhada da estruturas que desenvolvem na camada limite atmosférica (MARONGA, 2014).

Como a maior parte da energia está concentrada nas grandes turbulências, aproximadamente 90% da energia turbulenta pode ser resolvida pelo método LES (HEUS et al., 2010). O restante da energia é estimado através de modelos de sub-grade (SGS), os quais são testados e ajustados utilizando dados observacionais e experimentais de referência para garantir uma representação adequada do comportamento da turbulência de sub-grade nas simulações.

O método LES resolve numericamente as equações, filtradas, da continuidade, e

de Navier-Stokes para escoamento incompressível, além da equação de conservação de energia (PORTÉ-AGEL; LU; WU, 2010; MARONGA, 2014, entre outros), dadas respectivamente por:

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

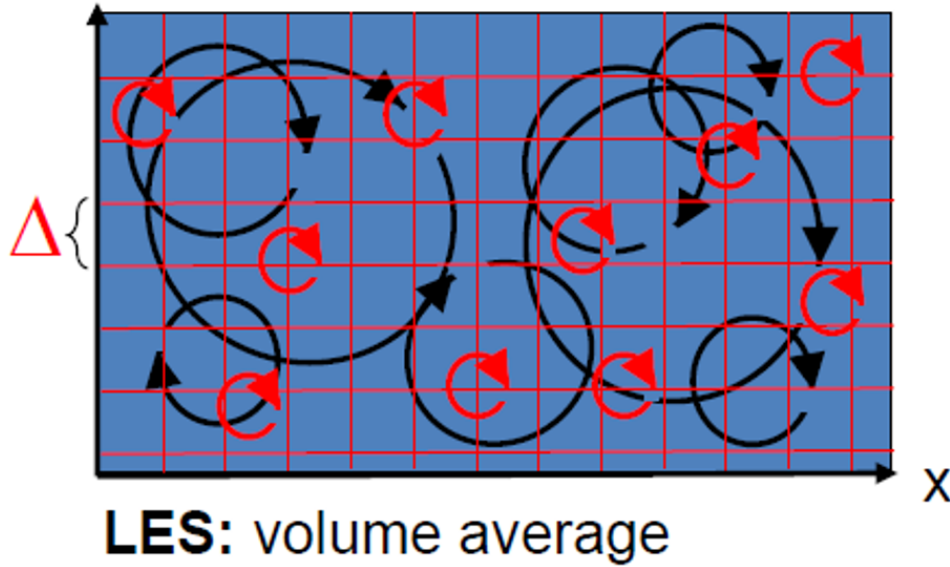
$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{p}^*}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}^d}{\partial x_j} + \delta_{i3} g \frac{\tilde{\theta} - \tilde{\theta}}{\theta_0} - \frac{f_i}{\rho} + F_p \delta_{i1} \quad (2)$$

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

onde o til representa um filtragem espacial em uma escala $\tilde{\Delta}$, t é o tempo sendo u_i a velocidade do vento na direção i , com i assumindo valores de 1, 2 e 3 para as direções do escoamento x , transversal y e normal à superfície z respectivamente, $\tilde{p}^* = \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} u_i \tilde{u}_j$ é a pressão cinemática modificada, $\tau_{ij} = \tilde{u}_i u_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j$ 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, seguindo a aproximação de Boussinesq, e $\tilde{\theta}$ é a temperatura potencial resolvida, q_j denota o fluxo de calor SGS, τ_{ij} representa a tensão cinemática SGS, e τ_{ij}^d é sua parte desviadora (sem traço). Deve-se notar que na equação de conservação de momentum acima, os efeitos de flutuabilidade são considerados através da aproximação de Boussinesq (PORTÉ-AGEL; LU; WU, 2010; STULL, 1988).

O princípio do método LES é baseado no filtro de escalas. Onde as estruturas turbulentas maiores que o espaçamento de grade Δ (ilustradas na Figura 5 pelos turbilhões em preto) são diretamente resolvidos pelo modelo. Já as escalas menores escala da turbulência (representadas na Figura 5 pelos círculos vermelhos), não podem ser resolvidas diretamente devido à limitação da resolução da grade, logo são parametrizadas por meio de modelos de subgrade (SGS). Logo, o espaçamento de grade, que determina as escalas que são diretamente resolvidas pelo LES.

Figura 5 – Representação do modelo LES. Círculos pretos que correspondem aos redemoinhos resolvidos diretamente, enquanto os círculos em vermelho são parametrizados pelo modelo de subgrade



Fonte: Adaptado de PALM (2020)

Uma estratégia comum de parametrização na LES consiste em calcular a parte desviadora da tensão SGS com um modelo de viscosidade turbulenta (ABKAR; PORTÉ-AGEL, 2015).

$$\tau_{ij}^d = \tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\tilde{\Delta}^2 C_S^2 |\tilde{S}| \tilde{S}_{ij}, \quad (4)$$

e o fluxo de calor SGS com um modelo de difusividade turbulenta,

$$q_i = -\tilde{\Delta}^2 C_S^2 Pr_{sgs}^{-1} |\tilde{S}| \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_j}, \quad (5)$$

onde $\tilde{S}_{ij} = (\partial \tilde{u}_i / \partial x_j + \partial \tilde{u}_j / \partial x_i) / 2$ é o tensor da taxa de deformação resolvida cuja magnitude é $|\tilde{S}|$, $\tilde{\Delta}$ é a largura do filtro, C_S é o coeficiente de Smagorinsky, $C_S^2 Pr_{sgs}^{-1}$ é o coeficiente agrupado, e Pr_{sgs} é o número de Prandtl SGS. Aqui, foi empregado os modelos dinâmicos Lagrangianos dependentes de escala para calcular o valor otimizado local dos coeficientes do modelo sem qualquer ajuste *ad hoc*. Em contraste com os modelos dinâmicos tradicionais, os modelos dinâmicos dependentes de escala calculam dinamicamente não apenas o valor dos coeficientes do modelo na viscosidade de turbulência e nos modelos de difusividade turbulenta, mas também a dependência desses coeficientes com a escala (ABKAR; PORTÉ-AGEL, 2015).

4.3 PALM

O PALM, modelo de simulação de grande redemoinho (LES) desenvolvido no Instituto de Meteorologia e Climatologia da Universidade Leibniz de Hannover, Alemanha. Ele se baseia em um código LES não paralelizado descrito por Raasch e Etling (1991) e foi posteriormente paralelizado para aproveitar os supercomputadores.

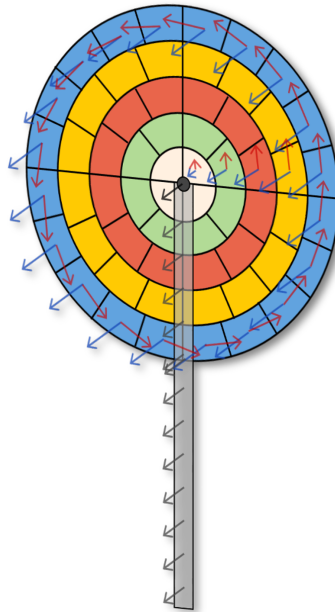
O PALM é aplicável em uma variedade de estudos relacionados a camadas limite atmosféricas, dosséis urbanos, camadas nubladas e camadas mistas oceânicas. Sendo projetado para ser executado em supercomputadores, permitindo a configuração de simulações com resoluções espaciais muito finas e grandes domínios de modelo. Isso o torna adequado para estudos que exigem alta resolução e eficiência computacional. É relevante destacar, também, que o PALM oferece flexibilidade ao ser adaptado para ambientes com recursos computacionais mais modestos. Essa versatilidade permite a execução do PALM em resoluções menores e em computadores com baixo poder de processamento, ampliando sua acessibilidade e possibilitando a realização de simulações em uma gama mais diversificada de ambientes de pesquisa, tornando-o uma ferramenta valiosa para pesquisadores que não tem acesso a um alto poder de processamento, mas ainda desejam realizar simulações numéricas eficazes em seus estudos (MARONGA, 2014).

4.4 Wind Turbine Model - WTM

Wind Turbine Model é um modelo de simulações que foi adicionado ao PALM para simular o comportamento do vento em torno de turbinas eólicas, utilizado para prever a produção de energia elétrica e avaliar o desempenho da turbina em diferentes condições de vento. O modelo é capaz de simular a formação de vórtices e a interação entre o vento e as pás da turbina, permitindo que os engenheiros avaliem o desempenho da turbina eólica em diferentes situações (MARONGA et al., 2019).

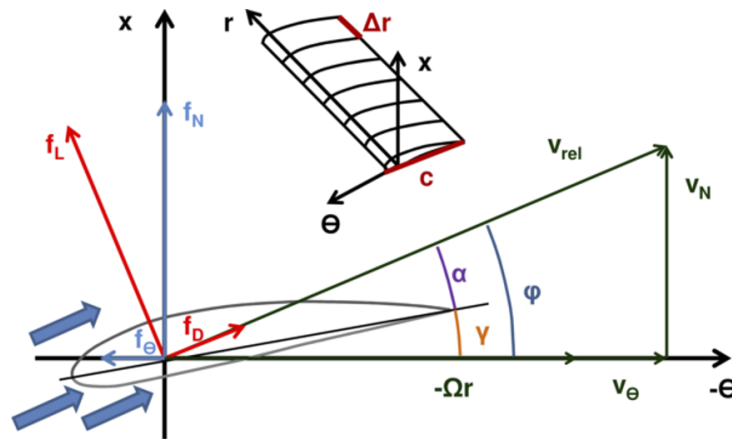
Dentre outros modelos de parametrização de turbinas, o PALM-WTM oferece um modelo de disco atuador avançado com rotação (ADM-R - Actuator Disk Model With Rotation, em inglês), no qual o rotor de uma turbina eólica é representado por um disco permeável que extrai energia do fluxo aplicando uma força de empuxo no disco. Considera forças variáveis sobre o disco do rotor e a rotação das pás do rotor. WTM fornece um ADM-R baseado na teoria do momento do elemento da pá que considera tanto a força de empuxo quanto o torque como funções da posição radial e tangencial no disco do rotor. Cria um disco virtual que atua como um atuador impondo um campo de velocidade no fluido ao redor. O plano do rotor é dividido em anéis e segmentos de modo que os segmentos tenham um tamanho igual, o qual é uma função do espaçamento da grade.

Figura 6 – Representação da divisão do plano do rotor em anéis e segmentos do método avançado do disco atuador. Representado pelas setas azuis as forças axiais, pelas setas vermelhas as forças tangenciais, atuando no fluxo e as setas cinzas representam a força de impulso da torre



Fonte: Adaptado de PALM (2020)

Figura 7 – Representação esquemática das forças que atuam em um elemento da pá



Fonte: Adaptado de PALM (2020)

Segundo PALM (2023), para cada segmento de grade são calculadas as forças locais de sustentação e arrasto f_l e f_d por unidade de área:

$$f_l = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c_l \frac{N_b c}{2\pi r_{seg}} \quad (6)$$

$$f_d = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c_d \frac{N_b c}{2\pi r_{seg}} \quad (7)$$

U_{rel} é a velocidade relativa local no centro do segmento. É calculado a partir dos componentes locais da velocidade do vento, com a interpolação dos pontos mais próximos da grade, e da velocidade das pás. c_l e c_d são os coeficientes de sustentação e arrasto das pás, respectivamente, que variam ao longo da pá. O fator $\frac{N_b c}{2\pi r_{seg}}$ representa a relação de solidez das pás do rotor, com o número de pás do rotor N_b , a corda c e a distância do segmento ao centro do disco do rotor r_{seg} . Por padrão, o WTM inclui dados publicamente disponíveis para a turbina de referência NREL de 5 MW, as quais foram utilizadas na simulação (JONKMAN et al., 2009).

Numa segunda etapa, as forças de sustentação e arrasto são projetadas nos planos axial e tangencial, multiplicadas por um fator de -1, seguindo a terceira lei de Newton.

$$f_\theta = -f_l \sin \phi + f_d \cos \phi \quad (8)$$

$$f_N = -f_l \cos \phi - f_d \sin \phi \quad (9)$$

com o ângulo ϕ entre a componente tangencial da velocidade do vento e a velocidade do vento em relação ao elemento da pá do rotor (ver Figura 7)

$$\phi = \arctan \left(\frac{U_N}{\Omega r - U_\theta} \right) \quad (10)$$

onde U_N é a velocidade na direção axial e U_θ a velocidade na direção tangencial, ao longo do movimento circular do elemento da pá do rotor, conforme ilustrado na Figura 7, ω denota a velocidade de rotação do rotor.

Finalmente, as forças são espalhadas e interpoladas na grade cartesiana PALM. Para otimizar o desempenho do demorado processo de manchas 3D, a mancha é feita com uma função polinomial em vez da mancha gaussiana padrão e confinada à região ao redor do rotor.

$$f_\epsilon(x, y, z) = \sum_{seg=1}^{N_{seg}} (f_N + f_\theta) \eta(d_{b,r}(x, y, z)) \quad (11)$$

esta sendo adicionada ao número de segmentos do rotor N_{seg} . η , o núcleo de regularização, que é uma função da distância $d_{b,r}(x, y, z)$ entre o centro do segmento atual do rotor e cada ponto da grade PALM:

$$\eta(d_{b,r}(x, y, z)) = \frac{105}{32\pi\epsilon_{min}^3} \left(\left(\frac{1}{\epsilon_{min}^4} d(x, y, z) - \frac{2}{\epsilon_{min}^2} \right) d(x, y, z) + 1 \right) \quad (12)$$

ϵ_{min} denota o zero da função polinomial e, portanto, confina a região onde a mancha é aplicada (posição do segmento atual do rotor $\pm \epsilon_{min}$ em todas as direções):

$$\epsilon_{min} = \left(\frac{105}{32} \right)^{\frac{1}{3}} \pi^{\frac{1}{6}} \epsilon \quad (13)$$

A largura de espalhamento ϵ é definida como o dobro do espaçamento da grade e do espaçamento horizontal da grade, o que acabou sendo um valor razoável.

O efeito da torre e da nacele é considerado por uma abordagem simples de força de arrasto:

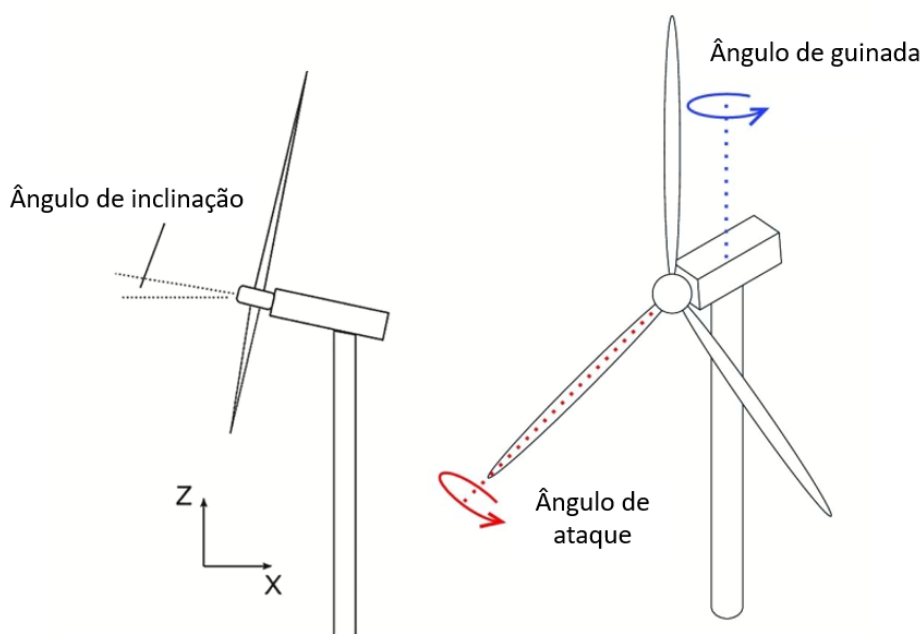
$$f_{d,t} = \frac{1}{2} \rho U_{ref}^2 c_{d,t} \quad (14)$$

$$f_{d,n} = \frac{1}{2} \rho U_{ref}^2 c_{d,n} \quad (15)$$

onde $f_{d,t}$ e $f_{d,n}$ são as forças de arrasto da torre e da nacele, respectivamente, com seus coeficientes de arrasto $c_{d,t}$ e $c_{d,n}$. Por padrão, $c_{d,t} = 1,2$ e $c_{d,n} = 0,85$. Esses valores podem ser alterados na lista de nomes de parâmetros.

O WTM contém um controlador de turbina eólica incluindo controle de velocidade, controle de inclinação e controle de guinada, como ilustrado na Figura 8, que pode ser ligado e desligado separadamente.

Figura 8 – Representação dos graus de liberdade do aerogerador dentro do WTM



Fonte: Adaptado de PALM (2020)

Sendo o ângulo de guinada é o ângulo horizontal de ataque em relação ao eixo do rotor.

Ele permite que a nacela gire em torno do eixo vertical do aerogerador. Essa rotação ajusta a direção do rotor para ficar sempre alinhada com a direção do vento, maximizando a captação de energia e a eficiência do sistema. O ângulo de ataque das pás refere-se à sua rotação das em torno de seu próprio eixo longitudinal. Esse ajuste permite controlar a velocidade de rotação do rotor e, conseqüentemente, a produção de energia. Ao alterar o ângulo das pás, o aerogerador pode reduzir a carga em condições de vento forte ou aumentar a eficiência em ventos mais fracos. Já o ângulo de inclinação é o ângulo vertical de ataque em relação ao eixo do rotor. Ele define a inclinação das pás em relação ao solo e pode ser ajustado para otimizar a captura de vento, especialmente em terrenos irregulares ou em aerogeradores flutuantes offshore.

A velocidade de torque do gerador de linha de base e o controlador de passo são implementados conforme descrito em Jonkman et al. (2009) e é válido apenas para a turbina de referência NREL 5 MW. Para diferentes tipos de turbinas, o controlador de velocidade deve ser ajustado. O controlador de guinada é implementado seguindo Storey et al. (2013) e permite controle de guinada ativo e automático.

4.5 Ferramentas Utilizadas

Para a aquisição e conversão dos arquivos de entradas externos, há a necessidade da utilização de algumas ferramentas as quais serão indicadas nessa seção, seguindo a ordem apresentada no fluxograma da metodologia (Figura 9).

4.5.1 Arquivos GeoTIFF

O TIFF (Tagged Image Format File) é um formato de arquivo que tem por objetivo armazenar imagens sob a forma de raster e facilitar o seu uso. O TIFF foi projetado para ser extensível, permitindo evoluções tão logo surjam novas necessidades (VASCONCELLOS, 2002). Baseado no formato de arquivo TIFF, o formato GeoTIFF, amplamente utilizado na área de engenharia e geoprocessamento, é uma extensão de arquivo que permite armazenar informações geográficas e espaciais, como mapas, imagens de satélite e dados de sensoriamento remoto. Amplamente utilizado para armazenar imagens digitais, o GeoTIFF integra informações georreferenciadas, permitindo que dados sejam associados a coordenadas geográficas (ENGENHARIA, 2023).

4.5.2 MapBiomass

O projeto MapBiomass foi lançado em julho de 2015, como uma iniciativa do Observatório do Clima, co-criada e desenvolvida por uma rede multi-institucional envolvendo universidades, ONGs e empresas de tecnologia com o propósito de mapear anualmente a cobertura e uso da terra do Brasil e monitorar as mudanças do território, e tem como objetivo de contribuir para a compreensão da dinâmica de mudança no uso e cobertura

da terra no Brasil e em outras regiões tropicais do país. Este projeto é baseado no processamento digital de imagens Landsat abrangendo os anos de 1985 até os dias atuais. Além das classificações anuais de mapas digitais, o MapBiomass visa contribuir com o desenvolvimento de uma metodologia rápida e confiável para processar conjuntos de dados em grande escala, para gerar séries temporais históricas de mapas de cobertura e uso da terra a baixo custo. A obtenção dos dados é feita utilizando computação em nuvem através da plataforma Google Earth Engine, que fornece acesso a dados, algoritmos padrão de processamento de imagens e recursos de computação em nuvem, para facilitar a implementação da metodologia de processamento de imagens e produtores de mapas e conduzir seus trabalhos. Todos os dados, mapas de classificação, software, estatísticas e análises adicionais são acessíveis abertamente através da Plataforma MapBiomass (SOUZA; AZEVEDO, 2017).

4.5.3 Quantum Geographic Information System - QGIS

O QGIS é software para aplicação de Sistema de Informações Geográficas gratuita e de código aberto que oferece suporte à visualização, edição e análise de dados geoespaciais. Integra a biblioteca de abstração de dados geoespaciais, permitindo a leitura e o processamento de uma ampla gama de imagens geográficas. Além disso, o QGIS facilita a manipulação e análise de dados espaciais, referindo-se a todos os aspectos do gerenciamento e uso de dados geográficos digitais, incluindo dados vetoriais e raster (MOYROUD; PORTET, 2018).

4.5.4 Weather Research Forecasting and Forecasting Model - WRF

O modelo Weather Research and Forecasting (WRF) (SKAMAROCK et al., 2008) é um sistema numérico de previsão do tempo e simulação atmosférica projetado para pesquisas e aplicações operacionais. O WRF é mantido e suportado como um modelo comunitário para facilitar sua ampla utilização internacionalmente em pesquisa, operações e ensino. É adequado para diversas aplicações em escalas que variam desde grandes turbulências até simulações globais. O modelo é utilizado para previsão numérica em tempo real e abrange uma vasta gama de sistemas terrestres, como química atmosférica, hidrologia, energia eólica e solar, incêndios florestais, furacões, clima regional, entre outros (Powers et al., 2017)

4.5.5 Dados de entrada PALM (PALM Input Data Standard - PIDS)

O PALM oferece uma maneira padronizada para incorporar atributos globais, dados topográficos, propriedades de superfície, informações sobre vegetação e entre outros, utilizando o formato de dados NetCDF. A seguir, algumas dessas variáveis de entrada serão listadas e explicadas em detalhes.

4.5.5.1 Static com PALMpy

PALMpy consiste em um pacote Python e `scripts` em Python e Bash (FLUCK, 2020), que auxiliam o usuário nas etapas de pré-processamento de dados para a realização de simulações com o PALM. Ele é construído para lidar com formatos padrão de geodados, dados vetoriais em formato shapefile e dados raster em formato GeoTIFF.

O `script` de geração estática fornecido pelo pacote PALMpy facilita a criação de arquivos estáticos no formato NetCDF necessários para o PALM. Esses arquivos contêm informações detalhadas sobre o terreno, topografia, vegetação, corpos d'água, pavimento, solo, edificações, entre outros. Incluem também dados topográficos e todas as informações essenciais para inicializar as superfícies terrestres e urbanas no modelo, como capacidades térmicas, rugosidade, albedo e emissividade. Na seção 5.1.3 é abordado detalhadamente essas informações, bem como seus parâmetros e dados de entradas necessário para conversão.

4.5.5.2 Dynamic com WRF4PALM

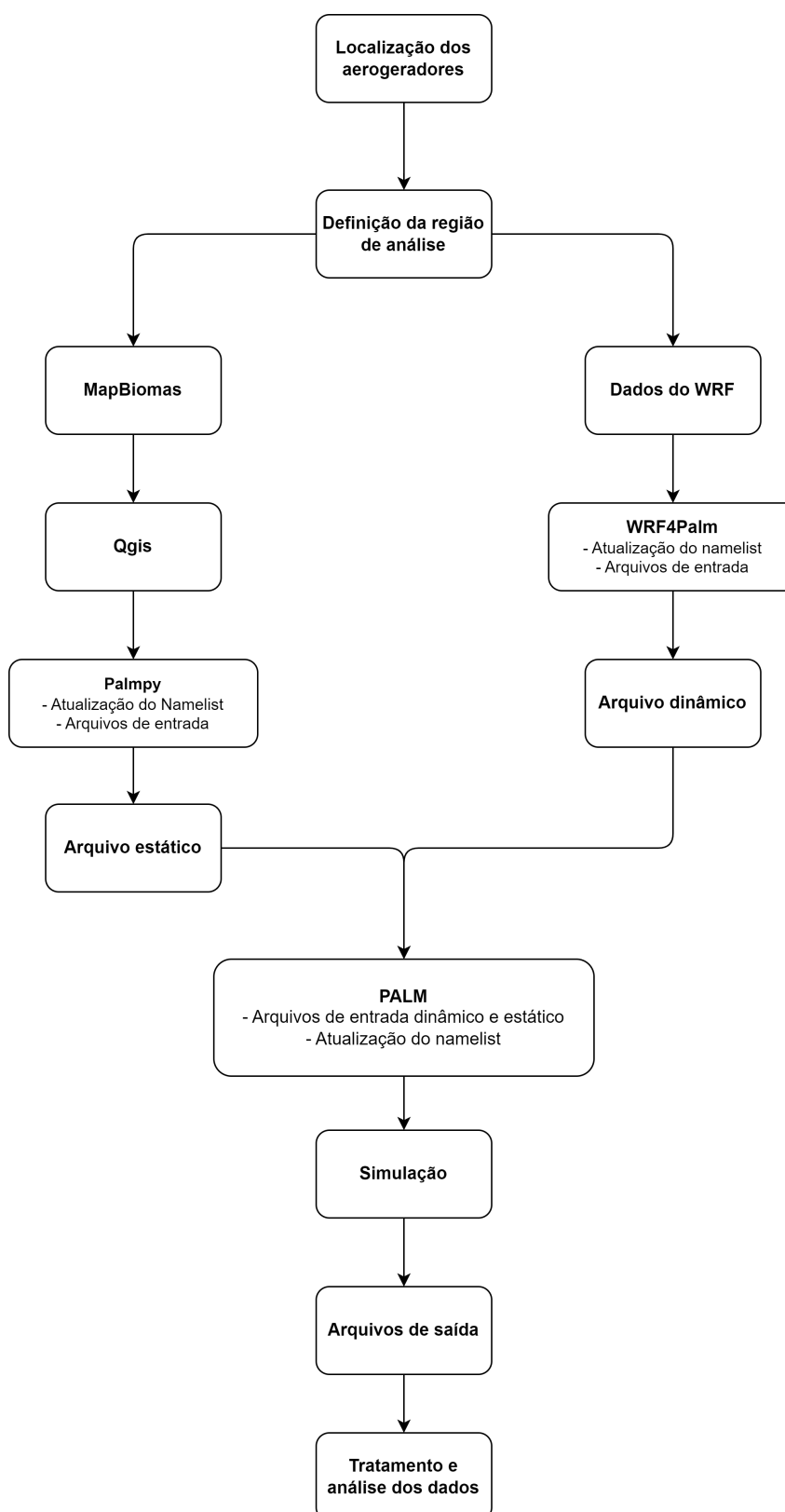
O arquivo de entrada *dynamic* do PALM contém todas as informações dinâmicas a respeito do estado inicial da atmosfera e/ou das condições de contorno dependentes do tempo, que podem variar hora a hora ao longo do mesmo dia e ao longo do ano. Além disso, esse mesmo arquivo pode conter tendências de forçamento de grande escala, tais como vento geostrófico. A ferramenta de pré-processamento WRF4PALM é a interface entre modelos de mesoescala, como o WRF, e o PALM, sendo responsável pela criação das condições iniciais e de contorno necessárias para realizar simulações não cíclicas no PALM (PALM, 2023; LIN et al., 2021).

5 METODOLOGIA

Neste capítulo, será apresentado a metodologia empregada na obtenção dos dados de entrada do PALM, detalhando como esses dados foram tratados e processados. Além disso, será fornecida uma descrição abrangente e detalhadas dos *namelist* (parâmetros de entrada) empregados, explicando cada um dos parâmetro relevante. O fluxograma de como foi desenvolvida a metodologia deste estudo é ilustrado na Figura 9.

A região analisada no presente estudo está localizada no município de Santana do Livramento, onde estão instalados 45 aerogeradores distribuídos em três parques: Cerro Chato I, II e III, totalizando uma área de 8000 hectares. Através de análises iterativas, conforme foram obtidos os resultados parciais do escoamento, para permitir uma boa área para dispersar as turbulências de borda no início do escoamento e o desenvolvimento das esteira formada após a perturbação dos aerogeradores, o tamanho final da área considerada nas simulações foi limitada a 43264 hectares (432.64 km²).

Figura 9 – Fluxograma da metodologia empregada na obtenção dos dados deste estudo



Fonte: Próprio Autor

5.1 Extração da topografia

Inicialmente, foi realizado um levantamento geográfico sobre a localização dos 45 aerogeradores que constituem os parques eólicos Cerro Chato I, II e III.

Figura 10 – Captura de tela ilustrando a localização de 15 aerogeradores do parque Cerro Chato I. Georreferenciados em graus decimais

Parque - Cerro Chato I							
	Latitude (N)				Longitude (E)		
1	30°	51'	1"	1	55°	43'	58"
2	30°	50'	48"	2	55°	43'	48"
3	30°	50'	41"	3	55°	43'	22"
4	30°	50'	30"	4	55°	44'	18"
5	30°	50'	17"	5	55°	43'	50"
6	30°	49'	58"	6	55°	43'	37"
7	30°	49'	43"	7	55°	44'	36"
8	30°	49'	33"	8	55°	44'	22"
9	30°	49'	5"	9	55°	44'	33"
10	30°	48'	59"	10	55°	45'	9"
11	30°	49'	39"	11	55°	43'	35"
12	30°	50'	9"	12	55°	42'	48"
13	30°	49'	58"	13	55°	42'	41"
14	30°	49'	25"	14	55°	42'	59"
15	30°	49'	18"	15	55°	42'	55"

Fonte: Adaptado de Adir Alexandre Bibiano Ferreira

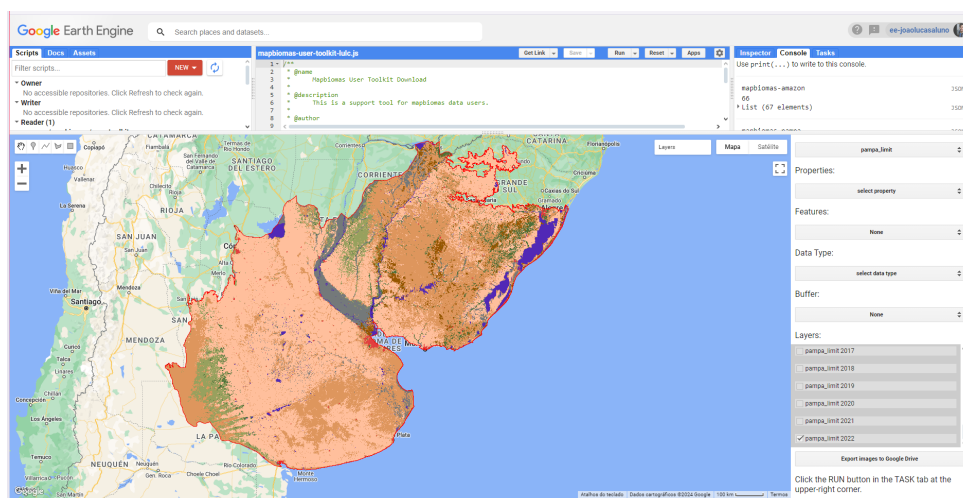
A partir disso, iniciou-se o processo de aquisição dos dados de topográficos para os três parques eólicos.

5.1.1 MapBiomias

Para a aquisição dos dados topográficos, foram utilizados arquivos no formato Geo-TIFF fornecidos pelo projeto MapBiomias. Estes, arquivos contêm informações detalhadas sobre o uso e ocupação do solo na região.

Os dados exportados, a partir do projeto MapBiomias, abrangem a área do bioma Pampa, devido à proximidade dos parques eólicos com a cidade de Rivera, no Uruguai, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Captura de tela com o bioma Pampa referenciado através do MapBiomias Web

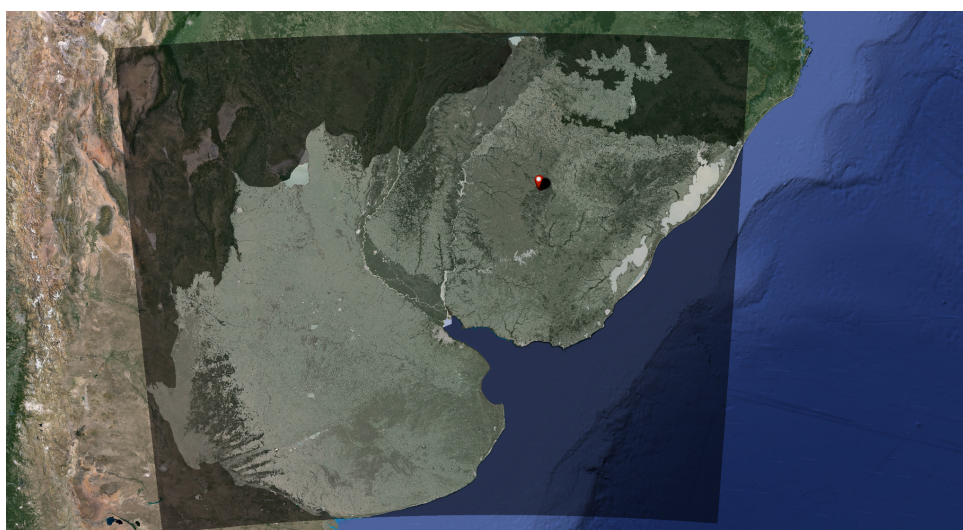


Fonte: Próprio Autor

5.1.2 Qgis

A limitação da área utilizada nas simulações foi realizado no software QGIS. Nele, conforme ilustrado na Figura 12, foi importado o arquivo GeoTIFF do bioma Pampa, juntamente com o arquivo CSV (Comma-Separated Values) previamente preparado com a localização dos 45 aerogeradores em georreferenciados em UTM.

Figura 12 – Captura de tela do software QGIS com o Bioma Pampa e os 45 aerogeradores georeferenciados na área de trabalho

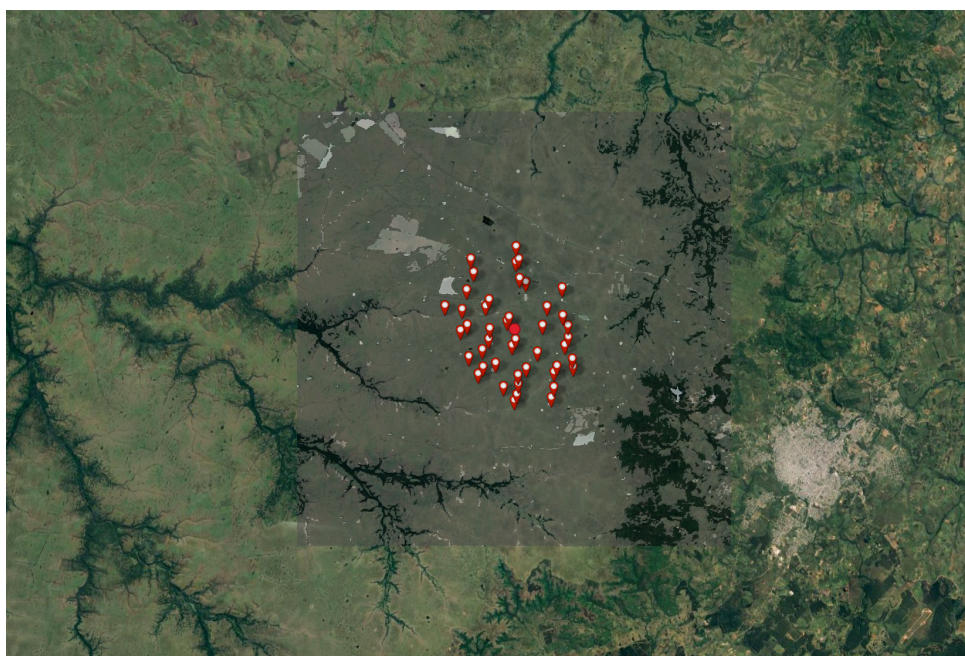


Fonte: Próprio Autor

A área adotada como domínio das simulações possui uma extensão de aproximada-

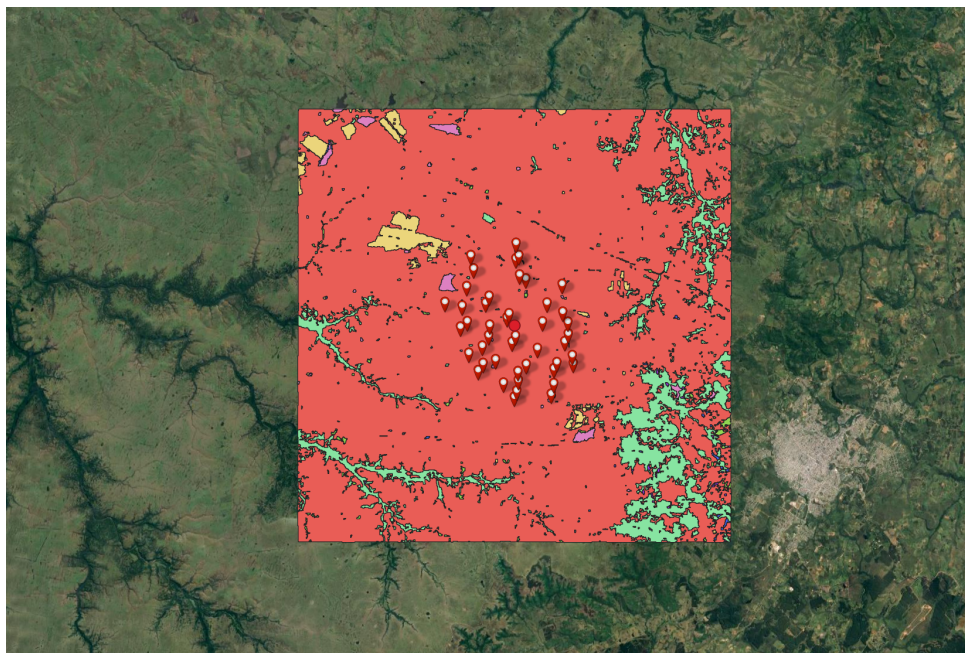
mente 432,64 km², com dimensões de 20,8 km ao longo da direção *X* e 20,8 km ao longo da direção *Y*. Esta escolha mantém os três parques eólicos centralizados no domínio de simulação. É importante destacar que a marcação, recorte e vetorização foram realizados em uma área quadrada com lados de 24 km de extensão (Figura 13). Essa abordagem, ao criar o arquivo estático através do PALMpy, permite a interpolação nas bordas do domínio e evita espaços vazios no arquivo estático final. Posteriormente, esses dados foram exportados em arquivos SHP (shapefile) e TIFF, e utilizados como dados entrada na ferramenta PALMpy.

Figura 13 – Captura de tela do software QGis com a marcação da área a ser recortada para a exportação. Os pontos vermelho com branco são as localizações dos aerogeradores. Em vermelho o ponto central do parque eólico



Fonte: Próprio Autor

Figura 14 – Captura de tela do software QGis com a região recortada e vetorizada. Cores simbólicas para referenciar a categorização o uso e ocupação do solo




Fonte: Próprio Autor

5.1.3 PALMpy

A conversão dos arquivos SHP e TIFF, exportados através do software QGIS, para arquivo estático no formato NetCDF requerido pelo PALM, foi realizada através da ferramenta PALMpy.

Os dados de uso e ocupação do solo (Figura 14) possuem códigos e classificações que variam entre as diversas fontes disponíveis. Neste trabalho, foi utilizada a tabela de códigos da coleção 8 do MapBiomass como referência para cada um dos pixels da área de estudo (Figura 15). Para garantir a consistência entre a tabela adotada pelo PALM e a do MapBiomass, esses valores devem ser traduzidos e convertidos adequadamente.

Figura 15 – Captura de tela da tabela da coleção 8 de códigos de legenda do MapBiomias abreviada com os tipos de uso e ocupação do solo presentes no arquivo recortado



Códigos da legenda para os valores de pixel na Coleção 8 do MapBiomias

COLEÇÃO 8 - CLASSES	New		
	New ID	Hexacode	New Color number
1. Floresta	1	#32a65e	
1.1 Formação Florestal	3	#1f8d49	
2. Formação Natural Não Florestal	10	#ad975a	
2.1. Campo Alagado e Área Pantanosa	11	#519799	
2.2. Formação Campestre	12	#d6bc74	
3. Agropecuária	14	#FFFFB2	
3.3. Silvicultura	9	#7a5900	
3.4. Mosaico de Usos	21	#ffefc3	
4. Área não Vegetada	22	#d4271e	
5. Corpo D'água	26	#0000FF	
5.1 Rio, Lago e Oceano	33	#2532e4	

Fonte: Próprio Autor

O PALM considera 19 diferentes classes de vegetação predefinidas, seguindo a classificação do ECMWF-IFS (Sistema Integrado de Previsão do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo), conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2. A conversão entre as classes consideradas na tabela de códigos da coleção 8 do MapBiomias e as diversas classificações utilizadas no PALM, realizada especificamente para este estudo, está ilustrada na Figura 16.

Tabela 1 – Parâmetros de conversão ECMWF-IFS de vegetação do PALM

Tipo de vegetação	Descrição	Notas
0	Definido pelo usuário	
1	Solo nú	
2	Culturas, agricultura mista	
3	Gramma curta	
4	Árvores perenes coníferas	
5	Árvores decíduas coníferas	
6	Árvores perenes latifoliadas	
7	Árvores decíduas latifoliadas	
8	Gramma alta	
9	Deserto	
10	Tundra	
11	Culturas irrigadas	
12	Semi-deserto	
13	Calotas de gelo e geleiras	Ainda não implementado
14	Pântanos e brejos	
15	Arbustos perenes	
16	Arbustos decíduos	
17	Floresta mista/floresta aberta	
18	Floresta interrompida	

Fonte: Adaptado de PALM (2023)

Tabela 2 – Parâmetros de conversão ECMWF-IFS de água do PALM

Tipo de água	Descrição	Notas
0	Definido pelo usuário	
1	Lago	
2	Rio	ainda não implementado
3	Oceano	ainda não implementado
4	Lagoa	ainda não implementado
5	Fonte	ainda não implementado

Fonte: Adaptado de PALM (2023)

Figura 16 – Captura de tela do setup dos parâmetros de conversão ECMWF-IFS do PALM. Números a esquerda representando os valores de entrada do GeoTIFF e a direita representando os respectivos valores de leitura do PALM

```
# Classes de vegetação BB para tipos de vegetação PALM
bb2palmveg = { 3:7,
               9:3,
               11:14,
               12:3,
               21:3,
               22:1,
               }

# Classes de água BB para tipos de água PALM
bb2palmwat = { 33:2, #fliessgewaesser > river
              }
```

Fonte: Próprio Autor

A Tabela 3 apresenta a configuração utilizada no *namelist* do PALMpy. Este *namelist* inclui informações essenciais para a simulação, como a origem do domínio em UTM, as dimensões do domínio em metros, o espaçamento da grade considerada e a projeção EPSG (European Petroleum Survey Group) utilizada.

Após configurado o *namelist* com todos os parâmetros necessários, o terminal foi aberto na pasta onde está localizado o arquivo `make_static.py`. Em seguida, com o ambiente PALMpy ativado, executou-se o comando que inicia o processo de criação do arquivo estático, conforme ilustrado na Figura 17.

Após a conclusão da criação do arquivo estático, o mesmo é salvo na pasta OUTPUT. Esse arquivo contém informações sobre a topografia. Nessa mesma pasta, são salvos arquivos de texto contendo informações a respeito do *namelist*, e a altitude correspondente à origem do sistema de coordenadas adotado.

Tabela 3 – Principais parâmetros de entrada do PALMpy

Variável de entrada	Descrição
Xres = 52.0	Espaçamento de grade ao longo de X em metros
Yres = 52.0	Espaçamento de grade ao longo de Y em metros
Zres = 20.0	Espaçamento de grade ao longo de Z em metros
Xlen = 20800.0	Comprimento do domínio em X em metros
Ylen = 20800.0	Comprimento do domínio em Y em metros
Zmax = 2400.0	Comprimento do domínio em Z em metros
input_crs_epsg = 31981	Projeção de entrada
Xmin = 613189	Origem do domínio em X (UTM)
Ymin = 6578583	Origem do domínio em Y (UTM)
veg_format = shp	Formato do arquivo de vegetação
src_luse_type = DN	Referência do tipo de uso
src_pav_type = BELAGSART	Referência do tipo de pavimentação

Fonte: Próprio Autor

Figura 17 – Captura de tela do comando de inicialização do namelist de conversão

```

lfcta@lfctaw01: ~/palm_model_system-master/palm/palmpy/examples/tutorial_example
File Edit View Search Terminal Help
lfcta@lfctaw01:~/palm_model_system-master/palm/palmpy/examples/tutorial_example$
export PATH="/home/lfcta/anaconda3/bin:$PATH"; source activate base; source activate palmpyenv;
(palmpyenv) lfcta@lfctaw01:~/palm_model_system-master/palm/palmpy/examples/tutorial_example$ python make_static.py /home/lfcta/palm_model_system-master/palm/palmpy/examples/tutorial_example/tutorialcase.ini

```

Fonte: Próprio Autor

5.2 Dados Dinamicos de Entrada

5.2.1 WRF4PALM

A simulação de mesoescala utilizada como forçante e como condição de contorno para as simulações realizadas no PALM foi fornecida pelo professor Dr. Franciano Scremim

Puhales. Essa simulação corresponde a um intervalo de sete dias, de 16/07/2023 às 00 UTC até 23 UTC de 22/07/2023, realizada na versão 4.5 do WRF, com apenas um domínio centrado no Rio Grande do Sul e uma grade com resolução nominal na ordem de 3 km. Esse período foi escolhido especificamente por caracterizar uma condição estável, com escoamento predominante de leste. Uma vez em mãos os arquivos provenientes do WRF, iniciou-se a configuração da ferramenta WRF4PALM, com os parâmetros de entrada apresentados na Tabela 4 para o período de 29 horas a partir das 21:00h do dia 19/07/2023 do horário local.

Tabela 4 – Principais parâmetros de entrada do WRF4PALM

Variável de entrada	Descrição
$n_x = 400$	Pontos de grade ao longo de X em metros
$n_y = 400$	Pontos de grade ao longo de Y em metros
$n_z = 120$	Pontos de grade ao longo de Z em metros
$dx = 52.0$	Espaçamento de grade ao longo de X em metros
$dy = 52.0$	Espaçamento de grade ao longo de Y em metros
$dz = 20.0$	Espaçamento de grade ao longo de Z em metros
$PALM_proj = "EPSG: 31981"$	Projeção dos arquivos de entrada
$centlat = -30.82950708$	Latitude do centro do domínio
$centlon = -55.71194215$	Longitude do centro do domínio
$z_origin = 208.0$	Altitude da média do domínio no WRF em metros
$time = 104400$	Tempo de simulação em segundos
$dynamic_ts = 1800.0$	Frequência de atualização do driver dinâmico em segundos

Fonte: Próprio autor

5.3 Setup PALM Les

Com os arquivos de entrada devidamente criados pelas ferramentas PALMpy e WRF4PALM, foi dado início ao processo de simulação com o PALM. Cujo o primeiro passo foi alocar os arquivos estático e dinâmico na pasta de INPUT do PALM. Então, configurou-se o *namelist* de entrada do PALM, que será detalhado na seção seguinte.

5.3.1 Namelist

Foram dispostos 400 pontos de grade ao longo do eixo *X*, 400 pontos de grade ao longo do eixo *Y*, com um espaçamento de grade de 52,0 metros em ambas as direções, e 120 pontos ao longo do eixo *Z*, com um espaçamento de 20,0 metros, conforme apresentado na Tabela 5. Isso totaliza $19,2 \times 10^6$ pontos de grade, distribuídos em um domínio de 432,64 km² de área, com altura de 2,4 km. O tempo total de simulação foi de 104 400

segundos, o equivalente às 29 horas dos arquivos convertidos do WRF.

Vale ressaltar que as turbinas utilizadas são padrão Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) de 5MW (padrão implementado no PALM). No *namelist*, a localização das turbinas corresponde a posição do centro do rotor em relação a origem do domínio, em metros. Com as localizações em UTM de cada um dos aerogeradores, foi possível calcular as posição no domínio de cada uma das turbinas, conforme exemplificado na Tabela 6. Os valores da altura do centro do rotor foram definidos como 90 m em relação à origem em z para todos os aerogeradores.

Tabela 5 – Parâmetros principais do *namelist* no PALM

Variável de entrada	Descrição
<code>nx = 399</code>	Pontos de grade ao longo de x ($nx-1$)
<code>ny = 399</code>	Pontos de grade ao longo de y ($ny-1$)
<code>nz = 120</code>	Pontos de grade ao longo de z
<code>dx = 52.0</code>	Espaçamento de grade ao longo de X em metros
<code>dy = 52.0</code>	Espaçamento de grade ao longo de Y em metros
<code>dz = 20.0</code>	Espaçamento de grade ao longo de Z em metros
<code>bc_pt_b = 'dirichlet'</code>	Condição de contorno inferior para temperatura potencial.
<code>bc_q_b = 'dirichlet'</code>	Condição de contorno inferior para o vapor de água.
<code>psolver = 'multigrid'</code>	Esquema a ser utilizado para resolver a equação de Poisson para a pressão de perturbação
<code>pt_surface= 289,9067</code>	Temperatura potencial de superfície (em K)
<code>time = 104400</code>	Tempo de simulação em segundos
<code>n_turbines = 45</code>	Número de turbinas eólicas
<code>tower_diameter = 4.0</code>	Diâmetro da torre cilíndrica da turbina eólica em metros
<code>tower_cd = 1.2</code>	Coeficiente de arrasto da torre
<code>rotor_radius = 63.0</code>	Raio do rotor em metros
<code>yaw_control = .T.</code>	Parâmetro para ligar o controlador de guinada (True)
<code>segment_length_tangential = 1.0</code>	Comprimento tangencial dos segmentos do rotor
<code>segment_width_radial = 0.5</code>	Largura radial dos segmentos do rotor
<code>nacelle_radius = 1.5</code>	Raio da nacelle de cada turbina em metros
<code>generator_powerRated = 5296610.0</code>	Potência nominal da turbina eólica em Watts

Fonte: Próprio Autor

Tabela 6 – Relação dos aerogeradores. A distância em X sendo hub_x e Y sendo hub_y em relação a origem do domínio

Aerogerador	hub_x (m)	hub_y (m)	Aerogerador	hub_x (m)	hub_y (m)
1	7981,0	7720,0	24	12030,0	6411,0
2	8251,0	8118,0	25	12170,0	6995,0
3	8944,0	8325,0	26	12180,0	7826,0
4	7461,0	8681,0	27	12343,0	8163,0
5	8209,0	9073,0	28	13246,0	8121,0
6	9859,0	9300,0	29	13198,0	8553,0
7	10049,0	9637,0	30	12782,0	9327,0
8	8561,0	9654,0	31	12973,0	9756,0
9	6999,0	10133,0	32	12954,0	10403,0
10	8621,0	10238,0	33	12668,0	10961,0
11	7374,0	10437,0	34	11797,0	11464,0
12	9582,0	10658,0	35	12633,0	12501,0
13	9691,0	10873,0	36	10617,0	12802,0
14	7091,0	11302,0	37	10274,0	13021,0
15	6137,0	11498,0	38	10071,0	13917,0
16	9381,0	7027,0	39	10233,0	14099,0
17	9983,0	6250,0	40	10081,0	14779,0
18	10119,0	6588,0	41	8396,0	11472,0
19	10206,0	7172,0	42	8586,0	11840,0
20	10185,0	7665,0	43	7343,0	12377,0
21	10642,0	8060,0	44	7726,0	13358,0
22	11263,0	8945,0	45	7575,0	14099,0
23	11546,0	10420,0	-	-	-

Fonte: Próprio Autor

Para que o PALM utilize as condições de contornos geradas através da ferramenta WRF4PALM é necessário adicionar ao *namelist*:

```
&initialization_parameters
```

```
initializingactions = 'read.from.file',
```

/

```
&nesting_offl_parameters
```

/

Um módulo Gerador de Turbulência Sintética (STG) foi utilizado para impor flutuações turbulentas nas bordas do domínio, uma vez que as condições de contorno provenientes do modelo de mesoescala (WRF) não possuem informações sobre a turbulência na camada limite. Esse módulo é necessário para que a turbulência se desenvolva em todo o domínio com poucos passos de tempo. Para utilizar esse módulo, foi adicionado ao *namelist* o comando:

```
&stg_par
  dt_stg_adjust   = 300.0,
  dt_stg_call     = 0.0,
/
```

Por fim, para considerar a topografia importada de um arquivo estático, criado através da ferramenta PALMpy, ou considerada plana, deve ser adicionado o comando *topography*. No primeiro caso, a topografia detalhada será carregada a partir do arquivo especificado, permitindo a simulação de terrenos complexos e realistas. Ao utilizar o seguinte comando, a topografia será considerada:

```
&initialization_parameters

topography = 'read_from_file'.
/
```

Por outro lado, se a simulação não requer detalhes topográficos ou se deseja simplificar o domínio, a topografia pode ser configurada como plana utilizando o comando:

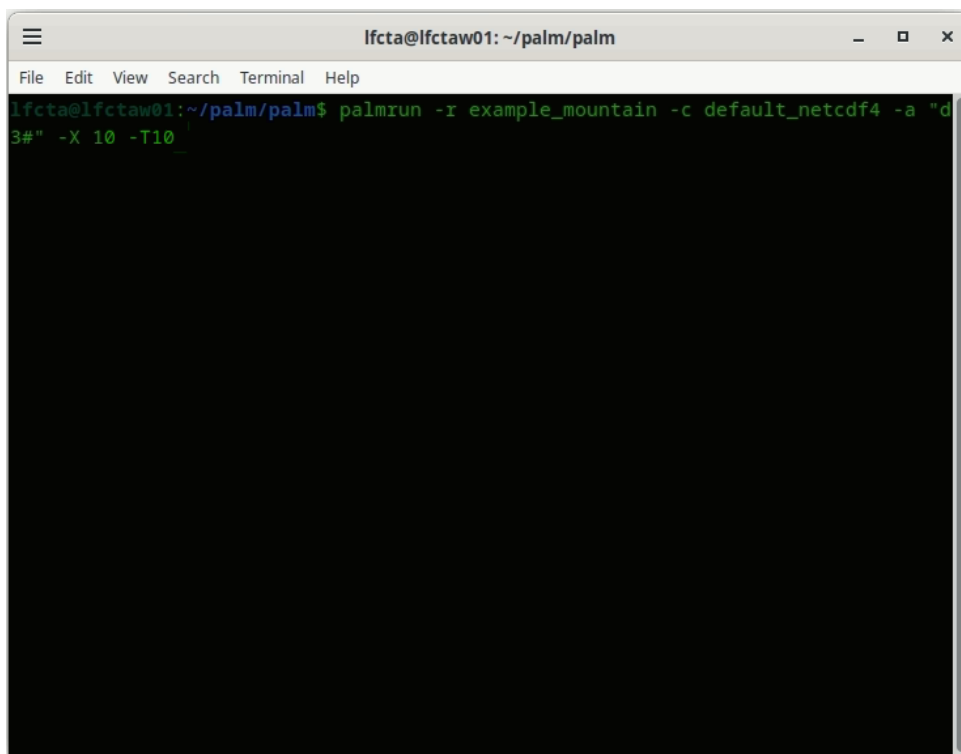
```
&initialization_parameters

topography = 'flat'.
/
```

Com o *namelist* completamente configurado, foi dado início ao processo de simulação. Dentro da pasta principal do PALM, abre-se o terminal de comandos e aplica-se o

comando de execução do PALM, conforme ilustrado na Figura 18. Ao final de cada rodada de simulação, os arquivos são salvos na pasta OUTPUT do PALM.

Figura 18 – Captura de tela do comando de inicialização do PALM. sendo `example_mountain` o nome dado aos arquivos da simulação

A screenshot of a terminal window titled "lfcta@lfctaw01: ~/palm/palm". The window has a menu bar with "File", "Edit", "View", "Search", "Terminal", and "Help". The terminal content shows the command: `lfcta@lfctaw01:~/palm/palm$ palmrun -r example_mountain -c default_netcdf4 -a "d3#" -X 10 -T10`. The rest of the terminal is black with a white cursor at the end of the command.

```
lfcta@lfctaw01:~/palm/palm$ palmrun -r example_mountain -c default_netcdf4 -a "d3#" -X 10 -T10
```

Fonte: Próprio Autor

6 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da **influência da topografia no escoamento atmosférico em um parque eólico**, como descrito no Capítulo 5. Para a análise, foram utilizados as variáveis potência gerada por cada turbina (`rotor_power`) e a velocidade horizontal média do vento (`wspeed`).

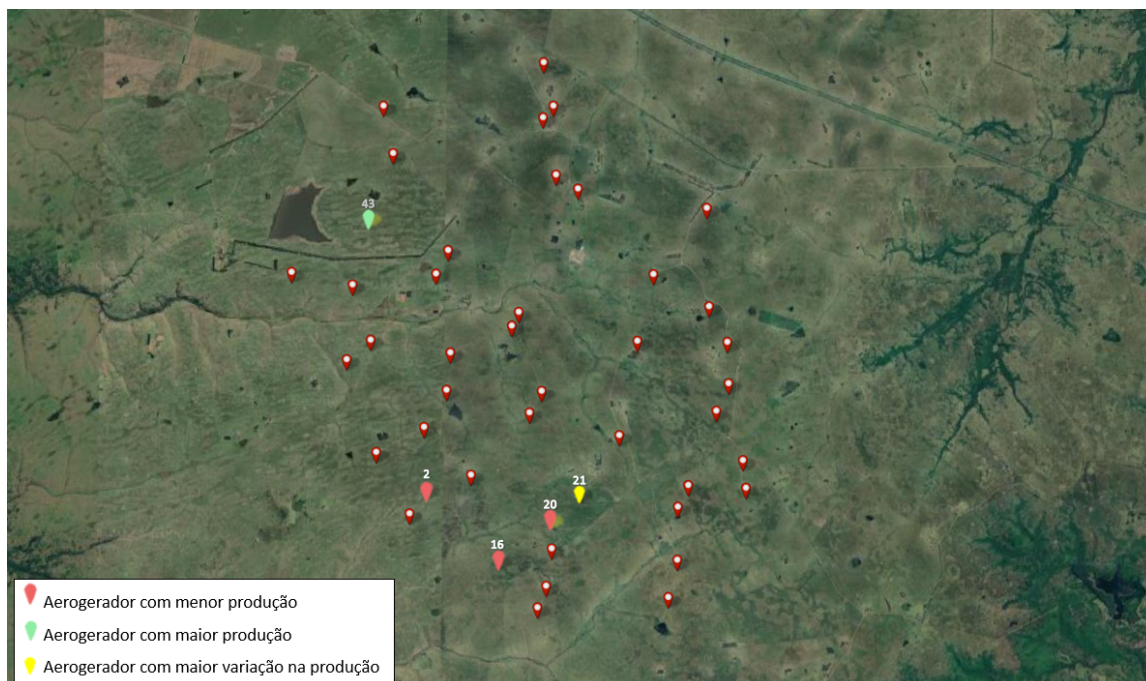
Todas as etapas e simulações foram realizadas em uma *workstation* equipada com um processador Intel(R) Core(TM) i9-13900, com frequência máxima de 5.60GHz, e 128GB de memória RAM. Devido à paralelização do PALM e à discretização do domínio, foi possível utilizar no máximo 20 núcleos para as simulações, em vez dos 24 núcleos físicos disponíveis no processador.

Com essas especificações, o tempo necessário para cada simulação foi de aproximadamente 2 dias e 3 horas (51 horas). Os arquivos de saída resultantes de cada uma das simulações exigiram um armazenamento de 448,5GB, sendo 407,6GB referentes ao arquivo do escoamento 3D, sendo campos instantâneos salvos a cada 180 segundos (3 minutos), 40,8GB referentes ao arquivo dos campos médios 3D, médias calculadas em intervalos de 1800 segundos (30 minutos), e 176,3MB referente ao arquivo com os dados a cada passo de tempo com informações de cada um dos 45 aerogeradores, como potência instantânea.

6.1 Comportamento do Escoamento

A Tabela 7 apresenta uma comparação detalhada da potência média gerada por cada uma das 45 turbinas NREL de 5 MW, que compõem o parque eólico simulado, considerando as condições com e sem a influência da topografia. Os aerogeradores apresentaram uma produção superior no caso em que a topografia foi considerada. Esse fato pode ser explicado pela elevação das turbinas devido à topografia local, o que as sujeita a ventos mais intensos. As turbinas 43 e 20 destacaram-se com a maior e menor eficiência, respectivamente. Além disso, o aerogerador 21 apresentou a maior diferença na produção entre os casos com e sem influência da topografia (Tabela 8). As posições específicas dessas turbinas são apresentadas na Figura 19.

Figura 19 – Posições dos aerogeradores analisados no estudo. Os aerogeradores 2, 16 e 20 com menor desempenho referenciados na cor vermelha. O aerogerador 21 com a maior variação entre a simulação com e a sem topografia, referenciado na cor amarela. Aerogerador 43, com maior produção média em ambos os casos, na cor verde



Fonte: Próprio Autor

Tabela 7 – Valores da potência gerada em cada aerogerador, com e sem topografia

Aerogerador	Com Topografia		Sem Topografia	
	Potência Média (MW)	Aerogerador	Potência Média (MW)	Aerogerador
1	4,45	24	4,80	1
2	4,09	25	4,81	2
3	4,83	26	4,45	3
4	4,74	27	4,49	4
5	4,35	28	4,71	5
6	4,69	29	4,91	6
7	4,73	30	4,66	7
8	4,64	31	4,60	8
9	4,39	32	4,70	9
10	4,54	33	4,63	10
11	4,49	34	4,59	11
12	4,23	35	4,76	12
13	4,71	36	4,84	13
14	4,78	37	4,71	14
15	4,95	38	4,42	15
16	4,08	39	4,72	16
17	4,66	40	4,83	17
18	4,55	41	4,71	18
19	4,77	42	4,87	19
20	4,05	43	5,02	20
21	4,24	44	4,65	21
22	4,62	45	4,71	22
23	4,71	-	-	23
			4,48	-

Fonte: Próprio Autor

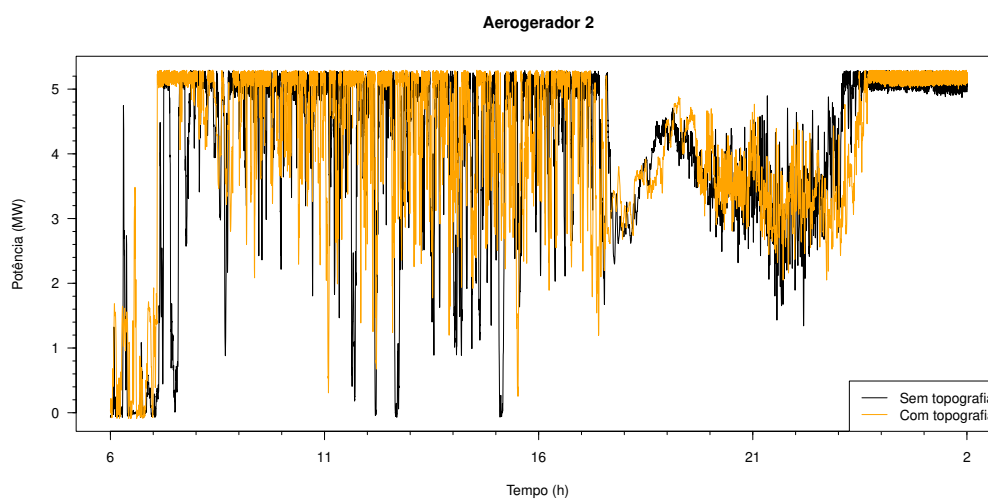
Tabela 8 – Valores de diferença de potência gerada. Valores com topografia subtraídos de sem topografia, referenciados pela Tabela 7

Varição da Potência Média (MW)					
Aerogerador	Varição	Aerogerador	Varição	Aerogerador	Varição
1	0,32	16	0,15	31	0,27
2	0,03	17	0,21	32	0,21
3	0,11	18	0,18	33	0,27
4	0,04	19	0,12	34	0,30
5	0,18	20	0,40	35	0,21
6	0,17	21	0,42	36	0,16
7	0,20	22	0,25	37	0,23
8	0,25	23	0,23	38	0,27
9	0,15	24	0,17	39	0,22
10	0,09	25	0,18	40	0,17
11	0,20	26	0,28	41	0,24
12	0,25	27	0,35	42	0,15
13	0,18	28	0,23	43	0,05
14	0,13	29	0,13	44	0,25
15	0,10	30	0,26	45	0,23

Fonte: Próprio Autor

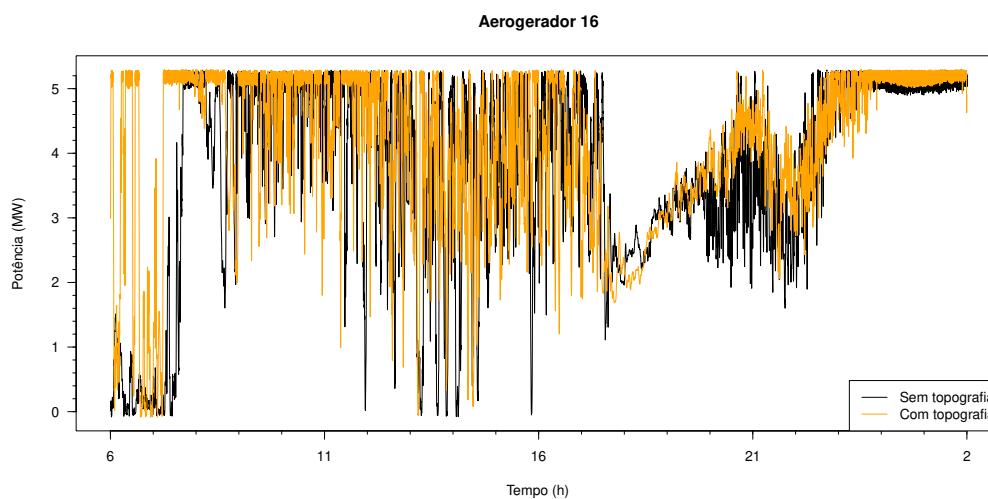
A potência gerada a cada passo de tempo nas simulações com e sem a influência da topografia para os aerogeradores 2, 16 e 20, que se destacaram com as menores produções, a turbina 43, que se destacou com a maior produção, e a turbina 21, que apresentou a maior influência da topografia, com uma variação de 0,42 MW, são apresentadas nas Figuras 20 a 24, respectivamente.

Figura 20 – Série temporal para a produção do aerogerador 2. Linha preta referencia o escoamento sem topografia e a linha laranja o escoamento com topografia



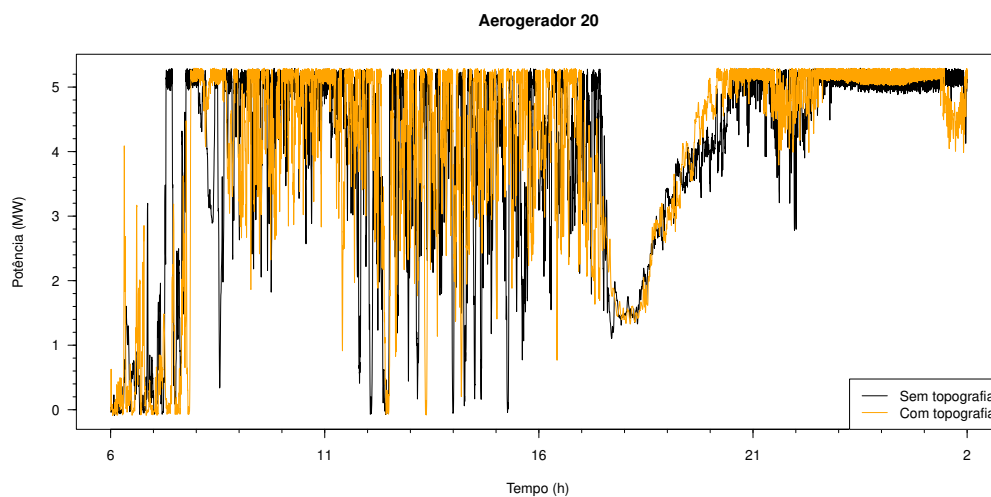
Fonte: Próprio Autor

Figura 21 – Série temporal para a produção do aerogerador 16. Linha preta referencia o escoamento sem topografia e a linha laranja o escoamento com topografia



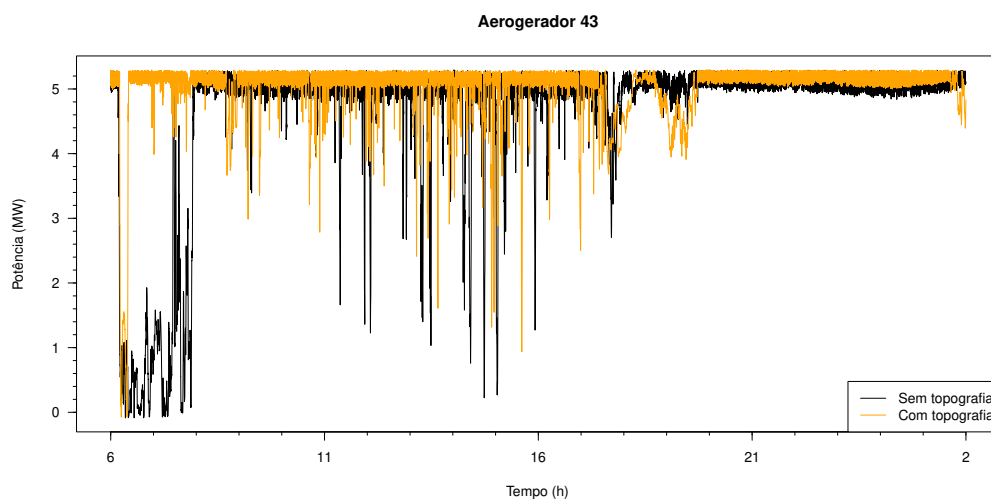
Fonte: Próprio Autor

Figura 22 – Série temporal para a produção do aerogerador 20. Linha preta referencia o escoamento sem topografia e a linha laranja o escoamento com topografia



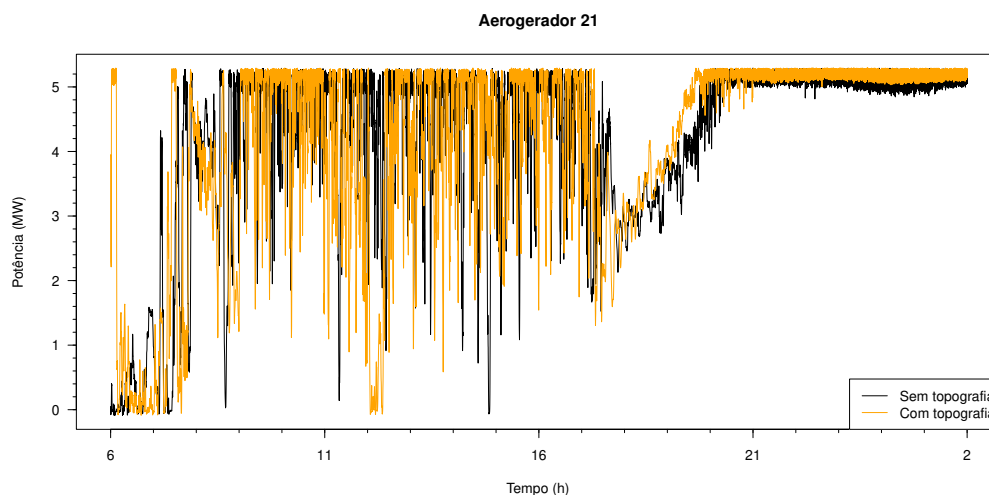
Fonte: Próprio Autor

Figura 23 – Série temporal para a produção do aerogerador 43. Linha preta referencia o escoamento sem topografia e a linha laranja o escoamento com topografia



Fonte: Próprio Autor

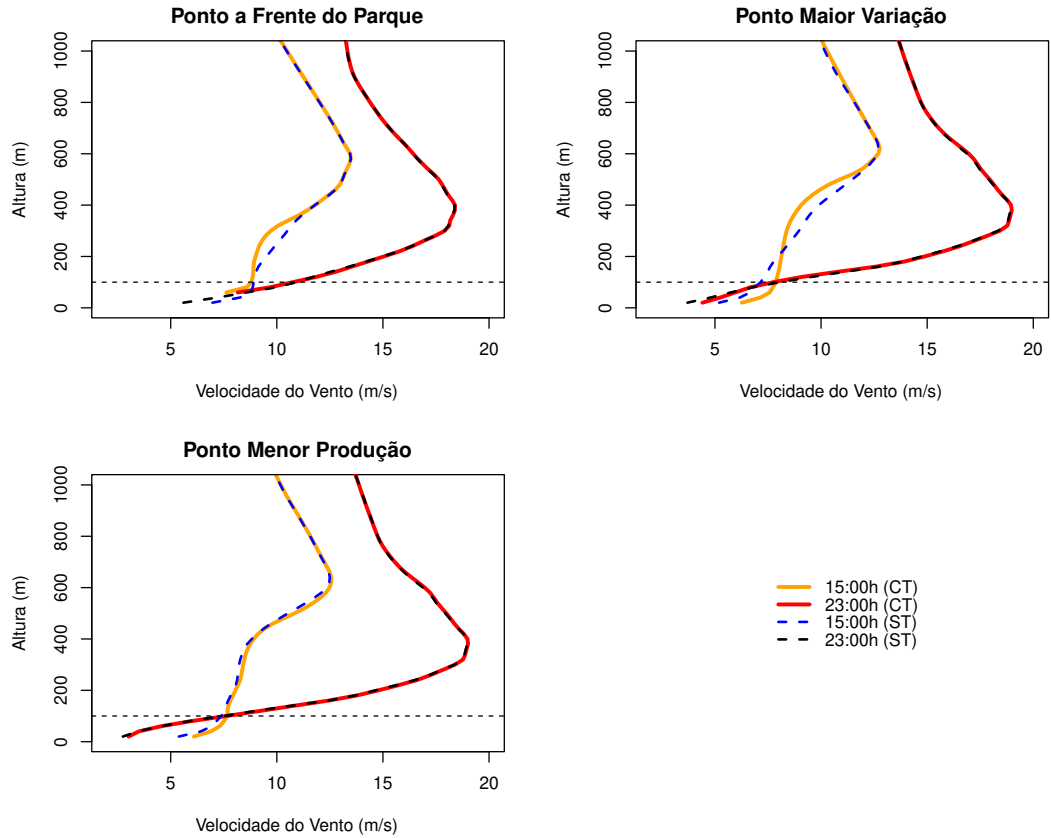
Figura 24 – Série temporal para a produção do aerogerador 21. Linha preta referencia o escoamento sem topografia e a linha laranja o escoamento com topografia



Fonte: Próprio Autor

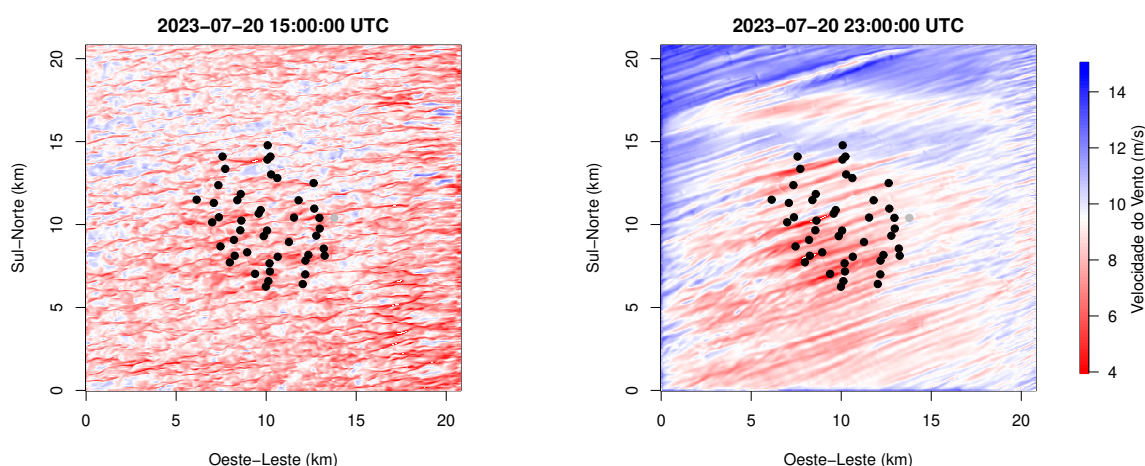
A produção média de energia eólica, considerando a produção dos 45 aerogeradores do parque, durante o período noturno é 7,82% superior à produção durante o período diurno. Essa produção superior é atribuída à presença de uma camada limite estável (noturna), onde a intensidade do cisalhamento do vento médio é maior que a apresentada em uma camada convectiva (diurna). Além disso, na data escolhida para a simulação, a intensidade do vento é maior durante a noite, com a formação de um jato de baixos níveis, onde o máximo da intensidade do vento encontra-se próximo de 400 m (Figura 25).

Figura 25 – Perfil da velocidade horizontal do vento. Utilizando como referência a linha cheia na cor laranja para às 15:00h e vermelha para às 23:00h com topografia (CT) e linha pontilhada na cor azul para às 15:00h e às 23:00h sem topografia (ST)



Fonte: Próprio Autor

Figura 26 – Velocidade do vento horizontal à 90 metros de altura em relação a origem. A esquerda representando a camada limite convectiva às 15:00h do horário local. A direita representando a camada limite estável às 23:00h do horário local. Pontos em preto representando a localização dos aerogeradores e o ponto em cinza indicando o ponto frente ao parque analisado na Figura 25



Fonte: Próprio Autor

Os resultados do presente estudo estão de acordo com os apresentados por Abkar e Porté-Agel (2015). Uma camada limite convectiva é caracterizada por uma turbulência mais intensa, dispersando a esteira de forma mais eficiente e em uma distância curta (Figura 26). Isso se deve ao fato de que, em condições instáveis, o fluxo de energia na forma de calor sensível é positivo na superfície, gerando instabilidades térmicas que fazem com que as camadas de ar próximas ao solo se tornem menos densas e ascendam, intensificando a energia cinética turbulenta e a mistura turbulenta do escoamento.

Já para a camada limite estável, o fluxo de energia na forma de calor sensível é negativo. Nessa condição, os níveis inferiores da atmosfera se tornam mais densos que os superiores, e possíveis movimentos ascendentes são desacelerados pelas forças de empuxo, reduzindo a intensidade e a mistura turbulenta. Conseqüentemente, a esteira precisará de uma distância maior para se dispersar (Figura 26).

Por fim, foi possível analisar o comportamento e suas possíveis causas para cada aerogerador citado nessa seção.

6.2 Análise Individual

O aerogerador 43 apresentou a maior média de produção, mostrando o mesmo comportamento tanto no caso com topografia, quanto no sem topografia. A predominância do vento leste foi um dos fatores que contribuíram para esse desempenho, pois coincidiu com o alinhamento do escoamento em um corredor sem a interferência de outro aerogerador à frente.

Por outro lado, as turbinas com menor produção (2, 16 e 20) são afetadas principalmente pela sua localização, estando na parte final das esteiras do parque, onde as turbinas eólicas à frente absorvem parte da energia cinética do vento, reduzindo a velocidade imediatamente a sotavento, como ilustrado na Figura 26.

O aerogerador 21 apresentou a maior diferença na produção simulada com e sem considerar a topografia. Essa diferença pode ser explicada pela altura do centro do rotor do aerogerador, que, no caso com topografia, eleva o centro deste aerogerador em comparação ao caso sem topografia, resultando em alturas superiores onde ele encontra velocidades de vento maiores. Além disso, neste aerogerador, no caso sem topografia, a intensidade do cisalhamento médio do vento foi maior na altura do centro do rotor do que no caso em que a topografia foi considerada (Figura 25).

Nota-se também que houve um padrão consistente na produção dos aerogeradores. A simulação com topografia manteve uma geração de energia mais constante em comparação com a simulação sem topografia, reduzindo suas oscilações de e mantendo a geração mais próxima e estável dos 5MW nominais. Uma possível explicação é que a rugosidade, e ondulações, da superfície terreno eleva a intensidade turbulenta do escoamento, homogeneizando-o e reduzindo os efeitos da esteira. Outro padrão notado foi as quedas de produção em todos os aerogeradores no período das 17:00h às 20:00h, onde há uma menor intensidade do vento incidente devido transição da CLC para a CLE.

7 CONCLUSÕES

No presente estudo, foram detalhadas, realizadas e apresentadas as simulações numéricas utilizando o método de simulação de grandes turbilhões com o Modelo Atmosférico PALM para investigar o escoamento da camada limite atmosférica em um parque eólico, com layout e topografia iguais aos parques Cerro Chato I, II e III, com saídas do modelo de previsão do tempo WRF como condição de contorno.

É importante ressaltar que as turbinas eólicas utilizadas no presente estudo não são as mesmas instaladas nos parques eólicos Cerro Chato I, II e III. Foram utilizadas as turbinas eólicas padrão do Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) de 5 MW, implementadas no PALM. Outra limitação do presente estudo é a resolução da grade adotada, considerada "grosseira" para escoamentos noturnos, assim, uma parte significativa do escoamento foi atribuída à subgrade, o que não permitiu uma análise detalhada das estruturas formadas na camada limite do parque. Apesar dessas limitações, o estudo possui relevância, pois contribui para entender alguns padrões de escoamento e influência da topografia em um parque eólico nas condições específicas simuladas.

Ambas as simulações, com e sem considerar a topografia, destacaram o papel crucial deste elemento na produção de energia eólica, resultando em um acréscimo médio de até 0,42 MW na produção dos aerogeradores. Esses resultados destacam a importância da topografia na otimização da geração de energia eólica, evidenciando seu potencial para aumentar ou diminuir a eficiência operacional de parques eólicos instalados em terrenos complexos.

As simulações demonstraram que a estabilidade térmica atmosférica tem uma influência significativa na distribuição espacial do déficit médio de velocidade. Em particular, a esteira se dispersa mais rapidamente sob a condição convectiva em comparação com os casos neutro e estável. Esse aumento na taxa de recuperação da esteira está relacionado ao maior nível de turbulência do vento incidente na condição instável, o que leva a um maior fluxo de entranhamento turbulento na esteira (ABKAR; PORTÉ-AGEL, 2015).

Como detalhado na Seção 6, a predominância do vento leste em conjunto com o alinhamento do escoamento em um corredor sem a interferência de outras turbinas à frente, foi um dos fatores que contribuíram para que o aerogerador 43 se destacasse com a maior eficiência. A menor produção foi observada no aerogerador 20, com as condições opostas ao de maior produção, onde coincidiu com uma região onde o escoamento foi perturbado por outros aerogeradores.

Para estudos futuros, pretende-se:

- Aumentar o domínio para reduzir os efeitos de borda;
- Reduzir o espaçamento da grade em todas as direções;
- Avaliar o comportamento da energia cinética turbulenta;

- Implementar as turbinas eólicas utilizadas pelo parque eólico do Cerro Chato.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABKAR, M.; PORTÉ-AGEL, F. Influence of atmospheric stability on wind-turbine wakes: A large-eddy simulation study. **Physics of fluids**, AIP Publishing, v. 27, n. 3, 2015.

ENGENHARIA, A. **O que é formato GeoTIFF?** 2023. Acesso em: 18 jun. 2024. Disponível em: <<https://aeroengenharia.com/glossario/o-que-e-formato-geotiff/>>.

FENG, J.; SHEN, W. Z. Wind farm layout optimization in complex terrain: A preliminary study on a gaussian hill. In: IOP PUBLISHING. **Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.], 2014. v. 524, n. 1, p. 012146.

FLUCK, S. **PALMpy**. 2020. Acesso em: 18 jun. 2024. Disponível em: <<https://github.com/stefanfluck/PALMpy>>.

FOX, R. W. et al. Mecânica dos fluidos. **Livros Técnicos e Científicos**, 2006.

FRISCH, U. **Turbulence: the legacy of AN Kolmogorov**. [S.l.]: Cambridge university press, 1995.

HEUS, T. et al. Formulation of the dutch atmospheric large-eddy simulation (dales) and overview of its applications. **Geoscientific Model Development**, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 3, n. 2, p. 415–444, 2010.

IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. 184 p. Disponível em: <<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>>.

JONKMAN, J. et al. **Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development**. [S.l.], 2009.

KAIMAL, J. C.; FINNIGAN, J. J. **Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement**. [S.l.]: Oxford university press, 1994.

LIN, D. et al. Wrf4palm v1. 0: a mesoscale dynamical driver for the microscale palm model system 6.0. **Geoscientific Model Development**, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 14, n. 5, p. 2503–2524, 2021.

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.

MARONGA, B. et al. Development of a new urban climate model based on the model palm-project overview, planned work, and first achievements. **Meteorologische Zeitschrift**, Borntraeger Science Publishers, p. 1–15, 2019.

MARQUES, M. T. A. **Obtenção da altura da camada limite planetária através da análise espectral do campo de vento do lidar Doppler**. 2017. 65 p. Dissertação

(Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear)) — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo, 2017. Disponível em: <www.teses.usp.br>. Acesso em: 27 jun. 2024.

MOYROUD, N.; PORTET, F. Introduction to qgis. **QGIS and generic tools**, Wiley Online Library, v. 1, p. 1–17, 2018.

PALM. **PALM-Seminar 2020 in Hannover**. 2020. Acesso em: 26 nov. 2023. Disponível em: <<https://blog.zhaw.ch/metenvia/2020/02/15/PALM-seminar-2020-in-hannover/>>.

PALM, W. **Static input file**. 2023. Acesso em: 18 jun. 2024. Disponível em: <<https://PALM.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/doc/app/iofiles/pids/static>>.

PORTÉ-AGEL, F.; LU, H.; WU, Y.-T. A large-eddy simulation framework for wind energy applications. v. 23, p. 27, 2010.

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

SAGAUT, P. **Large eddy simulation for incompressible flows: an introduction**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2005.

Sebrae SC. **Futuro Sustentável: Por que Investir em Energia Renovável**. 2023. Acesso em: 27 jun. 2024. Disponível em: <<https://www.sebrae-sc.com.br/blog/futuro-sustentavel-por-que-investir-em-energia-renovavel>>.

SEMA, J. M. **Fepam emite licença prévia para complexo eólico na Fronteira Oeste**. 2021. Edição: Secom. Acesso em: 27 jun. 2024. Disponível em: <<https://estado.rs.gov.br/fepam-emite-licenca-previa-para-complexo-eolico-na-fronteira-oeste>>.

SKAMAROCK, W. C. et al. A description of the advanced research wrf version 3. **NCAR technical note**, NCAR Boulder, CO, USA, v. 475, p. 113, 2008.

SOUSA, É. V. S. d. et al. Caracterização da transição de regimes de escoamento na camada limite noturna sobre diferentes superfícies. Universidade Federal de Santa Maria, 2022.

SOUZA, C.; AZEVEDO, T. Mapbiomas general handbook. **MapBiomas: São Paulo, Brazil**, p. 1–23, 2017.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1988. v. 13.

VASCONCELLOS, R. M. d. Geotiff: uma abordagem resumida do formato. In: . [S.l.]: CPRM, 2002.