



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Juliana Magalhães Gonçalves Maciel

**Caracterização do vento costeiro e offshore através de simulação numérica de mesoescala utilizando o modelo WRF e observações de LiDAR em um parque eólico no litoral do nordeste brasileiro**

Florianópolis  
2023

Juliana Magalhães Gonçalves Maciel

**Caracterização do recurso eólico costeiro e offshore através de simulação numérica de mesoescala utilizando o modelo WRF e observações de LiDAR em um parque eólico no litoral do nordeste brasileiro**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em engenharia mecânica.

Orientador: Prof. Júlio César Passos, Dr.

Coorientador: William Corrêa Radünz, Dr.

Coorientador: Prof. Yoshiaki Sakagami, Dr.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Maciel, Juliana Magalhães Gonçalves

Caracterização do vento costeiro e offshore através de simulação numérica de mesoescala utilizando o modelo WRF e observações de LiDAR em um parque eólico no litoral do nordeste brasileiro / Juliana Magalhães Gonçalves Maciel ; orientador, Júlio César Passos, coorientador, William Corrêa Radünz, coorientador, Yoshiaki Sakagami, 2023.  
113 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Eólica Offshore. 3. LiDAR. 4. WRF. 5. Circulação de Brisa. I. Passos, Júlio César . II. Radünz, William Corrêa. III. Sakagami, Yoshiaki IV. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. V. Título.

Juliana Magalhães Gonçalves Maciel

**Caracterização do recurso eólico costeiro e offshore através de simulação numérica de mesoescala utilizando o modelo WRF e observações de LiDAR em um parque eólico no litoral do nordeste brasileiro**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Felipe Mendonça Pimenta, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Renato Ramos da Silva, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em engenharia mecânica.

---

Prof. Henrique Simas, Dr.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Júlio César Passos, Dr.

Orientador

Florianópolis, 2023.

A todos que me ajudaram a chegar até aqui.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo,

A Nossa Senhora Aparecida e Nossa Senhora do Carmo pela proteção,

A minha irmã e melhor amiga, Aline Magalhães Gonçalves, por ser minha fortaleza, meu caminho e minha luz,

Aos meus pais Cláudia Regina Magalhães Gonçalves e Marco Antônio Gonçalves pelos valores e ensinamentos, por tanta entrega e dedicação,

Ao meu grande amor, Eduardo Filipe Pereira Maciel, meu esposo e grande entusiasta de todo trabalho, pela alegria e por ser meu exemplo de determinação e coragem,

Aos meus familiares,

Ao co-orientador Dr. William Corrêa Randuz, por toda dedicação e comprometimento para que esse trabalho fosse possível. Muitos aprendizados foram construídos nesse mundo da eólica graças ao seu empenho e dom em ensinar,

Ao Michel Corrêa por toda ajuda, por animar nossas reuniões semanais e pela revisão textual,

Aos meus amigos de Mariana, São João del Rei e pelo Mundo,

Ao orientador, Prof. Dr. Júlio César Passos pela oportunidade e orientação,

Ao co-orientador Prof. Dr. Yosiaki Sakagami pelos ensinamentos, conversas e também pela revisão textual,

Aos Professores Dr. Felipe Mendonça Pimenta e Dr. Renato Ramos da Sila, por todo conhecimento compartilhado,

A todos os professores do Pós-Mec pelo aprendizado,

Ao *ClusterUY*, pela infraestrutura computacional para realização das simulações.

Kamimambo

(Expressão africana do dialeto Changana que significa obrigada).

## RESUMO

A energia eólica *offshore* experimenta um grande desenvolvimento nos últimos anos e deve se consolidar no Brasil muito em breve. O interesse em investigar as características dos ventos costeiros e *offshore* são impulsionados pela perspectiva de instalação de grandes complexos eólicos no litoral brasileiro, especialmente na região nordeste do país. Neste contexto, esse trabalho teve como objetivo caracterizar o recurso eólico costeiro e offshore utilizando o modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*) para simular ventos costeiros, com características *offshore*, influenciados pela combinação dos ventos alísios de grande escala e a circulação de brisa (mesoescala). Além disso, avaliar a influência da variabilidade espaço-temporal do recurso eólico costeiro e *offshore* do litoral do PiauÍ-PI, utilizando observações de LiDAR (*Light Detection And Ranging*) da Usina Eólica de Pedra do Sal (UEPS). Para investigação, foram simulados dois períodos de uma semana. A semana dos dias 15 a 22 de julho caracterizada por ventos moderados (9,2 m/s) e a semana dos dias 15 a 22 de outubro caracterizada por ventos fortes (12,78 m/s). Uma análise de sensibilidade foi realizada no modelo WRF onde foram testadas quatro diferentes configurações de camada limite e diferentes resoluções para os níveis verticais para dois domínios de 9 km e 3 km de resolução de grade, alimentados com dados de reanálise global do ERA5. Uma torre anemométrica e um perfilador de vento LiDAR ficaram em operação na UEPS entre junho de 2013 a setembro de 2014, e os dados aqui observados foram utilizados para validar as simulações. Segundo análises estatísticas, os menores erros na simulação do vento, considerando comparações entre LiDAR e torre anemométrica, foram encontradas utilizando a parametrização MYNN e 41 níveis verticais (MAE de 1,64 m/s e Bias de -0,37 m/s para torre e MAE de 1,56 m/s e Bias de 0,13 m/s para o LiDAR). Após selecionar a configuração que melhor representou os ventos na região da UEPS, caracterizou-se a circulação de brisa e sua influência no recurso eólico *offshore*. A decomposição dos vetores em magnitude de velocidade ( $U, V$ ) confirmam a presença da brisa marítima na região, bem como a predominância de ventos *offshore* que são estabelecidos da combinação dos ventos alísios com a brisa marítima local. A brisa marítima permanece na região litorânea durante um maior período na semana de outubro, em regime de ventos fortes e céu claro. Os ventos alísios que sopram de sudeste contornam a cadeia de montanhas da Serra do Ibiapaba (954 m de altitude), localizada aproximadamente 80 km da UEPS, onde a interação dos ventos com a topografia próxima revela padrões de ventos acelerados na UEPS, principalmente durante a semana de outubro, onde ventos costeiros apresentam maior magnitude de velocidade que ventos *offshore*. A análise do recurso eólico apresentou padrão de ventos distintos entre região costeira e *offshore*, sendo a segunda caracterizada com ventos mais constantes e com menor variabilidade diurna. Dessa forma, o presente estudo analisa a presença da brisa marítima e seu impacto na velocidade do vento local, bem como avalia o potencial do recurso eólico costeiro e *offshore* no litoral do nordeste brasileiro utilizando simulações de mesoescala e observações de LiDAR.

**Palavras-chave:** Eólica *Offshore*, LiDAR, WRF, Circulação de Brisa



## ABSTRACT

Offshore wind energy has experienced great development in recent years and should consolidate itself in Brazil very soon. The interest in investigating the characteristics of coastal and offshore winds is driven by the prospect of installing large wind complexes on the Brazilian coast, especially in the northeast region of the country. In this context, this work aims to characterize the coastal and offshore wind resource using the WRF (Weather Research and Forecasting) model to simulate coastal winds, with offshore characteristics, influenced by the combination of large-scale trade winds and breeze circulation (mesoscale). In addition, to evaluate the influence of the space-time variability of the coastal and offshore wind resource on the coast of Piauí-PI, using LiDAR (Light Detection And Ranging) observations from the Pedra do Sal Wind Power Plant (UEPS). For investigation, two periods of one week were simulated. The week from the 15th to the 22nd of July was marked by moderate winds (9.2 m/s) and the week from the 15th to the 22nd of October was marked by strong winds (12.78 m/s). A sensitivity analysis was performed on the WRF model where four different layer boundary configurations and different levels were tested for two domains of 9 km and 3 km of degree resolution, fed with ERA5 global reanalysis data. An anemometric tower and a LiDAR wind profiler were in operation at UEPS between June 2013 and September 2014, and the data observed here were used to validate the simulations. According to statistical analyses, the smallest errors in the wind simulation, considering comparisons between LiDAR and anemometric tower, were found using the MYNN parameterization and 41 vertical levels (MAE of 1.64 m/s and Bias of -0.37 m/s for tower and MAE of 1.56 m/s and Bias of 0.13 m/s for LiDAR). After selecting the configuration that best characterizes the winds in the UEPS region, the breeze circulation and its influence on the offshore wind resource were characterized. The representation of vectors in magnitude of velocity ( $U, V$ ) confirm the presence of sea breeze in the region, as well as the predominance of offshore winds that arise from the combination of trade winds with the local sea breeze. The sea breeze remains in the coastal region for a longer period in the week of October, in a regime of strong winds and clear skies. The trade winds that blow from the southeast skirt the Serra do Ibiapaba mountain chain (altitude of 954 m), located about 80 km from the UEPS, where the interaction of winds with the topography accelerates accelerated wind patterns in the UEPS, mainly during the week of October, where the coastal winds have a greater magnitude of speed than the offshore winds. The wind resource analysis showed a distinct wind pattern between the coastal and offshore regions, the latter being characterized by more constant winds and little diurnal variability. Thus, this study analyses the presence of sea breeze and its impact on local wind speed, as well as evaluates the potential of coastal and offshore wind resource in the Brazilian northeast coast using mesoscale simulations and LiDAR observations.

Keywords: Offshore Wind, LiDAR, WRF, Breeze Circulation

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Modelo de três células: distribuição idealizada do vento sobre a Terra. Adaptado de (JAIN, 2010).	20
Figura 2 -	Incidência da luz solar sobre a superfície terrestre. Adaptado de (NASA, Domínio Público. <a href="https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance/page2.php">https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance/page2.php</a> (2022)).	21
Figura 3 -	Escala espaço-temporais de alguns fenômenos atmosféricos. Adaptado de (STULL, R., 2015).	23
Figura 4 -	Estrutura vertical da atmosfera. Adaptado de (STULL, R., 2015).	24
Figura 5 -	Camada limite atmosférica. Adaptado de (STULL, R., 2015).	25
Figura 6 -	Comportamento da camada limite atmosférica ao longo do dia sobre a superfície terrestre em dia de bom tempo. Adaptado de (WALLACE <i>et al.</i> , 2006).	26
Figura 7 -	Representação dos ventos alísios e Zona de Convergência Intertropical. Fonte: (YNOUE <i>et al.</i> , 2017).	27
Figura 8 -	Circulação de brisa (a) marítima (b) terrestre. Adaptado de (AHRENS, HENSON, 2017).	29
Figura 9 -	Componentes da circulação de brisa. Adaptado de (MILLER <i>et al.</i> , 2003).	30
Figura 10 -	Processos costeiros em escalas temporal e espacial que se relacionam com parques eólicos <i>offshore</i> . Adaptado de (SCHULZ-STELLENFLETH <i>et al.</i> , 2022).	32
Figura 11 -	Coordenada vertical ( $\eta$ ) baseada nos níveis de pressão hidrostática normalizada ( $P_h$ ) seguindo a curvatura da topografia. Adaptado de (SKAMAROCK; COAUTHORS, 2008)	33
Figura 12 -	Ilustração conceitual da malha computacional do modelo WRF-ARW em malha desencontrada do tipo Arakawa-C na direção horizontal. O domínio “mãe”, mais externo, é seguido de um domínio “filha” aninhada em razão de aspecto 3:1. A malha avalia a componente ( $V$ ) da velocidade no eixo $y$ nas faces norte e sul de cada elemento, enquanto avalia a componente ( $U$ ) da velocidade no eixo $x$ nas faces leste e oeste de cada célula. As variáveis termodinâmicas são analisadas no centro de cada célula (ex: temperatura potencial ( $\theta$ )) (SKAMAROCK; COAUTHORS, 2008).	34
Figura 13 -	Ilustração de quatro domínios aninhados com resoluções horizontais de 30, 10, 3.3 e 1.1 km a partir de um domínio global. Fonte: Adaptado de (WARNER, 2011).	35
Figura 14 -	Mapa topográfico da região nordeste brasileira e localização da Usina Eólica de Pedra do Sal (triângulo preto) e da Serra da Ibiapaba (triângulo vermelho). Fonte: <a href="https://pt-br.topographic-map.com/map-mq5gt/Piau%C3%AD/?center=-3.9081%2C-41.19873&amp;zoom=8&amp;popup=-3.40924%2C-37.69684">https://pt-br.topographic-map.com/map-mq5gt/Piau%C3%AD/?center=-3.9081%2C-41.19873&amp;zoom=8&amp;popup=-3.40924%2C-37.69684</a> .	42
Figura 15 -	Rosa dos ventos do LiDAR medido à 100 m de altura. Período de medição: junho de 2013 a setembro de 2014.	43
Figura 16 -	Torre anemométrica, instalada na UEPS. Fonte: COIMBRA (2018).	44

Figura 17 -	Perfilador LiDAR instalado na Usina Eólica de Pedra do Sal. SAKAGAMI (2017).	45
Figura 18 -	Localização do Parque Eólico de Pedra do Sal e domínios de grade computacional D1 (externo) e D2 (interno) aninhados do modelo de mesoescala.	46
Figura 19 -	Série temporal entre as observações de torre e LiDAR e simulações da velocidade do vento ( $WS_{100}$ ), direção do vento ( $DV_{100}$ ), temperatura ( $T_{100}$ ) e velocidade de fricção ( $U^*_{100}$ ), para o domínio D2.	50
Figura 20 -	Ciclo diário médio da velocidade do vento ( $WS_{100}$ ) e direção do vento ( $DV_{100}$ ) para os casos simulados e para as observações de torre e LiDAR, para o domínio D2.	50
Figura 21 -	Localização do Usina Eólica de Pedra do Sal e Domínios D1, D2, D3 e D4 aninhados do modelo de mesoescala.	54
Figura 22 -	Séries temporais para velocidade do vento ( $WS_{100}$ ), direção do vento ( $DV_{100}$ ) e temperatura ( $T_{100}$ ), para o mês de julho para o domínio D2.	55
Figura 23 -	Ciclo diário para velocidade do vento ( $WS_{100}$ ), direção do vento ( $DV_{100}$ ) e temperatura ( $T_{100}$ ) para o mês de julho, para o domínio D2.	56
Figura 24 -	Séries temporais para velocidade do vento ( $WS_{100}$ ), direção do vento ( $DV_{100}$ ) e temperatura ( $T_{100}$ ) para o mês de outubro para do domínio D2	57
Figura 25 -	Ciclo diário para velocidade do vento ( $WS_{100}$ ), direção do vento ( $DV_{100}$ ) e temperatura ( $T_{100}$ ) para o mês de outubro, para o domínio D2.	58
Figura 26 -	Série temporal para componente $U$ da velocidade do vento ( $U_{100}$ ) e componente $V$ da velocidade do vento ( $V_{100}$ ) para o mês de julho, a 100 m, para o domínio D2.	59
Figura 27 -	Ciclo diário para componente $U$ da velocidade do vento ( $U_{100}$ ) e componente $V$ da velocidade do vento ( $V_{100}$ ) para o mês de julho, para o domínio D2.	60
Figura 28 -	Série temporal para componente $U$ da velocidade do vento ( $U_{100}$ ) e componente $V$ da velocidade do vento ( $V_{100}$ ) para o mês de outubro, para o domínio D2.	62
Figura 29 -	Ciclo diário para componente $U$ da velocidade do vento ( $U_{100}$ ) e componente $V$ da velocidade do vento ( $V_{100}$ ) para o mês de outubro.	62
Figura 30 -	Mapa de elevação na resolução do domínio (D2) onde o quadrado vermelho representa o posicionamento do LiDAR e a linha vermelha representa o transecto.	64
Figura 31 -	Transectos verticais da componente $V$ da velocidade do vento no domínio D2 para o caso 3 ilustrando a formação da circulação de brisa no litoral da Usina Eólica de Pedra do Sal para a semana do mês de julho. O ponto preto representa a localização do LiDAR. A brisa marítima está representada por ventos que fluem do oceano para a costa em baixos níveis (azul) acompanhada de um fluxo de retorno que possui orientação da terra para o mar em altos níveis (vermelho). As colunas se referem a evolução temporal para algumas horas do dia. As linhas representam cada dia da semana simulada	64
Figura 32 -	Análoga à Figura 31, para o mês de outubro.	65

Figura 33 -	Representação espaço temporal da temperatura potencial, a 100 m, no domínio D2 para a semana do mês de julho. O triângulo vermelho representa a localização do perfilador LiDAR instalado na UEPS. As linhas representam cada dia simulado e as colunas representam alguns instantes de tempo que ilustram a evolução temporal da atividade de mesoescala.	66
Figura 34 -	Análoga à Figura 33, para o mês de outubro.	67
Figura 35 -	(a) Localização dos marcadores arbitrários no mar (verde) e no continente (azul). Posicionamento do LiDAR (vermelho). (b) Diferença de temperatura de 5° (linha pontilhada vermelha) entre dois pontos arbitrários entre terra e mar para a semana do mês de julho (linha laranja) e para o mês de outubro (linha marrom).	68
Figura 36 -	Representação espaço temporal da componente $V$ da velocidade, a 100 m, no domínio D4 para a semana do mês de julho. O triângulo vermelho representa a localização do perfilador LiDAR instalado na UEPS. As linhas representam cada dia simulado e as colunas representam alguns instantes de tempo que ilustram a evolução temporal da circulação de brisa marítima.	70
Figura 37 -	Análoga à Figura 36, para o mês de outubro.	71
Figura 38 -	: Representação espaço temporal da magnitude da velocidade do vento, à 100 m, no domínio D2 para a semana do mês de julho. O triângulo vermelho representa a localização do perfilador LiDAR instalado na UEPS. As linhas representam cada dia simulado e as colunas representam alguns instantes de tempo que ilustram o comportamento da magnitude da velocidade do vento ao contornar a Serra de Ibiapaba, durante o dia e noite.	72
Figura 39 -	Análoga à Figura 38, para madrugada.	73
Figura 40 -	Representação espaço temporal da magnitude da velocidade do vento, à 100 m, no domínio D2 para a semana do mês de outubro. O triângulo vermelho representa a localização do perfilador LiDAR instalado na UEPS. As linhas representam cada dia simulado e as colunas representam alguns instantes de tempo que ilustram o comportamento da magnitude da velocidade do vento ao contornar a Serra de Ibiapaba, durante o dia e noite.	74
Figura 41 -	Análoga à Figura 40, para madrugada.	75
Figura 42 -	Seção vertical da componente $U$ da velocidade do vento ao longo do transecto para o caso 3 e domínio D2, à 100 m. Ilustra o ciclo diário da componente $U$ da velocidade média para a semana do mês de julho. A variação da variável $U$ de velocidade representa a variabilidade do recurso eólico costeiro e <i>offshore</i> na região de Pedra do Sal. A linha pontinha representa a transição da terra para o mar.	77
Figura 43 -	Análoga à Figura 42, para o mês de outubro.	77

Figura 44 -	Representação espaço temporal da componente $V$ da velocidade, a 100 m, no domínio D2 para a semana do mês de julho. O triângulo vermelho representa a localização do perfilador LiDAR instalado na UEPS. As linhas representam cada dia simulado e as colunas representam alguns instantes de tempo que ilustram a evolução temporal da circulação de brisa marítima.	94
Figura 45 -	Análoga à Figura 44, para o mês de outubro.	95
Figura 46 -	Representação espaço temporal da componente $V$ da velocidade, a 100 m, no domínio D2 para a semana do mês de julho. O triângulo vermelho representa a localização do perfilador LiDAR instalado na UEPS. As linhas representam cada dia simulado e as colunas representam alguns instantes de tempo que ilustram a evolução temporal da circulação de brisa marítima com menor detalhe temporal.	96
Figura 47 -	Similar a Figura 46, para o mês de outubro.	97
Figura 48 -	Representação espaço temporal da componente $U$ da velocidade, a 100 m, no domínio D2 para a semana do mês de julho. O triângulo vermelho representa a localização do perfilador LiDAR instalado na UEPS. As linhas representam cada dia simulado e as colunas representam alguns instantes de tempo que ilustra a predominância de ventos leste.	98
Figura 49 -	Análoga à Figura 48, para o mês de outubro.	99
Figura 50 -	Novas instalações de energia eólica <i>onshore</i> e <i>offshore</i> entre os anos de 2017 a 2021, (GWEC, 2022).	101
Figura 51 -	Total de instalações <i>onshore</i> e <i>offshore</i> no ano de 2021. Adaptado de (GWEC, 2022).	102
Figura 52 -	Velocidade média do vento no litoral brasileiro segundo três bases de dados a) Wind Atlas b) CEPEL c) ERA5, (ROADMAP, 2020).	103
Figura 53 -	Parques eólicos em processo de licenciamento ambiental no IBAMA. (Ibama, 2022. <a href="http://www.ibama.gov.br/laf/consultas/mapas-de-projetos-em-licenciamento-complexos-eolicos-offshore">http://www.ibama.gov.br/laf/consultas/mapas-de-projetos-em-licenciamento-complexos-eolicos-offshore</a> )	105
Figura 54 -	Estimativa de tamanhos de turbinas eólicas para o ano de 2035 em comparação com as turbinas medidas em 2019 para ambiente a) <i>Onshore</i> b) <i>Offshore</i> . Adaptado de (WISER. R, <i>et al</i> , 2021).	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Escala de movimento horizontal típico na atmosfera. Adaptado de (ORLANSKI, I., 1975).	22
Tabela 2 -	Equipamentos instalados na torre anemométrica na UEPS que foram utilizados nessa dissertação. Componentes de velocidade $U$ , $V$ e $W$ , $WS$ (magnitude de velocidade), $WD$ ( <i>Wind Vane</i> ) e $T$ (temperatura).	44
Tabela 3 -	Parametrizações físicas da camada limite.	47
Tabela 4 -	Métricas estatísticas (MAE e Bias) para as simulações de velocidade do vento ( $WS_{100}$ ), direção do vento ( $DV_{100}$ ), temperatura ( $T_{100}$ ) e velocidade de fricção ( $U^*_{100}$ ) comparados aos dados da torre anemométrica.	51
Tabela 5 -	Métricas estatísticas (MAE e Bias) para as simulações de velocidade do vento ( $WS_{100}$ ) e direção do vento ( $WD_{100}$ ) comparados aos dados do LiDAR.	51
Tabela 6 -	Características das três bases de dados utilizadas para a elaboração dos mapas de recurso eólico apresentados na Figura 52.	104
Tabela 7 -	Apresentação das características dos parques eólicos <i>offshore</i> , por estado, em fase de licenciamento ambiental no IBAMA.	104

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARW	<i>Advanced Research Weather</i>
IRENA	Agência Internacional para as Energias Renováveis
CBM	Cabeça da Brisa Marítima
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLCI	Camada Limite Convectiva Interna
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CGBM	Corrente de Gravidade da Brisa Marítima
COAMPS	<i>Coupled Ocean Atmosphere Mesoscale Prediction System</i>
ECMWF	<i>European Center for Medium-Range Wather Forecasts</i>
ERA5	Reanálise de 5ª geração do ECMWF
FGP	Força de Gradiente de Pressão
FBM	Frente da Brisa Marítima
IEA	International Energy Agency
KHBs	<i>Kelvin-Helmholtz</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
MYNN	<i>Mellor-Yamada Nakanishi and Niino</i>
MCG	Modelo de Circulação Global
NMM	<i>Nonhydrostatic Mesoscale Model</i>
REN21	<i>Renewable Energy Policy Network</i>
SBM	Sistema de Brisa Marítima
SCBM	Sistema de Circulação de Brisa Marítima
DTU	<i>Technical University of Denmark</i>
TKE	<i>Turbulent Kinetic Energy</i>
UEPS	Usina Eólica de Pedra do Sal
VAD	<i>Velocity Azimuth Display</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>
YSU	<i>Yonsei University</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZE	Zona de Entranhamento
ZEE	Zona Econômica Exclusiva

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Alfabeto latino

$DV$	Direção do vento
$E$	Eficiência da turbina
$N$	número total de elementos
$P$	Potência teórica
$Ph$	Pressão hidrostática normalizada
$Phs$	Pressão na superfície
$Pht$	Pressão em altos níveis
$r$	Raio da turbina
$T$	Temperatura
$U$	Componente do vetor velocidade na direção $x$
$U^*$	Velocidade de fricção
$V$	Componente do vetor velocidade na direção $y$
$V_v$	Velocidade do vento
$W$	Componente do vetor velocidade na direção $z$
$WS$	Velocidade do vento

### Alfabeto grego

$\eta$	Sistema de Coordenadas verticais em pressão hidrostática
$\rho$	Massa específica do ar
$\theta$	Temperatura potencial
$\theta'_i$	Erro de previsão
$(\theta_i^{obs})$	Valor observado no instante $i$
$(\theta_i^p)$	Valor previsto no instante $i$

### Símbolo subscrito

$i$	índice de iteração $i = (1, 2, 3, \dots N)$
-----	---

### Símbolo sobrescrito

$U^*$	Velocidade de fricção
-------	-----------------------



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS.	18
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos específicos.</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.</b>	<b>20</b>
2.1	O VENTO.	20
<b>2.1.1</b>	<b>Circulação geral da atmosfera.</b>	<b>20</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Escala espacial dos fenômenos atmosféricos.</b>	<b>22</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Estrutura vertical da atmosfera.</b>	<b>24</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Camada limite atmosférica.</b>	<b>25</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Regime de ventos relevantes.</b>	<b>27</b>
2.1.5.1	<i>Ventos alísios.</i>	27
2.1.5.2	<i>Circulação de brisa marítima.</i>	28
<b>2.1.6</b>	<b>Meteorologia costeira.</b>	<b>31</b>
2.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM O MODELO WRF.	32
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.</b>	<b>36</b>
3.1	ESTUDOS COM PERFILADORES DE VENTO LiDAR.	36
3.2	ESTUDOS SOBRE PREVISÃO DO VENTO COM MODELO DE MESOESCALA.	37
3.3	RECURSO EÓLICO COSTEIRO E <i>OFFSHORE</i> .	39
3.4	RESUMO DA REVISÃO.	40
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.</b>	<b>42</b>
4.1	DESCRIÇÃO DO DA USINA EÓLICA.	42
4.2	INSTRUMENTAÇÃO.	43
<b>4.2.1</b>	<b>Torre anemométrica.</b>	<b>43</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Perfilador LiDAR.</b>	<b>45</b>
4.3	CONFIGURAÇÃO DO MODELO WRF	45
<b>4.3.1</b>	<b>Estudo de sensibilidade.</b>	<b>45</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Métricas de erro.</b>	<b>48</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.</b>	<b>49</b>

5.1	VALIDAÇÃO DO ESTUDO DE SENSIBILIDADE.....	49
5.2	SIMULAÇÕES PARA DIFERENTES RESOLUÇÕES .....	53
5.2.1	<b>Julho.</b> .....	<b>54</b>
5.2.2	<b>Outubro.</b> .....	<b>56</b>
5.3	REPRESENTAÇÃO E EVOLUÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA CIRCULAÇÃO DE BRISA MARÍTIMA .....	58
5.3.1	<b>Julho.</b> .....	<b>59</b>
5.3.2	<b>Outubro.</b> .....	<b>61</b>
5.3.3	<b>Transecto ortogonal a linha da costa</b> .....	<b>63</b>
5.4	MAPAS REPRESENTATIVOS PARA A SIMULAÇÃO COM DIFERENTES RESOLUÇÕES .....	65
5.4.1	<b>Temperatura Potencial.</b> .....	<b>66</b>
5.4.2	<b>Componente V da velocidade.</b> .....	<b>69</b>
5.4.3	<b>Magnitude de velocidade</b> .....	<b>72</b>
5.5	DISCUSSÕES.....	76
5.5.1	variabilidade espaço-temporal do recurso eólico offshore. ....	76
6	<b>CONCLUSÃO.</b> .....	<b>79</b>
6.1	CONTRIBUIÇÕES.....	79
6.2	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
	<b>REFERÊNCIAS.</b> .....	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE.</b> .....	<b>93</b>
	<b>ANEXO.</b> .....	<b>100</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A demanda global por energia cresceu cerca de 65% desde 1990, segundo a IEA (*International Energy Agency*) (IEA, 2022). Como consequência, as emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera aumentaram de 1,9 gigatoneladas (Gt/ano) em 1990 para 36,3 (Gt/ano) em 2021 (IEAc, 2022) acarretando mudanças climáticas importantes em todo o globo, como o aumento no efeito estufa na atmosfera da Terra. Os avanços do aquecimento global são amplamente discutidos em conferências internacionais como COP26 (26<sup>a</sup> Conferência das Nações Unidas sobre Mudança climática) e originaram o tratado internacional do Acordo de Paris (UNITED NATIONS, 2015), em que as energias renováveis são pautadas como uma das soluções ao combate às mudanças do clima. Além de questões ambientais, a pandemia da COVID-19 acarretou impactos significativos no setor energético global, devido principalmente a interrupção nas cadeias de suprimentos, desafios de mobilidade, orçamentos reduzidos e isolamento social (BRUNEL, 2021). Além da COVID-19, os impactos na energia foram intensificados devido à crise de energia provocada pela invasão da Ucrânia pela Rússia (IEA, 2022). A recente guerra também mostrou que países que apresentam uma matriz energética com grande participação de energias renováveis, desfrutam de um maior nível de independência e segurança energética (IRENA, 2019).

Segundo o relatório da REN21 (*Renewable Energy Policy Network*) (MURDOCK, 2021), em 2020, 78,5% da energia primária consumida no mundo foi derivada de combustíveis fósseis. Ainda que as energias renováveis representem uma parcela menor na produção de energia, sua participação vem aumentando gradativamente, apresentando um crescimento recorde em 2020, onde as energias eólica e solar juntas somaram mais de 10% da matriz elétrica global (IEAb, 2022). A eólica está entre as fontes de energias renováveis mais importantes mundialmente (IEA, 2022). Em 2021, registrou-se um aumento de 93,5 GW na capacidade instalada global. A matriz eólica brasileira apresentou um salto de crescimento virtuoso nos últimos anos, passando de 1 GW em 2011 para 22,6 GW de capacidade instalada até outubro de 2022 (ANEEL, 2022). Ao todo são 812 complexos eólicos, totalizando mais de 9200 aerogeradores em operação, em 12 estados brasileiros (ABEEÓLICA, 2022), com destaque para os estados do nordeste. No Brasil, ainda não há parques eólicos *offshore* instalados. Entretanto, existem 66 projetos em fase de licenciamento ambiental no IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) (IBAMA, 2022). Portanto, esses números apontam a importância da energia eólica *offshore* tanto em nível global quanto

nacional. Um panorama geral sobre a energia eólica *onshore* e *offshore* no Brasil e no mundo está detalhada no Anexo A desse trabalho.

A energia eólica *offshore* desempenha um importante papel na transição do sistema global de energia, que busca uma base renovável e neutra em carbono (LEE; ZHAO, 2021). No entanto, a transição energética vem acompanhada de desafios de pesquisa, sendo a interação multi-escala entre oceano e atmosfera um dos três principais obstáculos científicos em pesquisa de energia eólica *offshore*, seguido dos desafios referentes ao desenvolvimento de máquinas rotativas cada vez maiores e otimização do controle de usinas eólicas (VEERS *et al.*, 2022; VEERS *et al.*, 2019). No que segue a discussão sobre eólica *offshore*, as observações sobre o recurso eólico ainda são muito escassas, principalmente no Brasil. O primeiro estudo de avaliação dos recursos eólicos *offshore* desenvolvidos pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética), estima 57 GW de potencial *offshore* até 10 km da costa (EPE, 2019). Considerando a zona econômica exclusiva (ZEE), com distância de até 320 km da costa, o potencial estimado chega a 1780 GW. Observações do satélite *QuikSCAT*, citadas no relatório da EPE, revelam que o potencial *offshore* na ZEE é cerca de doze vezes maior que no território continental do Brasil. Elevadas velocidades do vento foram encontradas próximo à costa de Sergipe, Alagoas, Rio Grande do Norte, Ceará, Rio Grande do Sul e Santa Catarina (ORTIZ; KAMPEL, 2011). PIMENTA *et al.*, (2019) apresenta o mapeamento dos ventos utilizando o produto *Blended Sea Winds* (BSW) e uma base de dados climatológicos derivados de *Objectively Analyzed Air-Sea Fluxes* (OAFSLUX) referentes ao período de 1987 a 2014, e avalia o recurso eólico *offshore*, incluindo o parâmetro de estabilidade atmosférica na ZEE. Outro estudo climatológico apresentado por SILVA *et al.*, (2016) avaliou a complementaridade de energia eólica *offshore* e hidrelétrica no sistema elétrico brasileiro. Esse estudo analisou dados de precipitação da Unidade de Pesquisa Climática e ventos de satélite NOAA para avaliação do recurso eólico *offshore* entre os anos de 1989 a 2009. Estudos dessa magnitude, envolvendo dados de satélite ou produtos de reanálise, apresentam estimativas de velocidades de vento adequadas, mas não suficientes, para avaliar os detalhes de recurso eólico necessários para a construção de parques eólicos. Isso porque, as incertezas relativas à previsão desses recursos eólicos em zonas costeiras e *offshore*, ocorrem devido, principalmente, à falta de medições locais, especialmente nas alturas dos cubos das turbinas (AHSBAHS *et al.*, 2017; BARTHELMIE *et al.*, 2007). Assim, visando à obtenção de dados de vento mais precisos, tecnologias como os dispositivos de sensoriamento remoto têm sido desenvolvidas e estão sendo amplamente utilizadas para medição de vento, especialmente em ambiente *offshore*.

Neste contexto, os dispositivos LiDAR (do inglês, *Light Detection And Ranging*) têm-se consolidado nas campanhas de medição, devido à maior flexibilidade para instalação, alcance e resolução vertical das medições, em comparação com torres anemométricas. Assim, tais dispositivos têm sido utilizados para a investigação de fenômenos costeiros e *offshore* (SCHULZ-STELLENFLETH *et al.*, 2022). Um estudo pioneiro no Brasil foi realizado por SAKAGAMI *et al.*, (2023) utilizando um LiDAR que operou durante um ano, na região litorânea do estado do Piauí – PI, no Usina Eólica de Pedra do Sal. Nesse estudo, foram avaliados os efeitos da intensidade de turbulência e do cisalhamento horizontal do perfil de velocidade do vento no desempenho de aerogeradores instalados na região costeira de Pedra do Sal. Em outro estudo, um perfilador LiDAR foi instalado em uma plataforma de pesca a uma distância de 250 m da costa, em Araranguá, no sul de Santa Catarina. Nesse estudo constatou-se que o perfil de velocidade do vento apresenta características de transição entre a superfície do oceano e da terra, relacionadas à forte influência da circulação de brisa na composição local dos ventos (NASSIF *et al.*, 2020).

Complementares às medições de vento, modelos numéricos de previsão do tempo são importantes no estudo da física do vento no ambiente *offshore*. Assim, a interdisciplinaridade e a combinação de sistemas de medições e simulações multiescalas é um importante motor do avanço científico na pesquisa em energia eólica (VEERS *et al.*, 2019).

O modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*) (SKAMAROCK, CO-AUTHORS, 2008) representa um dos modelos numéricos de previsão do tempo mais utilizados em meteorologia e energia eólica. Esse modelo pode ser utilizado para desenvolver e testar parametrizações físicas, estudar ventos atmosféricos e mudanças climáticas, estimar padrões meteorológicos locais para previsão de energia eólica e solar, dentre outras aplicações. Tradicionalmente, utilizava-se o WRF com resoluções espaço-temporais associadas à mesoescala atmosférica, daí a terminologia “modelo de mesoescala”. Contudo, este tem sido utilizado com maior resolução espaço-temporal para simulações também da microescala atmosférica (RADÜNZ *et al.*; 2020), sendo assim um modelo com capacidades multiescala. Um estudo realizado por COIMBRA, (2018) analisou diferentes parametrizações de camada limite e combinou o WRF com redes neurais artificiais para investigar previsões de energia eólica no nordeste brasileiro. O mesmo modelo foi utilizado por SAKAGAMI, (2017) para simular e caracterizar o vento e a circulação de brisa na região de Pedra do Sal, litoral do PI. Estudos sobre recurso eólico costeiro e *offshore* no Brasil já foram desenvolvidos analisando dados de satélite (PIMENTA *et al.*, 2019; SILVA, *et al.*, 2016) e modelos numéricos (SANTOS

*et al.*, 2016). Entretanto, poucos estudos combinaram observações de LiDAR e simulações de mesoescala para a caracterização do vento e do recurso eólico da região costeira do nordeste brasileiro.

Sabendo da importância da pesquisa científica para o desenvolvimento de novos modelos, aprimoramento do uso e da capacidade desses representarem os ventos no ambiente costeiro e marítimo, ponto estratégico para o avanço da energia eólica *offshore* no Brasil e no mundo, o presente trabalho visa a investigar a caracterização do recurso eólico costeiro e *offshore* através de simulações numéricas de mesoescala utilizando o modelo numérico WRF. Além disso, essa dissertação também tem como objetivo avaliar o desempenho do modelo na compreensão de sistemas atmosféricos costeiros, bem como analisar a influência da circulação de brisa na caracterização dos ventos na região nordeste brasileira, especialmente no litoral do estado do Piauí. Assim, esse estudo apresenta uma avaliação de diferentes parametrizações de camada limite em diferentes níveis verticais de resolução do WRF de modo a selecionar a configuração que melhor representa as características dos ventos na UEPS. As simulações foram realizadas em um cluster computacional e alimentadas com dados de reanálise global do projeto ERA5. Medições de LiDAR e torre anemométrica foram utilizados para validar os resultados. Dois períodos de uma semana que representam ventos fortes (15 a 22 de outubro de 2013) e moderados (15 a 22 de julho de 2014) foram analisados. As simulações apresentam semelhanças significativas com dados de observações para análise do ciclo diário. Esta investigação visa a contribuir para uma melhor compreensão dos ventos costeiros característicos *offshore* presentes no litoral do PI que influenciam na avaliação do recurso eólico em toda região nordeste brasileira. Assim sendo, os objetivos do trabalho são enunciados a seguir.

## 1.1 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo geral caracterizar a variabilidade do recurso eólico costeiro e *offshore* e sua relação com a circulação de brisa marítima local. Para isso, são aplicadas simulações numéricas de mesoescala utilizando o modelo WRF validadas por medições de LiDAR e de torre anemométrica localizadas na Usina Eólica de Pedra do Sal (PI).

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a sensibilidade do modelo WRF quanto às parametrizações de camada limite atmosférica e resolução vertical da malha computacional para identificar a configuração mais adequada mediante validação com observações de Pedra do Sal;
- Utilizar dados de medições de torre anemométrica e LiDAR para validar simulações de mesoescala, utilizando diferentes parametrizações físicas;
- Relacionar variabilidade espaço-temporal do recurso eólico *offshore* com os ventos de grande escala (alísios) e a circulação de brisa local;
- Caracterizar a evolução dos ventos locais e da circulação de brisa marítima ao longo do ciclo diário para diferentes magnitudes de ventos de grande escala.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O conteúdo apresentado nessa dissertação visa desenvolver uma discussão sobre o regime e a formação dos ventos, utilização de simulações de mesoescala para previsão de vento local e de energia eólica e sua interrelação com a avaliação do recurso eólico costeiro e *offshore*. Essa seção está organizada em três partes. A primeira (seção 2.1) aborda sobre a física do vento. A seção subsequente (seção 2.2) apresenta o modelo WRF e, por último, discute-se sobre a energia eólica atual, as perspectivas futuras e os desafios (seção 2.3).

### 2.1 O VENTO

#### 2.1.1 Circulação geral da atmosfera

O fator dominante para geração da circulação geral atmosférica é o aquecimento desigual da superfície da Terra, que experimentam balanços energéticos desiguais, onde os polos perdem mais energia do que recebem, em termos líquidos (balanço radioativo). Para equilibrar essa desigualdade, a atmosfera transporta o ar quente para os polos e o ar frio para o equador (AHRENS *et al.*, 2017).

Para facilitar a visualização dos movimentos atmosféricos um modelo simplificado e idealizado está exemplificado da Figura 1. Nesse modelo, três células representam a circulação meridional global, onde a energia é transferida das regiões equatoriais para as polares.

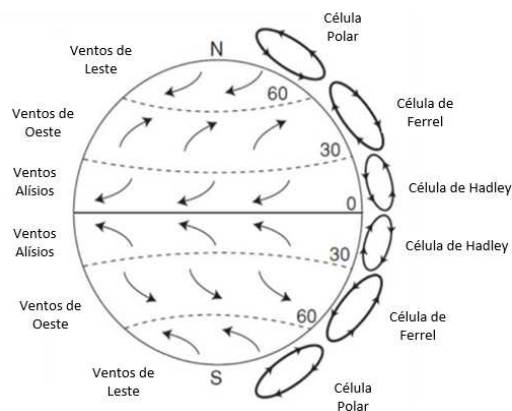


Figura 1 – Modelo conceitual da circulação geral atmosférica de três células: distribuição idealizada do vento sobre a Terra. Adaptado de (JAIN, 2010).



A geometria da Terra não permite que a radiação solar se distribua igualmente em todas as latitudes. Assim, perto do equador a radiação solar é recebida com maior intensidade, enquanto nos polos é recebida com menor intensidade, uma vez que a entrada da luz solar é recebida em ângulos agudos em relação à superfície, como apresentado pela Figura 2.

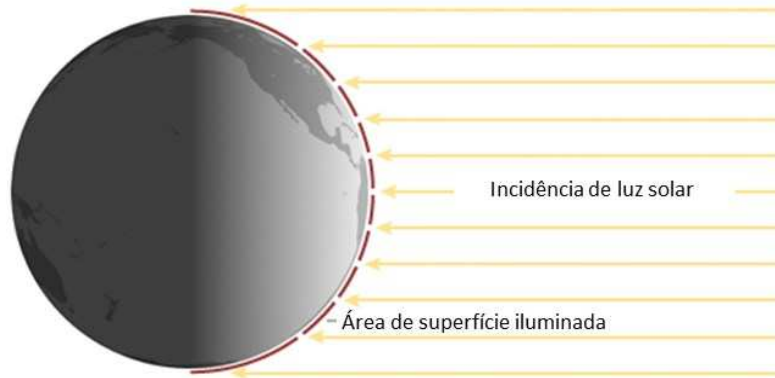


Figura 2 – Incidência da luz solar sobre a superfície terrestre. Adaptado de (NASA, Domínio Público. Fonte: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance/page2.php>, 2022).

Para o modelo de três células, os trópicos recebem um excesso de calor quando comparado aos polos. Através do modelo é possível visualizar uma área de alta pressão nos polos e uma área de baixa pressão na região do equador (Figura 1). Entre aproximadamente  $0^\circ$  a  $30^\circ$  de latitude, a circulação é representada pela célula Hadley. Nessa região, devido ao aquecimento solar próximo à linha do equador, o ar quente e úmido sobe e move-se acima em direção aos polos até  $30^\circ$  de latitude, formando a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A ZCIT está localizada próximo ao Equador, sendo caracterizada por baixas pressões em superfície e altas taxas de precipitação. Uma vez que uma zona de alta pressão é formada perto dos subtropicais (chamado de altas subtropicais) e uma zona de baixa pressão é formada na atmosfera baixa, o ar de superfície se descola da zona de alta pressão para a zona de baixa pressão. Devido à aceleração de *Coriolis*, o ar escoar para a direita do hemisfério norte e para esquerda no hemisfério sul, dando origem aos ventos alísios de grande escala de nordeste e sudeste, respectivamente (AHRENS *et al.*, 2017).

Entre a célula de *Hadley* e a célula Polar, encontra-se a célula de *Ferrel*. A célula de *Ferrel* ocorre nas zonas de médias latitudes, caracterizando um movimento de ventos em torno de  $30^\circ$  a  $60^\circ$ . Essa célula representa o encontro entre o ar quente que sobe em direção aos polos

e o ar frio que desce dos polos. Essas duas massas de ar com temperaturas diferentes são separadas pela frente polar (uma zona de baixa pressão). Nessa região a força de *Coriolis* desvia o ar frio dos polos de modo que o fluxo global de ventos é de oeste (AHRENS *et al.*, 2017).

Por fim, acima da latitude de 60° encontra-se a célula polar. Nessa região, em condição de inverno, os ventos referentes a altas polares (condições de frio intenso) movem-se em direção às baixas subpolares (condições mais quentes) e por conta da força de *Coriolis* os ventos polares de leste são formados (AGUADO; BURT, 2015).

### 2.1.2 Escalas espaciais dos movimentos atmosféricos

O vento é caracterizado pelo ar em movimento. Através dele é possível transportar calor, umidade, poeira, dentre outros componentes. Há na atmosfera circulações em diversas escalas espaciais, caracterizadas pelos meteorologistas de acordo com seu tempo de vida e dimensão espacial. Uma possível subdivisão dos fenômenos meteorológicos está apresentada na Tabela 1. Aqui, o critério da escala espacial horizontal de comprimento é aplicado possibilitando observar qual fenômeno ocorre dado um comprimento horizontal.

Tabela 1: Escalas de movimento horizontal típicos na atmosfera. Adaptado de ORLANSKI, I. (1975).

Tamanho	Escala	Nome	Fenômeno
20.000 km	Macro- $\alpha$	Escala global	Circulação global da atmosfera
2.000 km	Macro- $\beta$	Escala sinóptica	Massas de ar, ciclones extratropicais
200 km	Meso- $\alpha$	Mesoescala	Furacões e frentes
20 km	Meso- $\beta$	Mesoescala	Jato noturno, linhas de instabilidade
2 km	Meso- $\gamma$	Mesoescala	Tempestades, efeitos urbanos
200 m	Micro- $\alpha$	Turbulência da camada limite	Ondas gravitacionais curtas
20 m	Micro- $\beta$	Turbulência da camada superficial	Térmicas e turbulência convectiva, ondas, redemoinhos de poeira.
2 m	Micro- $\gamma$	Turbulência de subfaixa inercial	Plumas da camada superficial
2 mm	Micro- $\delta$	Turbulência em escala fina	Turbulência mecânica e isotrópica

Diversas escalas horizontais de movimento são sobrepostas na atmosfera, como apresentado na Figura 3. A escala vertical da maioria dos fenômenos climáticos de grande

escala é restringida pela altura máxima da troposfera que possui, aproximadamente, 10 km de extensão. Fenômenos meteorológicos de maior escala apresentam a tendência em permanecer por longos períodos, como, por exemplo, fenômenos relacionados à circulação global da atmosfera, massas de ar e ciclones extratropicais. Já os fenômenos de menor escala, tendem a existir por períodos mais curtos, como a turbulência (STULL, 2015).

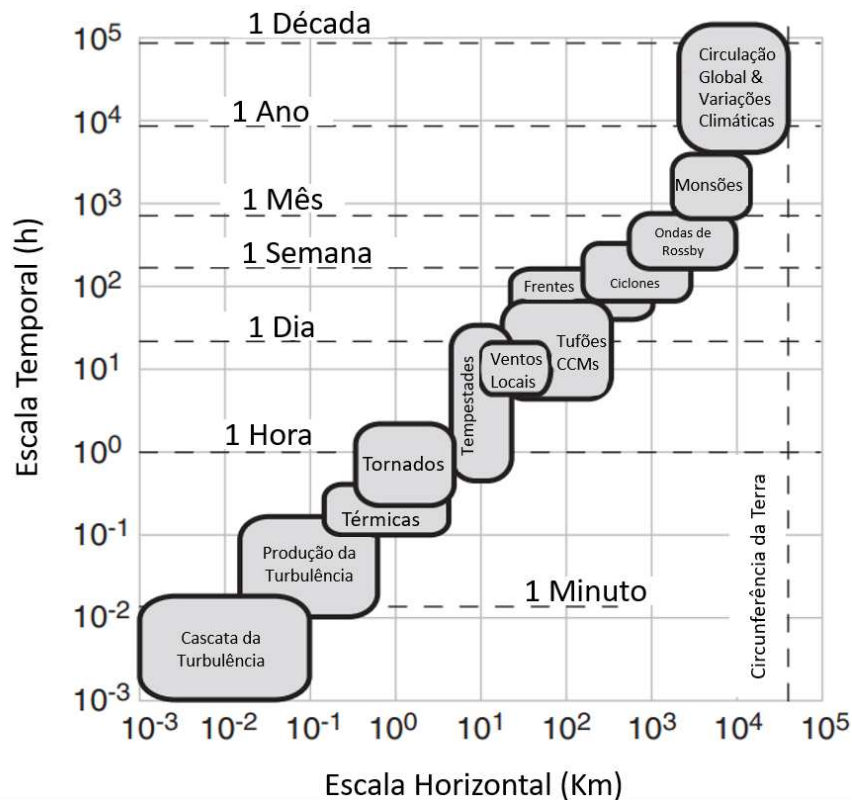


Figura 3: Escalas espaço-temporais de alguns fenômenos atmosféricos. Adaptado de (STULL, R., 2015).

A microescala é composta por redemoinhos de poucos metros de diâmetros responsáveis por dispersar poeira e fumaça, balançar galhos de árvores e mover pequenos objetos como folhas e papéis. Eles são formados por convecção ou pelo vento que passa por um obstáculo, e normalmente são de curta duração. Fenômenos de mesoescala variam de aproximadamente 2 km a 200 km. Os fenômenos nessa escala incluem ventos locais (ventos que se formam ao longo de regiões costeiras e regiões montanhosas), tempestades, tornados e pequenos ciclones, podendo durar de poucos minutos até 24 horas. Fenômenos de escala sinóptica variam aproximadamente de 200 a 2000 km. Os fenômenos que ocorrem nessa escala podem durar de poucos dias até algumas semanas, são eles grandes furacões, tufões e também

sistemas de latitude média que trazem chuva, neve e vento. Por fim, os maiores padrões de ventos são encontrados em escala global ou escala planetária. Esses padrões de ventos cobrem grandes áreas do planeta e, junto a escala sinóptica, são conhecidos como fenômenos de macroescala (AHRENS, 2019).

### 2.1.3 Estrutura vertical da atmosfera

A percepção em relação aos fenômenos naturais, em geral, e atmosféricos, em particular, estão fortemente condicionados às condições da superfície. Assim sendo, a estrutura atmosférica descreve o estado do ar para diferentes alturas (Figura 4). A real estrutura vertical da atmosfera se transforma constantemente com o tempo e a localização devido às mudanças nas condições climáticas e na dinâmica da atividade solar (STULL, 2015).

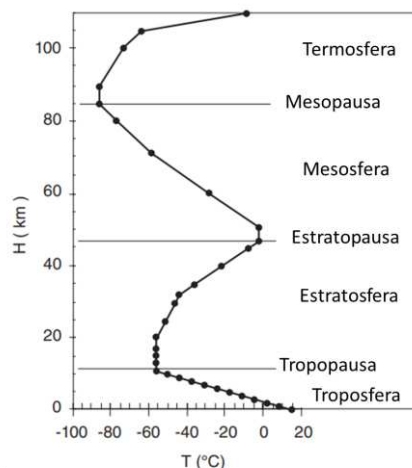


Figura 4 – Estrutura vertical da atmosfera. Adaptado de (STULL, R., 2015).

A troposfera é a camada mais próxima à superfície e sua profundidade apresenta variação entre 8 a 16 km de altitude, dependendo da latitude e da estação do ano, (ZHANG, 2015). Essa região permanece em constante movimentação devido às correntes de ar ascendentes e descendentes (STULL, R., 2015). A Camada Limite Atmosférica (CLA) representa a região mais baixa da troposfera, variando de 100 m a 3 km, acima do solo, e corresponde à parte da troposfera diretamente influenciada pela superfície terrestre. A CLA é ainda subdividida em duas partes, a parte mais alta chamada de camada Ekman, e a parte mais baixa chamada de camada superficial atmosférica (ZHANG, 2015).

Acima da troposfera encontra-se a estratosfera. O limite que separa estas duas camadas é chamado de tropopausa. A altura dessa camada pode variar e usualmente encontram-se altitudes mais altas sobre regiões equatoriais e mais baixas em direção aos polos (AHRENS, HENSON, 2015). Acima desta camada, encontra-se a região de mesosfera que varia entre 47 km a 84 km e, por fim, a termosfera, que representa regiões com alturas superiores a 84 km (STULL, 2015).

#### 2.1.4 Camada limite atmosférica

A camada limite atmosférica representa uma das principais camadas de troca de energia da atmosfera (FOKEN, 2008). A CLA pode ser definida como a parte da troposfera diretamente influenciada pela superfície da terra, que responde a uma variação no seu ciclo diário de temperatura, umidade, vento e poluição. Por esses fatores, a CLA é frequentemente influenciada por movimentos turbulentos gerados por forças mecânicas (cisalhamento do vento) e térmicas (aquecimento e resfriamento da superfície). Assim, próximo ao solo, há alta ocorrência de turbulência, enquanto fora dessa região, chamada de atmosfera livre, a turbulência ocorre principalmente em nuvens convectivas e em correntes de jatos. A separação entre essas camadas é representada pela linha pontilhada da Figura 5 denominada inversão térmica (STULL, 2015).

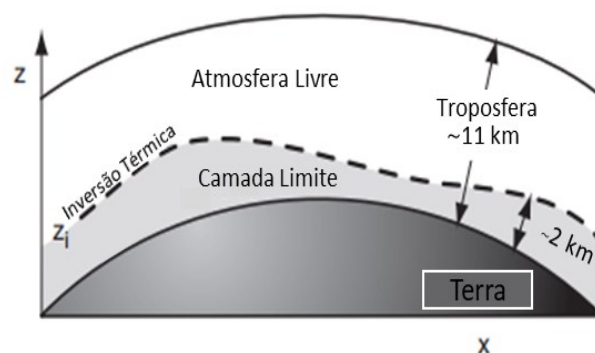


Figura 5 – Camada limite atmosférica. Adaptado de (STULL, R., 2015).

A camada limite atmosférica encontra-se entre 0,1 a 3 km da troposfera, onde a localização geográfica, topografia e clima local influenciam essa faixa de alturas, com variações significativas na escala de tempo de algumas horas à cerca de 1 dia (STULL, R., 2015; ARYA,

S., 2001). O conceito de camada limite foi originalmente proposto por Prandtl, no final do século XIX e seus processos físicos vêm sendo estudados desde então (STANGROOM, P., 2004).

Acima do oceano, a camada limite varia lentamente no espaço e no tempo. Além da grande mistura que ocorre no oceano, por ser um meio fluido, a água também apresenta uma grande capacidade de absorver o calor mudando minimamente sua temperatura (EMEIS, 2013).

Considerando-se condições atmosféricas tipicamente associadas a céu claro e sem perturbação por sistemas sinóticos (como frente de brisas) ou de mesoescala (como tempestades), a estrutura vertical da camada limite ao longo do ciclo diário pode ser esquematicamente representado segundo a Figura 6.

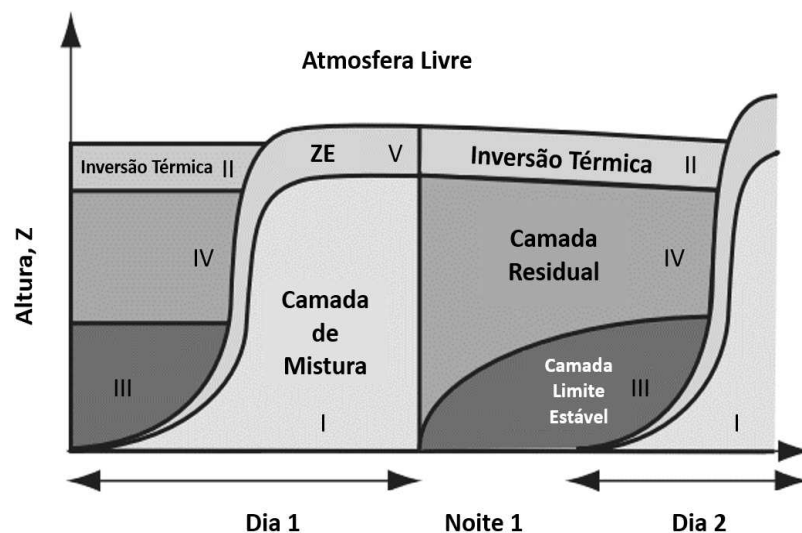


Figura 6 – Comportamento da camada limite atmosférica ao longo do dia sobre a superfície terrestre em dia de bom tempo. (I) Camada de mistura, (II) Inversão térmica, (III) Camada limite estável, (IV) Camada residual e (V) Zona de entranhamento. Adaptado de (WALLACE *et al*, 2006).

Durante o dia há a presença de uma Camada de Mistura (I) estaticamente instável (Figura 6). No período noturno, uma camada limite estaticamente estável (III) se forma abaixo de uma camada residual estaticamente neutra (IV). A camada residual carrega consigo poluentes e a umidade gerada pela camada de mistura anterior e não apresenta grandes turbulências. Na separação da camada de mistura e a atmosfera livre encontra-se a Zona de Entranhamento (V) fortemente estável de turbulência intermitente. Durante a noite a turbulência na zona de entranhamento é finalizada e posteriormente uma camada não turbulenta

é deixada, chamada de inversão térmica (II) estaticamente estável. De forma geral, a evolução diária das regiões de estabilidade estável (II e V), instável (I) e neutras (III, IV e atmosfera livre) são esquematicamente representadas na Figura 6 (STULL, 2015).

## 2.1.5 Regime de ventos relevantes

### 2.1.5.1 Ventos alísios

No contexto do sistema de circulação atmosférica global, um dos mais importantes movimentos realizados pelas massas de ar são os ventos alísios (Figura 7). Os ventos alísios representam um deslocamento de massa de ar quente e úmido que sopram dos trópicos de capricórnio e câncer em direção ao equador e forçam um regime de vento constante e intenso durante todo ano. Os ventos alísios estão presentes em baixas latitudes e representam ventos de leste que sopram em direção ao equador (CAVALCANTI *et al*, 2009).

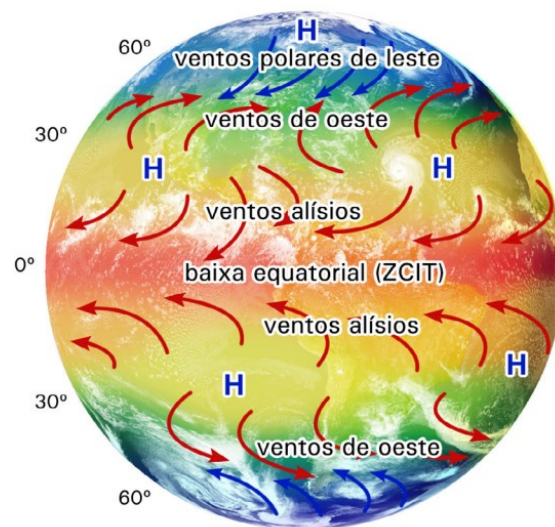


Figura 7 – Representação dos ventos alísios e Zona de Convergência Intertropical. Fonte: (YNOUE *et al.*, 2017).

Próximo ao Equador, os alísios dos hemisférios norte e sul convergem ao longo de um cinturão equatorial chamado de Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (AHRENS *et al*, 2019). Na região da ZCIT o ar é quente e úmido, apresenta baixa pressão, grande movimento ascendente de ar e forte precipitação (STULL, 2015).

Para diferentes altitudes, existem diferentes condições termodinâmicas. Em regiões oceânicas, a capacidade térmica do mar diminui as variações de temperatura diurna e a alta umidade presente no ar absorve a radiação térmica emitida pela terra na faixa do infravermelho, sendo assim a proximidade do oceano um fator regulador (CAVALCANTI *et al.*, 2009).

### 2.1.5.2 Circulação de brisa marítima

Em complemento à circulação global de ventos há, também, na atmosfera, circulações próximas a superfícies influenciadas pelas estruturas geográficas regionais e grandes massas de água que induzem diferenças de pressões locais (STULL, 1988; AHRENS *et al.*, 2017). Esses padrões de ventos são regularmente nomeados de onde são originados, como a brisa marítima e a brisa terrestre, gerados por circulações vindas do mar e da terra, respectivamente (STULL, 2015).

O sistema de vento costeiro é composto, basicamente, por brisas terrestres e marítimas compreendidas como circulações costeiras localizadas (HSU, 1970). A brisa marítima é caracterizada por um vento relativamente mais frio que sopra do mar para o continente, durante o dia, que se manifesta da superfície de uma circulação de mesoescala (STULL, 2015) e se forma como parte de uma circulação ativada termicamente onde a borda de ataque da brisa é chamada de frente de brisa (AHRENS *et al.*, 2017). Normalmente essa manifestação vem acompanhada de um fluxo de retorno que possui orientação da terra para o mar.

A formação da brisa ocorre inicialmente devido ao gradiente de temperatura formado pela diferença de temperatura entre a terra, aquecida pelo sol, e o oceano, que mantém sua temperatura praticamente constante durante todo o dia devido à alta capacidade térmica da água. Essa diferença de temperatura é responsável pela criação de um gradiente horizontal de pressão onde há, em altos níveis ( $> 1$  km), uma pressão maior sobre a terra e uma pressão menor sobre o mar (Figura 8). Este gradiente de pressão forma ventos do continente para o oceano em altos níveis. Este movimento reduz a pressão da coluna atmosférica sobre a terra, em superfície. De forma adicional, a pressão próxima à superfície da água aumenta em razão da transferência de moléculas de ar vindas do continente para o oceano. Devido a esses movimentos atmosféricos, a formação de um gradiente de pressão próximo à superfície, impulsiona um vento marítimo em direção ao continente conhecido como brisa marítima (STULL, 2015).

No período noturno, devido à perda de calor mais acelerada do continente em relação ao oceano, o ar próximo à superfície terrestre torna-se mais frio do que o ar sobre o oceano.



Essa diferença de temperatura auxilia a formação de um centro de baixa pressão próximo à plataforma continental e um centro de alta pressão acima da mesma plataforma. E o contrário também é verdadeiro. Acima da superfície do mar é formado um centro de baixa pressão e no alto é produzido um centro de alta pressão. Considerando o centro de alta pressão localizado acima do continente, de forma inversa à brisa marítima, o vento inverte sua direção e sopra da superfície da terra para o mar, caracterizando assim a brisa terrestre (AHRENS *et al.*, 2017). Assim, essa circulação é responsável pela mudança de direção do vento observado durante o dia e durante à noite. A Figura 8 apresenta uma imagem esquemática da formação e desenvolvimento da circulação de brisa.

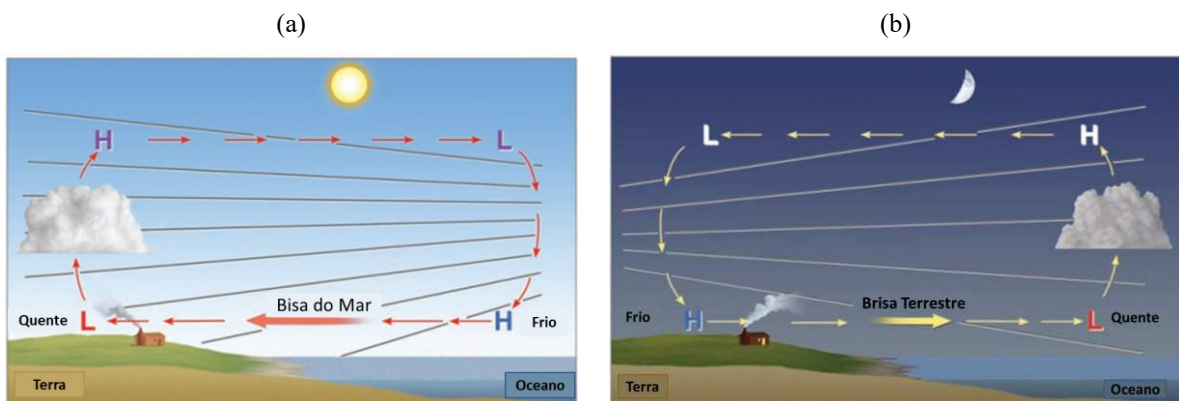


Figura 8 – Circulação de brisa (a) marítima (b) terrestre. Adaptado de (AHRENS *et al.*, 2017).

O sistema de brisa marítima (SBS, sigla do inglês *Sea Breeze System*) representa um fenômeno que ocorre em várias escalas espaciais. A Figura 9 apresenta uma visão esquemática de todos os seus componentes definida por MILLER. *et al* (2003).

Como já discutido, a circulação de brisa ocorre devido ao gradiente térmico entre terra e mar. A diferença de temperatura entre esses dois sistemas cria uma força gradiente de pressão (FGP) que circula em direção a um sistema de alta pressão para um sistema de baixa pressão.

O sistema de circulação de brisa (SCB) marítima compõe uma componente de fluxo de mesoescala que foi em direção à costa em baixos níveis, e em direção ao oceano em altos níveis. A corrente gravitacional da brisa marítima (CGB) representa o avanço de um ar mais frio e úmido, vindo do mar, que avança em direção a superfície da terra (SAMUEL; MILLER BARRY KEIM; MAO, 2003). A frente de brisa marítima (FBM), representa, em terra, o bordo de ataque tanto da CBG quanto do SCB. Para casos em que a corrente de ar a frente do FBM

estiver úmida o bastante, uma porção de nuvens cumulus (Cu) pode se formar (STULL, 2015). Ainda segundo STULL, (2015) à frente da brisa marítima pode adentrar o continente de 10 a 200 km até o final do dia, sendo mais comum de 20 a 60 km, salvo casos em que barreiras físicas são impostas, como montanhas ou ventos sinóticos opostos. A parte posterior e levemente elevada a FBM é conhecida como cabeça da brisa marítima (CBM). Ela se desenvolve por correntes ascendentes no interior de massas de ar continentais e marinhas (MILLER *et al* 2003). Frequentemente a CBM é marcada pela formação de redemoinhos sobre o ar quente ascendente (STULL, 2015). As ondas de *Kelvin-Helmholtz* (KHBs) são formadas atrás da CBM, através do limite superior do CGB. As KHBs aumentam o arrasto turbulento na brisa e ocorrem em intervalos de baixa estabilidade estática, próximo às 12 h. A camada limite convectiva interna (CLCI) representa uma extensão de instabilidade dentro da massa de ar que vem do mar. Ela se inicia em seu contato com a costa e se desenvolve à medida que se aprofunda no continente (MILLER *et al* 2003).

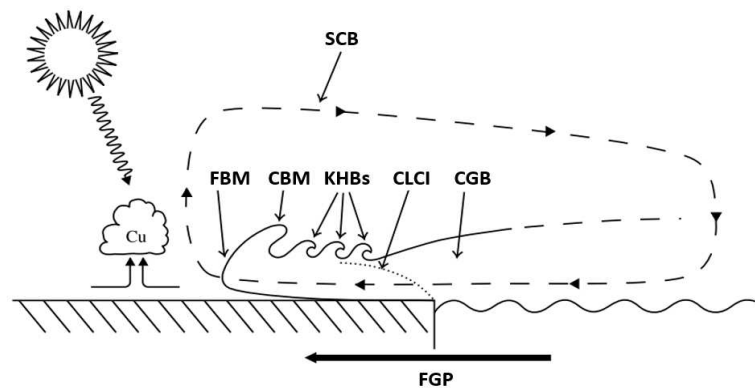


Figura 9 – Componentes da circulação de brisa - Sistema de Circulação de Brisa (SCB), Frente de Brisa Marítima (FBM), Cabeça da Brisa Marítima, (CBM), ondas de *Kelvin-Helmholtz* (KHBs), Camada Limite Convectiva Interna (CLCI) e Corrente Gravitacional da Brisa Marítima (CGB). Adaptado de (MILLER *et al.*, 2003).

O sistema de SCB é basicamente dividido em quatro categorias classificadas conforme a orientação do gradiente de velocidade do ar em relação à linha da costa: pura, *corkscrew*, *backdoor* e *synoptic*. A brisa pura representa uma forçante de vento geostrófico ou de grande escala que aponta em um ângulo de 90° com a linha da costa. A direção do vento predominante é um fator decisivo na identificação das brisas do tipo *corkscrew* e *backdoor* (dependentes do parâmetro de *Coriolis*). Para o caso de haver um vento de grande escala (ou geostrófico)

paralelo à linha da costa a divergência superficial criada na costa, devido à diferença de rugosidade entre terra e mar e a força de *Coriolis*, fortalece a brisa marítima formando uma hélice alongada. Essa circulação recebe o nome de brisa marítima do tipo corkscrew. No caso contrário onde há convergência entre os vetores de velocidade na plataforma oceânica e continental, devido também à diferença de rugosidade entre terra e mar, direção do vento predominante e força de *Coriolis*, a brisa é enfraquecida e denominada brisa marítima do tipo *backdoor* (MILLER *et al.*, 2003). Os tipos de brisa são influenciados pela localização geográfica, visto que o parâmetro de *Coriolis* influencia um giro no vento conforme o hemisfério, ou seja, o vento tende a girar para esquerda no hemisfério sul e à direita no hemisfério norte.

### 2.1.6 Meteorologia Costeira

A meteorologia costeira representa uma parte da meteorologia que aborda de forma integrativa os fenômenos atmosféricos em regiões costeiras. Essa integração inclui a interferência da atmosfera nas águas litorâneas e a influência da inter-relação entre continente e oceano (HSU, 1970). A meteorologia costeira representa o estudo de fenômenos atmosféricos na faixa de 100 km entre o continente e o oceano. O avanço no desenvolvimento de novas tecnologias integrativas entre sistemas de medições e modelos numéricos permitem compreender de maneira mais eficiente o desenvolvimento de fenômenos atmosféricos importantes nessas regiões (ROTUNNO *et al.*, 1992).

A Figura 10 demonstra, em escalas espaciais e temporais, alguns eventos meteorológicos em regiões costeiras. Além disso, a figura também apresenta uma escala representativa do tamanho médio de parques eólicos *offshore* e sua distância da costa. É interessante observar que efeitos costeiros afetam diretamente parques eólicos *offshore* influenciando instantaneamente ou no decorrer de anos. Outro aspecto curioso é a sobreposição de processos meteorológicos em regiões costeiras. Esses fatores justificam o quão desafiador é entender todos os processos nessas regiões, uma vez que podem ocorrer simultaneamente (SCHULZ-STELLENFLETH *et al.*, 2022). A brisa marítima estende-se ao longo de muitas escalas espaciais percorrendo desde a micro escala até a mesoescala, variando de poucos metros (< 1 m) até vários quilômetros (> 100 km), no transcorrer do ciclo diário. Devido à sua importância para a caracterização do vento costeiro, esse fenômeno será discutido nessa dissertação.

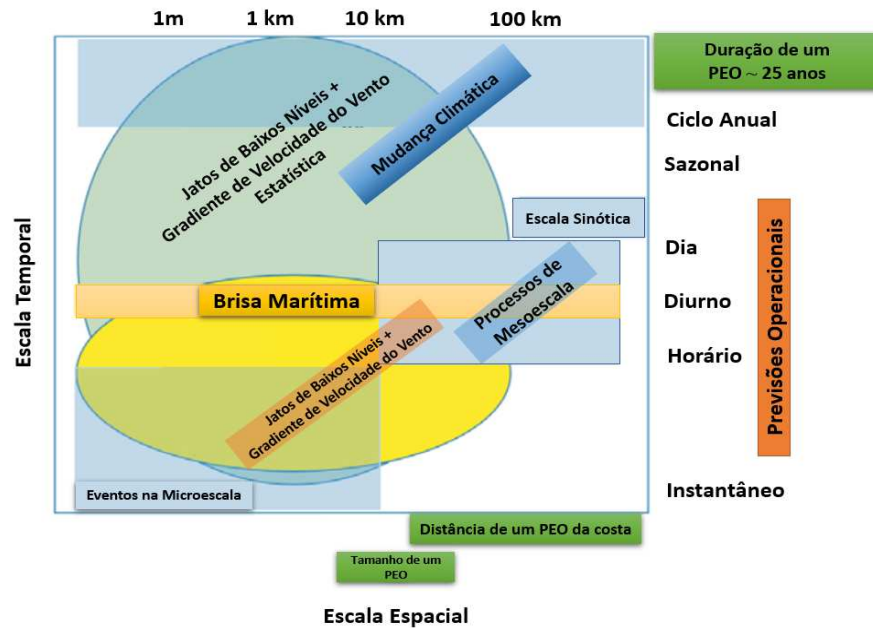


Figura 10: Processos costeiros em escalas temporal e espacial que se relacionam com parques eólicos *offshore*. Adaptado de (SCHULZ-STELLENFLETH *et al.*, 2022).

## 2.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM O MODELO WRF

O WRF tem sido amplamente usado em previsão numérica do tempo (NWP, do inglês *Numerical Weather Prediction*) e também em simulações atmosféricas para fins de pesquisa e aplicações operacionais (SKAMAROCK *et al.*, 2008). Esse modelo representa um esforço conjunto entre diversos centros de operações e pesquisa que o desenvolveram com intuito de torná-lo de acesso público, facilmente aplicados em pesquisas, operações e ensino.

O modelo apresenta inúmeras aplicações, incluindo pesquisa climática regional, previsão da qualidade do ar, modelagem numérica direcionada para o entendimento de fenômenos atmosféricos (BUSSINI *et al.*, 2022), previsão do tempo dentro da mesoescala (PEDRUZZI *et al.*, 2022; FERREIRA *et al.*, 2008), incluindo, também, aplicações de pesquisa em energia eólica (RADÜNZ, 2022; GOIT *et al.*, 2020; SANTOS *et al.*, 2020; GIANNAKOPOULOU *et al.*, 2014).

O WRF possui dois núcleos dinâmicos: o ARW (*The Advanced Research*) e o NMM (*Nonhydrostatic Meso-scale Model*), sendo o primeiro utilizado nesse estudo. O tipo de núcleo dinâmico refere-se à maneira como um modelo resolve numericamente as equações que o governam, e como é feita a integração no tempo. O núcleo dinâmico WRF-ARW não hidrostático é baseado nas equações de Euler (COIFFIER, 2011), ou seja, nas equações de

conservação da massa, quantidade de movimento, energia e umidade do ar. O modelo resolve as equações acima citadas utilizando uma gama de parametrizações que dependem de escalas. (SCHULZ-STELLENFLETH *et al.*, 2022).

As equações para WRF-ARW são desenvolvidas aplicando uma coordenada vertical de pressão hidrostática que acompanha as características do terreno  $\eta$  (Figura 11). Sendo  $P_h$  a componente hidrostática da pressão em cada nível vertical,  $P_{hs}$  a pressão na superfície e  $P_{ht}$  a pressão em altos níveis. A variação de  $\eta$  se restringe de 0 a 1. Sendo 1 próximo à superfície e 0 o topo da atmosfera (SKAMAROCK *et al.*, 2008).

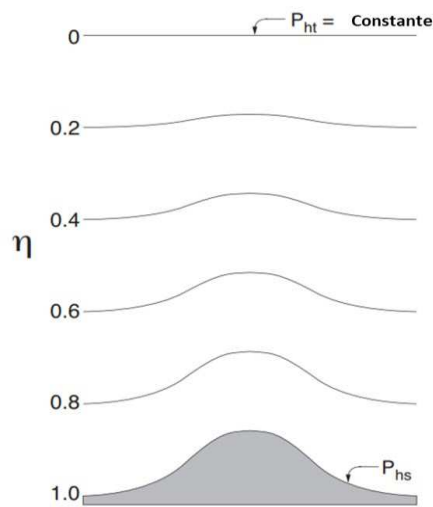


Figura 11: Coordenada vertical ( $\eta$ ) baseada nos níveis de pressão hidrostática normalizada ( $P_h$ ) seguindo a curvatura da topografia. Adaptado de (SKAMAROCK *et al.*, 2008).

As equações diferenciais parciais que regem o comportamento atmosférico, não são resolvidas por métodos analíticos. Sua solução depende de esquemas numéricos onde os dados são representados por inúmeras células dispostas em uma grade discreta. Esse processo é conhecido como discretização, onde as equações do modelo são resolvidas nessas células de grupos discretizados (KALNAY, 2003). O WRF utiliza uma grade escalonada do tipo Arakawa-C (Figura 12) onde as componentes das velocidades horizontais e verticais ( $U$  e  $V$ ) são posicionadas perpendicularmente às faces de cada grade e as variáveis termodinâmicas ( $\theta$ ) são posicionadas no centro da grade de cada célula (SKAMAROCK; CO-AUTHORS, 2008).

Para inicializar o modelo, são necessários dados de entrada de um Modelo de Circulação Global (MCG), que simula todo o globo terrestre e, posteriormente, utiliza-se tais

informações como condições iniciais e de contorno no WRF (SANZ RODRIGO; CHURCHFIELD; KOSOVIC, 2017). Essas informações de entrada de MCG podem ser determinadas com base em dados de análise ou reanálise. Modelos de mesoescala como o WRF proporcionam uma extensa caracterização da atmosfera, geralmente aplicadas com resoluções de vários quilômetros. Assim, grandes domínios permitem a avaliação das características do vento relacionando a região de interesse com seu entorno. Para isso, o WRF permite que o usuário defina o número de subdivisões do domínio de simulação. O domínio aninhado é executado em conjunto com o ‘domínio mãe’, portanto, suas configurações de limites são fornecidas pelo domínio mais externo, para cada passo de tempo (WANG *et al*, 2007). Cada região aninhada recebe o nome de ‘grades filhas’.

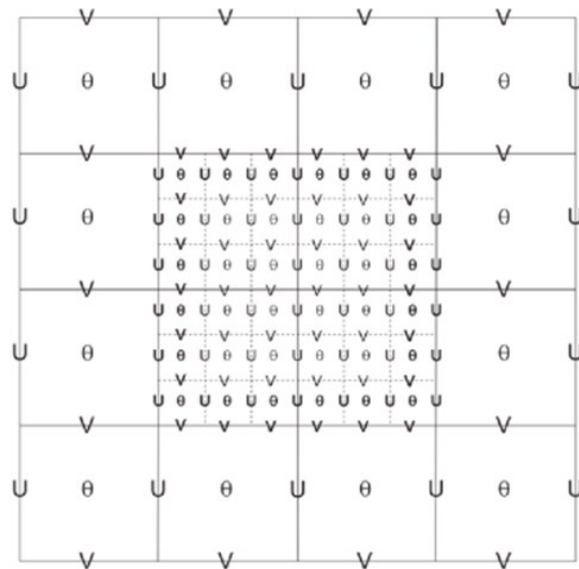


Figura 12: Ilustração conceitual da malha computacional do modelo WRF-ARW em malha desencontrada do tipo Arakawa-C na direção horizontal. O domínio “mãe”, mais externo, é seguido de um domínio “filha” aninhada em razão de aspecto 3:1. A malha avalia a componente ( $V$ ) da velocidade no eixo  $y$  nas faces norte e sul de cada elemento, enquanto avalia a componente ( $U$ ) da velocidade no eixo  $x$  nas faces leste e oeste de cada célula. As variáveis termodinâmicas são analisadas no centro de cada célula (ex: temperatura potencial ( $\theta$ )) (SKAMAROCK *et al*, 2008).

O aninhamento (Figura 13) é o processo no qual se incorpora domínios dentro do domínio mãe com o objetivo de produzir soluções de modelos em resoluções mais altas.

Entretanto, quanto mais domínios, menor a resolução e maior esforço computacional empregado para desenvolver as simulações.

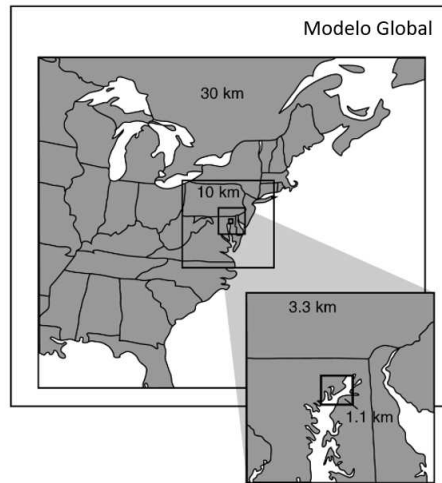


Figura 13: Ilustração de quatro domínios aninhados com resoluções horizontais de 30, 10, 3.3 e 1.1 km a partir de um domínio global. Fonte: Adaptado de (WARNER, 2011).

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo revisa a literatura científica sobre medições de LiDAR, aplicações de modelos numéricos de mesoescala e avaliação do recurso eólico costeiro e *offshore*. Os conhecimentos aqui apresentados revelam os principais desafios e lacunas de pesquisa pertinentes a esse trabalho.

#### 3.1 ESTUDOS COM PERFILADORES DE VENTO LIDAR

Dispositivos de sensoriamento remoto vêm ganhando destaque em campanhas de medições, pois medem a direção (SHU; LI; HE; CHAN, 2016) e a velocidade do vento em pontos afastados dos sistemas de medições (SCHULZ-STELLENFLETH *et al.*, 2022). Alguns estudos incluem suporte tecnológico com medições por meio de instrumentos de sensoriamento remoto através da radiação eletromagnética na banda de comprimento de onda visível, (LiDAR) (HASAGER *et al.*, 2008). A técnica adotada ao LiDAR apresenta um grande potencial para avaliação do recurso eólico, oferecendo uma alternativa ou complemento aos métodos convencionais de obtenção de dados como, por exemplo, mastros meteorológicos (SLINGER *et al.*, 2012).

A elaboração de estudos específicos envolvendo jatos de baixos níveis e medições de velocidade de vento utilizando dados de LiDAR foi publicado por Kalverla *et al.* (2019). Dados de 10 anos de reanálise do ERA5 foram combinados e validados com observações de LiDAR e torre, instalados em plataformas *offshore*, para encontrar características que descreviam o fenômeno de jato de baixo nível no Mar do Norte Holandês. Ainda na mesma temática, HALLGREN *et al.* (2020) comparou quatro diferentes modelos de reanálise (MERRA2, ERA5, UERRA, NEWA) com observações de LiDAR para analisar as características do vento em quatro diferentes sites no Mar Báltico de modo a obter informações sobre a precisão de dados de reanálise na avaliação do recurso eólico na região.

A avaliação da confiabilidade de medição do dispositivo LiDAR foi realizada para avaliação do recurso eólico considerando três regiões com diferentes características topográficas na Ilha de Jeju, na Coreia. A região de Gangjeong está localizada no litoral (topografia sem obstáculos), e as regiões de Sumang e Susan apresentam característica de terrenos complexos (montanhas e florestas). A campanha de medição durou 14 dias para Sumang e Susan e 11 dias para Gangjeong, ambas realizadas durante o inverno. As



comparações foram realizadas com mastros meteorológicos e, para os locais analisados, as taxas de erro do LiDAR variaram aproximadamente entre 2% e 6% (KIM, D; KIM, T; OH; HUH; KO, 2016). Peña *et al.* (2009), avaliaram a velocidade média do vento utilizando observações do ZephIR LiDAR e compararam aos dados de medições em três mastros meteorológicos instalados em um parque eólico *offshore* no Mar do Norte, na costa oeste da Dinamarca. A campanha de medição durou seis meses, onde o LiDAR apresentou resultados satisfatórios na compreensão dos ventos locais em alturas de até 160 m.

### 3.2 ESTUDOS SOBRE PREVISÃO DO VENTO COM MODELOS DE MESOESCALA

Nos últimos anos, novas técnicas de medição in-situ e de sensoriamento remoto foram desenvolvidas para observar fenômenos atmosféricos em regiões costeiras. Em complemento, modelos numéricos foram otimizados e estão disponíveis para resolver importantes eventos decorrentes ao longo da costa e auxiliam na compreensão de fenômenos meteorológicos, incluindo brisas marítimas e terrestres e efeitos de topografia (ROTUNNO *et al.*, 1992).

O atlas eólico NEWA (*New European Wind Atlas*) (WITHA *et al.*, 2019) apresenta um conjunto de dados eólicos de caráter multiescala que englobam todos os países da União Europeia, além de Suíça, Noruega, Península Balcânica e Turquia. O desenvolvimento desse Atlas se deu por simulações de mesoescala, utilizando o modelo WRF, e simulações de microescala, aplicando o modelo WAsP. O tempo total de simulação para o desenvolvimento do atlas foi de 30 anos. Para validação e configuração do modelo escolhido, foram utilizados dados coletados de 291 mastros meteorológicos espalhados ao longo de todo território de interesse. Através de métricas estatísticas concluiu-se que, de forma geral, o WRF apresentou um desempenho satisfatório quando comparado com reanálise do ERA5 e WAsP (HAHMANN *et al.*, 2020).

Em regiões costeiras, devido à transição entre terra e mar, a resolução de grade dos modelos de previsão desempenha uma tarefa crucial na simulação dos padrões de vento. Essa questão foi objeto de estudo de Cambazoglu *et al.* (2016) onde se avaliou no litoral da Turquia, *Straits System* e na Baía de *Chesapeake* qual a melhora na compreensão da direção e magnitude da velocidade do vento quando aplicadas diferentes resoluções de grade espacial e temporal. Os campos atmosféricos foram estudados variando as resoluções de grade em 27, 9, 3 e 1 km e utilizando o software COAMPS (*Coupled Ocean Atmosphere Mesoscale Prediction System*).

Concluiu-se que apesar do modelo apresentar melhor desempenho para a resolução de 3 km do que a de 1 km, há uma correlação direta entre o aumento da resolução espacial e previsões de vento mais precisas.

Uma avaliação criteriosa sobre a brisa marítima apresenta um ponto importante na discussão sobre avaliação do recurso eólico *offshore*. Como medições em locais *offshore* ainda são muito escassas, estudos sobre brisa marítima são constantemente sujeitos a simulações numéricas. Assim, um estudo realizado por Steele *et al.* (2015) aplicou simulações com o WRF, abrangendo um período de onze anos, para desenvolver um método automatizado para identificar diferentes tipos de brisa marítimas.

Em termos de litoral brasileiro, dois municípios do nordeste brasileiro foram estudados com objetivo de quantificar o recurso eólico dessas regiões: a cidade de Paracatu que está localizada na região costeira do Ceará e a cidade de Triunfo que pertence ao estado de Pernambuco e representa uma região de terreno complexo. Dados simulados com o modelo WRF foram comparados a medições de torre anemométrica. Para estimar o recurso eólico em microescala foi aplicado o modelo WAsP. Assim, o potencial eólico anual e a densidade de energia foram estimados pelo modelo WAsP, utilizando dados de entrada simulados pelo WRF. As velocidades do vento foram subestimadas pelo modelo, entretanto, ambas as localidades apresentaram um potencial eólico significativo para o período simulado (SANTOS *et al.*, 2016).

A sensibilidade do modelo WRF às parametrizações físicas, estão relacionadas à resolução espacial do modelo, à morfologia do terreno, à área de estudo, e também à estação do ano (ALLAMILLOS; VÁSQUEZ; ARIAS; FANEGO; PESCADOR, 2013). Estudos dessa natureza são amplamente discutidos em toda esfera eólica, mas destacam-se no setor eólico *offshore*, onde os dados dos ventos são limitados a poucas medições, isso devido aos custos envolvidos na instalação de mastros *offshore* e no desenvolvimento de novas tecnologias. Além disso, regiões costeiras apresentam um desafio adicional, uma vez que a modelagem próxima à superfície sofre influência significativa dos fluxos atmosféricos e da topografia local (CARVALHO; ROCHA; GÓMEZ-GESTEIRA; SILVA SANTOS, 2014).

No Brasil, quatro diferentes parametrizações de camada limite, com diferentes resoluções para os níveis verticais, foram analisadas visando avaliar o desempenho do modelo WRF na caracterização de ventos costeiros. O local de estudo contempla a Usina Eólica de Pedra do Sal, no litoral do PI, que sofre grande influência de ventos com características *offshore*. Nesse trabalho, as simulações de mesoescala foram validadas com dados de LiDAR e torre anemométrica. Por fim, uma análise da evolução temporal do perfil de velocidade do vento e

cisalhamento revelou que os modelos testados conseguiram prever os padrões locais de vento, no período analisado (GONÇALVES *et al.*, 2022).

Para a região sudeste do Brasil, um estudo realizado por TAVARES *et al.* (2022) contempla a região litorânea do Rio de Janeiro (RJ). Esse estudo avaliou o recurso eólico *offshore* e estimou os custos de projetos eólicos *offshore* através da comparação entre três reanálises atmosféricas (ERA5, CFSv2 e MERRA2) e o modelo WRF. Foram simulados dois domínios espaciais do WRF com 55 níveis verticais e os dados do vento são validados com medição *in situ* a partir de observações instalados em pontos *offshore* e na costa do RJ. Para análise econômica, utilizaram-se as configurações do modelo de turbina IEA-15 MW. A simulação contemplou o período de um ano entre agosto de 2018 a agosto de 2019. Conclui-se que o WRF apresenta um desempenho significativo na caracterização do vento na região, principalmente em regiões próximas à costa (até 60 km do litoral).

### 3.3 RECURSO EÓLICO COSTEIRO E *OFFSHORE*

O desenvolvimento do setor eólico apresenta um aumento significativo do tamanho dos parques eólicos acompanhados de alturas dos cubos de turbinas e diâmetros de rotores mais extensos. Essas características destacam-se quando se trata de parques eólicos *offshore*. O rápido crescimento da energia eólica *offshore* traz consigo desafios em vários âmbitos de pesquisa, sendo um deles a avaliação do recurso eólico costeiro e *offshore*. Existem, basicamente, duas áreas diretamente afetadas pelo vento: estimativa do recurso eólico e cargas nas turbinas (LANDBERG, 2016).

Um estudo realizado por Schulz-Stellenfleth *et al.* (2022) apresentou os principais efeitos costeiros que impactam parques eólicos *offshore*, dentre eles, destacam-se os gradientes de velocidades do vento terrestre e oceânico e a brisa marítima. Além disso, esse trabalho abordou sobre as diferentes ferramentas relevantes para caracterização de efeitos costeiros, dentre elas, o WRF utilizado para avaliar o recurso eólico *offshore* em grande escala. Por fim, o estudo abordou as diferentes técnicas de medição *In-Situ* como torres meteorológicas e de sensoriamento remoto como LiDAR.

Um mapeamento de vento por satélite para avaliação de recurso eólico *offshore* no Brasil foi apresentado por Silva *et al.* (2016) durante os anos de 1989-2009. Esse estudo apresentou a variabilidade dos recursos hídricos e eólicos *offshore* no Brasil, buscando uma complementaridade entre esses dois recursos em épocas de carências hidrológicas. Em busca

de possíveis combinações para recursos hídricos e eólicos, o trabalho apresentou um estudo sobre a climatologia nas regiões norte e nordeste que são influenciadas principalmente por dois sistemas climáticos, sendo eles os ventos alísios em grande escala e as brisas marítimas na escala local. Para isso, dados mensais de precipitação foram comparados com ventos medidos por satélite para analisar sua variabilidade espacial em escala de tempo sazonais e interanuais.

Com intuito de estender o mapeamento de vento por satélite realizado por SILVA *et al.*, (2016), PIMENTA *et al.* (2019) desenvolveu um estudo onde incluiu os efeitos de estabilidade atmosférica na extrapolação vertical do vento. Segundo esse estudo, que estimaram dados históricos entre os anos de 1987 a 2014, a região do PI apresenta uma das regiões mais ventosas do litoral brasileiro, apresentando cerca de 5,5 MW de potência no mês de outubro (fator de capacidade de 48%).

### 3.4 RESUMO DA REVISÃO

Devido à crescente demanda por energia de fontes renováveis, o planejamento e construção de parques eólicos *offshore* já é uma realidade no Brasil e no mundo. Os últimos anos foram marcados por um grande progresso na estimativa do potencial eólico costeiro e *offshore* em todo o globo através da utilização de modelos numéricos validados, principalmente, por torres anemométricas continentais. Embora esse dispositivo forneça dados locais de parâmetros importantes para a caracterização do vento como velocidade e direção, sua capacidade de cobertura espacial não supera técnicas de sensoriamento remoto terrestre ou espacial. Assim, os satélites são amplamente utilizados para fornecer dados sobre o vento e contribuem para a melhoria dos modelos numéricos devido à capacidade de cobertura global (acesso a regiões remotas e de difícil acesso) e perspectiva de observações de longo prazo (JACOBSEN, *et al.*, 2015; SCHNEEMANN, 2015). Por outro lado, regiões costeiras apresentam uma complexa topografia em razão da heterogeneidade superficial terrestre/marítima. Como consequência a esse fenômeno, são necessários dados de alta resolução espacial, e os dados de satélites podem sofrer interferências ruidosas devido à essa transição (terra/mar) (SALVAÇÃO; SOARES, 2016). Devido a isso e aos avanços tecnológicos no setor, a revisão da literatura revela um aumento significativo de estudos envolvendo experimentos em campo com dispositivos do tipo LiDARs, o qual pode ser usado para adquirir dados de ventos na microescala, contemplando efeitos locais como brisa marítima e jatos de baixos níveis.

Apesar de a indústria eólica experimentar um crescimento considerável nas técnicas de medição e previsão do vento nos últimos anos, ainda existem grandes desafios que instigam a busca por métodos mais aprimorados da estimativa de recursos eólicos. Especialmente no Brasil, existe uma lacuna de pesquisa ao incluir dados de observações de LiDAR para validar modelos de mesoescala capazes de descrever um completo regime e variabilidade do vento em regiões costeiras. Assim, essa dissertação engloba o uso de um conjunto de medições realizadas por um perfilador LiDAR para validar modelos de simulação multiescala do modelo WRF, com resolução espacial variando de 9 km a 333 m. A resolução de 3 km é utilizada para validar as parametrizações testadas, enquanto a resolução espacial próxima a 333 m é aplicada para avaliar como os efeitos da topografia local influenciam a caracterização dos ventos da região de Pedra do Sal. Dessa forma, justifica-se a trajetória metodológica escolhida para o problema de pesquisa aqui abordado.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 DESCRIÇÃO DA USINA EÓLICA

O Parque eólico de Pedra do Sal, ou Usina Eólica de Pedra do Sal, doravante UEPS, está localizado na região litorânea da cidade de Parnaíba, no estado do Piauí. O complexo eólico está localizado a uma distância aproximada de 400 m da costa com o oceano Atlântico e possui elevação média de 3 m acima do nível do mar. A UEPS é equipada com vinte aerogeradores do modelo Wobben Enercon E-48, com rotores de 44 m de diâmetro, 55 m de altura de rotor/eixo e potência nominal de 0,9 MW. A capacidade instalada total do parque é de 18 MW. Os aerogeradores foram instalados em uma faixa de 3,5 km paralelamente à linha da costa e orientada ortogonalmente à direção do vento predominante.

A uma distância de 80 km da UEPS encontra-se a cadeia de montanhas da Serra da Ibiapaba (Figura 14). A presença dessa cadeia de montanhas interfere significativamente no vento de direção sudeste em Parnaíba, conforme será discutido em detalhe na seção 5.4.3.

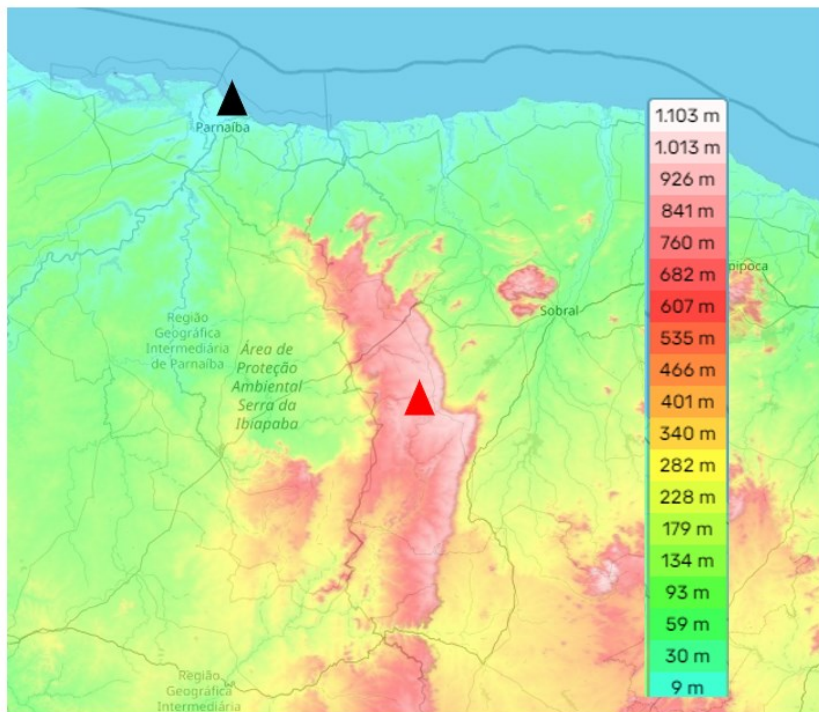


Figura 14: Mapa topográfico da região nordeste brasileira e localização da Usina Eólica de Pedra do Sal (triângulo preto) e da Serra da Ibiapaba (triângulo vermelho). Fonte: <https://pt-br.topographic-map.com/map-mq5gt/Piau%C3%AD/?center=-3.9081%2C-41.19873&zoom=8&popup=-3.40924%2C-37.69684>.

Devido à proximidade da linha do Equador, a UEPS é caracterizada por ventos que sofrem influência dos alísios de grande escala e da interface com o oceano. Especificamente na região nordeste brasileira, onde os ventos alísios são fortes e constantes durante todo ano, a brisa marítima promove um giro diário na direção do vento (ALCÂNTARA *et al.*, 2008).

Na grande escala, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) representa um importante sistema atmosférico global que influencia diretamente as regiões norte e nordeste do Brasil. Durante o outono, devido à proximidade da ZCIT com o nordeste brasileiro, o vento é mais fraco. Em contrapartida, durante a primavera, quando a ZCIT está mais afastada da costa nordeste do Brasil, os ventos são mais fortes (HASS *et al.*, 2013). A rosa de direção dos ventos mostrada na Figura 15 apresenta variações entre 60° e 115°, referentes a um ano de medição. Assim, os ventos na região ocorrem predominantemente das direções nordeste à sudeste.

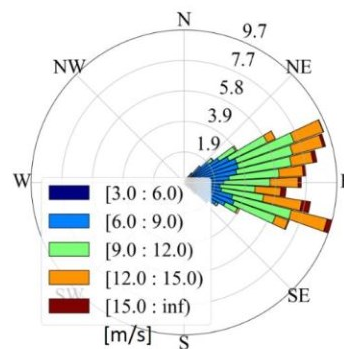


Figura 15 – Rosa dos ventos do LiDAR medido à 100 m de altura. Período de medição: junho de 2013 a setembro de 2014.

Devido à pouca variação entre as direções do vento entre nordeste e sudeste, onde as condições de ventos locais possuem influência significativa dos ventos alísios e da brisa marítima, (SAKAGAMI *et al.*, 2013; LIRA *et al.*, 2017) é possível constatar que o vento flui com frequência do oceano para o continente (SAKAGAMI *et al.*, 2015).

## 4.2 INSTRUMENTAÇÃO

### 4.2.1 Torre anemométrica

Para este estudo foram utilizados dados de observações do período entre agosto de 2013 a julho de 2014. A instrumentação utilizada abrange a utilização de uma torre

anemométrica ( $2^{\circ}49'22.50''S$ ,  $41^{\circ}42'50.20''W$ ) de 100 m de altura (Figura 16). A torre foi equipada com os seguintes instrumentos: anemômetro sônico 3D, quatro anemômetros de copo, dois *Wind Vane*, dois termo-higrômetros, barômetro, GPS e modem GMS. O anemômetro sônico 3D, modelo 81000 da *RM Young*, foi instalado a 100 m da torre anemométrica e mediu as três componentes de velocidade  $U$ ,  $V$ ,  $W$ , e a temperatura sônica.

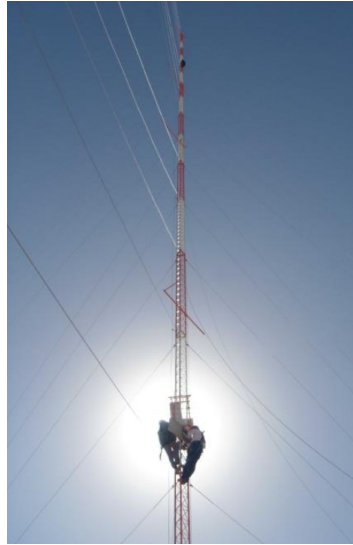


Figura 16: Torre anemométrica instalada na UEPS. Fonte: (COIMBRA, 2018).

Os sensores da torre anemométrica, variáveis medidas e alturas de medição, utilizados no desenvolvimento dessa dissertação estão especificados na Tabela 2.

Tabela 2: Equipamentos instalados a torre anemométrica na UEPS utilizados nessa dissertação. Componentes de velocidade  $U$ ,  $V$  e  $W$ ,  $WS$  (magnitude de velocidade),  $WD$  (*Wind Vane*) e  $T$  (temperatura).

Sensores	Medição	Altura de Medição [m]
Anemômetro Sônico 3D	Componentes de velocidade $U$ , $V$ e $W$	100
Anemômetro de Copo	$WS$	98
Wind Vane	$WD$	96
Termo higrômetro	$T$	98



## 4.2.2 Perfilador LIDAR

Um perfilador de vento LiDAR ( $2^{\circ} 82' 34.57''S$ ,  $41^{\circ} 71' 36.38''W$ ) foi instalado na UEPS a 150 m a barlavento do conjunto de turbinas na direção do vento predominante médio. A torre e o LiDAR estão localizados a 300 m da costa e a 565 m de distância entre si. O LiDAR mede as componentes de velocidade do vento (vertical e horizontal) por um pulso de laser enviado para a atmosfera. A luz retro espalhada por partículas no ar, como poeira e gotículas de água, é capturada, lida por um sinal eletrônico e encaminhada para um computador (PAULIAC, 2009). O cálculo para a velocidade e direção do vento, a partir da medida radial das componentes do vento, foi realizado pela técnica VAD (*Velocity Azimuth Display*, do inglês).

O LiDAR (Figura 17) é do tipo Doppler, modelo Windcube8 e mede velocidade e direção do vento em 26 níveis verticais ajustáveis, entre as alturas de 40 m a 500 m. Os 26 níveis são: 40, 45, 50, 60 m, e a cada 20 m variando de 80 m a 500 m. O perfilador de vento LiDAR ficou em operação na UEPS no período entre junho de 2013 a setembro de 2014.



Figura 17 – Perfilador LiDAR instalado na Usina Eólica de Pedra do Sal. Fonte: (SAKAGAMI, 2017).

## 4.3 CONFIGURAÇÃO DO MODELO WRF

### 4.3.1 Estudo de sensibilidade

Para as simulações utilizou-se o modelo de previsão do tempo WRF versão 3.8.1 (SKAMAROCK *et al*, 2008). O modelo numérico atmosférico WRF contém uma biblioteca que permite aplicações em previsão numérica do tempo e investigações de fenômenos

atmosféricos de mesoescala (CARVALHO, 2009). Para suprir as condições iniciais e de contorno ao modelo, foram utilizados dados globais de reanálise do programa ERA5 (HERSBACH *et al.*, 2020). As simulações de mesoescala foram realizadas em um cluster computacional da Universidade da República do Uruguai (UDELAR), onde para o estudo de sensibilidade, apenas dois domínios aninhados com resoluções horizontais variando de 9 km (D1) e 3 km (D2) serão utilizados. O primeiro domínio cobre uma porção significativa da região nordeste, região costeira de Pedra do Sal e oceano Atlântico, uma vez que o parque eólico apresenta predominância de ventos *offshore*, Figura 18.



Figura 18 – Localização do Parque Eólico de Pedra do Sal e domínios da grade computacional D1 (externo) e D2 (interno) aninhados do modelo de mesoescala.

Dados da torre anemométrica e LiDAR foram aplicados para validar os experimentos numéricos simulados pelo WRF. Para a validação, foi selecionada a semana entre os dias 15 a 22 de julho de 2014, sendo as 24 primeiras horas descartadas para inicializar de modo apropriado o modelo (*spin-up*). Assim, a validação refere-se ao período de 16 a 22 de julho de 2014. A escolha do mês de julho para validação se deu pela significativa variação da velocidade do vento quando comparado aos demais meses medidos pelo LiDAR. Para a semana escolhida, levou-se em consideração a forte presença de cisalhamento de vento quando comparada as demais semanas do mesmo mês. Por fim, considerando a condição estacionária de vento na região, foi possível encontrar um resultado consistente utilizando apenas uma semana de estudo.

Com o intuito de investigar o desempenho do modelo WRF, quatro diferentes configurações foram testadas, conforme especificado na Tabela 3. Para a camada limite dois esquemas foram avaliados: YSU (SONG-YOU HONG; DUDHIA, 2006) e TKE de nível 2.5 MYNN (NAKANISHI; NINO, 2006). No modelo WRF-ARW, os esquemas de parametrização de camada limite podem ser classificados de acordo com as características às quais abordam sobre o fechamento de turbulência; esquemas local e não local. Ambos são aplicados em modelos numéricos com o intuito de obter uma solução fechada para os termos de turbulência (RAJESWARI *et al.*, 2020). O YSU é um esquema não local de primeira ordem em que os fluxos turbulentos são parametrizados por valores conhecidos em muitos pontos da célula de grade (NJUKI *et al.*, 2022). O MYNN é um esquema de camada limite local que utiliza um fechamento de energia cinética turbulenta (TKE, sigla do inglês *turbulent kinetic energy*) onde os fluxos turbulentos são relacionados a quantidades conhecidas no mesmo ponto de grade (HARIPRASAD *et al.*, 2014; HAN *et al.*, 2022).

As parametrizações da camada limite são divididas basicamente em três aspectos: camada superficial, superfície do solo e camada limite planetária. A camada superficial calcula as velocidades de atrito e os coeficientes de transporte próximos ao solo. Dessa forma, permite-se obter os fluxos de calor e umidade sobre a malha em inúmeras camadas sobre o solo, e da mesma forma viabiliza o cálculo dos fluxos turbulentos em toda coluna vertical atmosférica do modelo (CARVALHO, 2009). Para os casos 01 e 03 foram utilizados 41 níveis verticais e para os casos 02 e 04, 61 níveis verticais. Também utilizaram-se os esquemas de radiação RRTM (ondas longas) (MLAWER *et al.*; 1997) e Dudhia (ondas curtas) (LACIS; HANSEN, 1974; STEPHENS, 1978) e o modelo de superfície terrestre Noah (CHEN, F.; DUDHIA, 2001).

Tabela 3: Parametrizações físicas da camada limite e número de níveis verticais.

	Camada Limite Planetária	Camada superficial	$n_{\eta}$
Caso 01	YSU	Monin – Obukhov similarity	41
Caso 02	YSU	Monin – Obukhov similarity	61
Caso 03	MYNN 2.5	MYNN 2.5	41
Caso 04	MYNN 2.5	MYNN 2.5	61

### 4.3.2 Métricas de erro

Existem na literatura diversas métricas para se avaliar o erro na simulação do vento, porém basicamente duas abordagens são utilizadas: a física e a estatística. A combinação de ambas é utilizada em busca de simulações bem sucedidas (GIEBEL *et al.*, 2011). Embora existam vários critérios na literatura para se comparar um conjunto de dados medidos com os resultados de um modelo, dois dos mais utilizados para o cálculo de medidas de erro são os vieses MAE e *Bias*.

O erro do modelo ( $\theta'_i$ ) é definido como sendo a diferença entre um valor simulado no instante  $i$  ( $\theta_i^p$ ) e um valor observado (medido) no mesmo instante  $i$  ( $\theta_i^{obs}$ ), sendo:

$$\theta'_i = \theta_i^p - \theta_i^{obs} \quad (1)$$

O erro médio, calculado pelo *Bias*, é definido como:

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta'_i \quad (2)$$

Em que  $N$  representa o número absoluto de instantes considerados. O *Bias* calcula o erro sistemático de uma simulação numérica (CARVALHO *et al.*, 2012). Um *Bias* positivo significa que o modelo superestima os dados de medição enquanto um *Bias* negativo o modelo subestima os dados medidos.

O erro médio absoluto MAE (*Mean Absolute Error*, do inglês) é aplicado visando a medir a precisão da simulação numérica. Esse erro é definido como:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\theta'_i| \quad (3)$$

Para ambas as métricas de erro, quanto mais próximo de zero, melhor é a representação do modelo em relação às medições.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo está organizado em cinco seções. A seção 5.1 abrange a validação e o estudo de sensibilidade para verificar as configurações do modelo que melhor representam o vento no complexo eólico de Pedra do Sal. Após selecionar a melhor configuração, a seção 5.2 avalia o recurso eólico costeiro e *offshore* para duas semanas distintas: 15 a 22 de julho de 2014 (inverno) e 15 a 22 de outubro de 2013 (primavera). A seção 5.3 analisa as características de temperatura potencial, componentes  $U$  e  $V$  da velocidade do vento e magnitude de velocidade para ambas as semanas. A seção 5.4 analisa a circulação de brisa marítima para as semanas simuladas, onde é possível compreender a formação e evolução da brisa marítima na UEPS. Finalmente a seção 5.5 discute sobre a variabilidade espaço-temporal do recurso eólico costeiro e *offshore*.

### 5.1 VALIDAÇÃO E ESTUDO DE SENSIBILIDADE

Os resultados aqui apresentados referem-se às simulações realizadas entre o período de 16 a 22 de julho de 2014 e têm como objetivo avaliar o desempenho de quatro diferentes configurações do modelo WRF ao simular ventos na região costeira de Pedra do Sal. As simulações de mesoescala são validadas utilizando observações de torre anemométrica e do perfilador de vento LiDAR. A validação apresentada visa avaliar se as configurações testadas no modelo representam, de forma satisfatória, os padrões de ventos observados pelos sistemas de medições instalados na UEPS.

As Figuras 19 e 20 representam as séries temporais e ciclo diário médio, respectivamente, das observações de torre anemométrica (linha preta) e LiDAR (linha vermelha) em comparação com os quatro casos simulados, considerando o domínio mais interno (D2). As variáveis simuladas pelo modelo WRF foram interpoladas linearmente na direção horizontal coincidindo com as coordenadas do LiDAR. As variáveis são a velocidade do vento ( $WS_{100}$ ), direção do vento ( $DV_{100}$ ), temperatura ( $T_{100}$ ) e velocidade de fricção ( $U^*_{100}$ ), todas a 100 m de altura acima do nível do solo (ANS). Para o ciclo diário, analisaram-se a velocidade do vento ( $WS_{100}$ ) e direção do vento ( $DV_{100}$ ), também à 100 m ANS. De forma complementar, as Tabelas 4 e 5 apresentam o MAE (*Mean Absolute Error*) e o viés (*bias*) para todos os quatro casos, para a torre anemométrica e LiDAR, respectivamente.

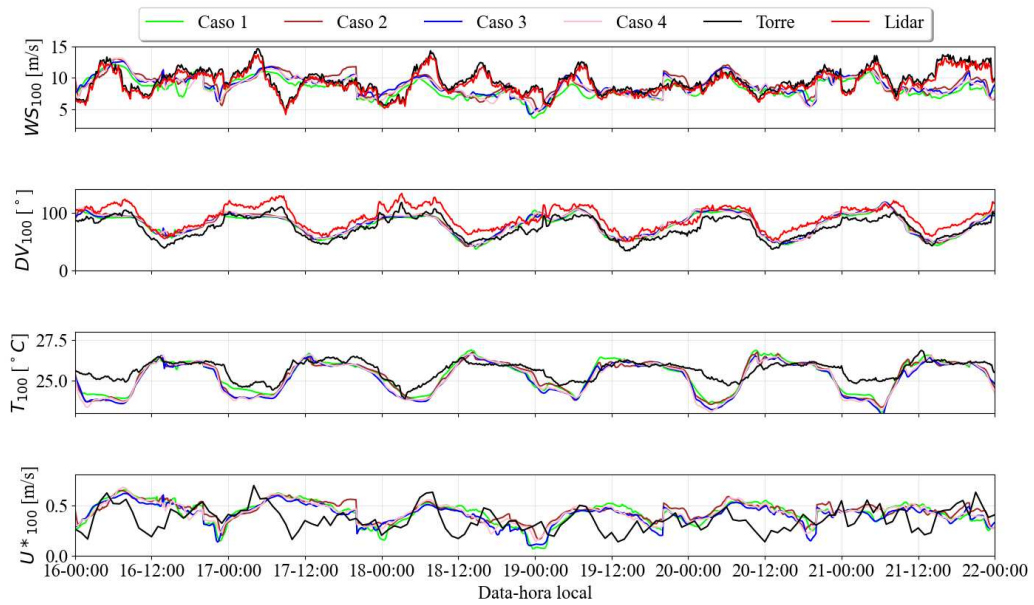


Figura 19 – Série temporal entre as observações de torre (linha preta) e LiDAR (linha vermelha) e simulações da velocidade do vento ( $WS_{100}$ ), direção do vento ( $DV_{100}$ ), temperatura ( $T_{100}$ ) e velocidade de fricção ( $U^*_{100}$ ), para o domínio D2.

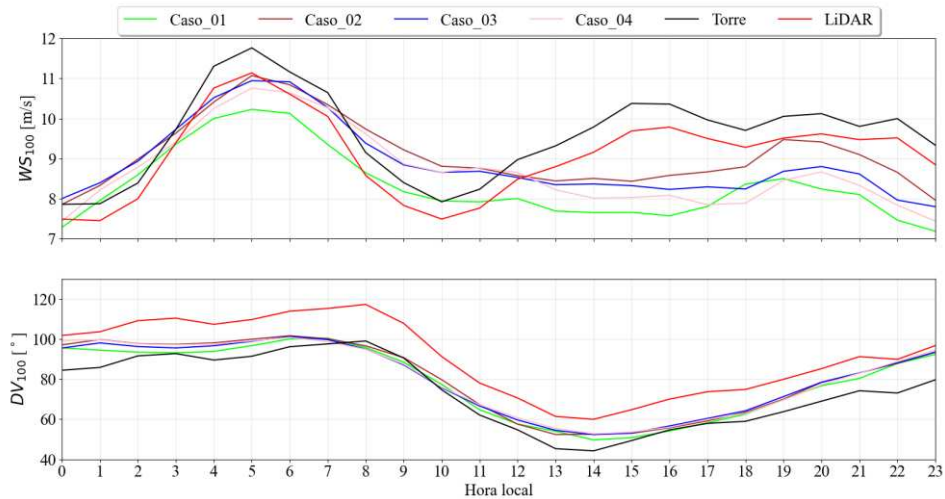


Figura 20 – Ciclo diário médio da velocidade do vento ( $WS_{100}$ ) e direção do vento ( $DV_{100}$ ) para os casos simulados e para as observações de torre e LiDAR, para o domínio D2.

A série temporal para as velocidades do vento simuladas e observadas, estão ilustradas no primeiro gráfico da Figura 19. No geral, observa-se que todas as configurações testadas apresentam dificuldades em representar a velocidade do vento na UEPS, consistentemente subestimando-as, exceto entre 7:30 às 11:30 onde os modelos 02, 03 e 04 superestimam a

velocidade do vento, segundo apresentado pelo ciclo diário médio (Figura 20). Durante a madrugada até o nascer do sol (entre 0 e 8 h) os modelos representam satisfatoriamente as características de velocidade do vento das medições, onde entre 2 e 5 h há um aumento da velocidade, seguindo de uma queda de velocidade entre 5 e 10 h. Além disso, os modelos apresentam máximas velocidades às 5 h, assim como as medições. As mínimas velocidades são registradas às 10 h para as observações e às 23 h para os modelos. Para todos os modelos testados a maior dificuldade está na representação dos ventos após as 13 h, momento em que todos os modelos subestimam a velocidade do vento. As velocidades médias do LiDAR e da torre foram, respectivamente, 9,2 m/s e 9,64 m/s. Dessa forma, observa-se que o modelo configurado pelo caso\_01 apresentou a média da velocidade do vento mais próxima da torre (superestimou em 1,48%) e o caso\_04 apresentou a média de velocidade mais próxima do LiDAR (superestimou em 1%). Em termos de métricas estatísticas o melhor MAE é apresentado pelo caso\_03 (1,77 m/s) e o melhor Bias pelo caso\_02 (0,7 m/s). A configuração do caso\_01 (MAE de 1,86 m/s e Bias de -1,27 m/s) apresentou a combinação menos satisfatória na representação dessa variável. A combinação mais satisfatória entre MAE e Bias é apresentada pelo caso\_02 (MAE de 1,67 m/s e Bias de -0,48 m/s).

Tabela 4: Métricas estatísticas (MAE e Bias) para as simulações de velocidade do vento ( $WS_{100}$ ), direção do vento ( $DV_{100}$ ), temperatura ( $T_{100}$ ) e velocidade de fricção ( $U^*_{100}$ ) comparados aos dados da torre anemométrica.

	$WS_{100}$ [m/s]	Vel. Média [m/s]	$DV$ [°]	$T$ [°C]	$U^*$ [m/s]
Caso 01	1,86/-1,27	9,78	9,06/4,48	0,49/-0,32	0,12/-0,06
Caso 02	1,67/-0,48	10,03	9,64/6,34	0,51/-0,38	0,12/-0,08
Caso 03	1,66/-0,7	10,22	9,47/5,89	0,59/-0,48	0,11/-0,05
Caso 04	1,74/-0,88	9,1	9,57/6,23	0,57/-0,46	0,11/0,07

Tabela 5: Métricas estatísticas (MAE e Bias) para as simulações de velocidade do vento ( $WS_{100}$ ) e direção do vento ( $WD_{100}$ ) comparados aos dados do LiDAR.

	$WS_{100}$ LiDAR [m/s]	$WD_{100}$ LiDAR [°]
Caso 01	1,6/-0,77	13,53/-12,32
Caso 02	1,57/0,2	11,86/-10,46
Caso 03	1,52/-0,2	12,33/-10,92
Caso 04	1,56/-0,38	12,09/-10,58

Observa-se na direção do vento uma semelhança satisfatória para todos os modelos simulados, uma vez que pouca diferença é notada entre os casos (Figura 19). Esse padrão pode ser confirmado ao analisar o ciclo diário da direção do vento (segundo gráfico da Figura 20). O

gradiente de pressão que surge pelas diferenças de temperatura entre terra e mar e que produz a brisa marítima, causa uma mudança na direção do vento no ciclo diário (AHRENS, 2019). Conforme o ciclo diário, o vento sopra de leste ( $100^\circ$ ) às 7 h e de nordeste às 12 h. Esse padrão de mudança na direção do vento verifica-se tanto nas medições como nas simulações. Para análise estatística da direção do vento, a configuração do caso\_01 apresentou a melhor combinação (MAE de  $9,06^\circ$  e *Bias* de  $4,48^\circ$ ). O caso\_03 apresenta o segundo melhor resultado (MAE de  $9,47^\circ$  e *Bias* de  $5,89^\circ$ ), enquanto os casos 02 e 04 apresentaram métricas de erros muito semelhantes com MAE de  $9,64^\circ$  e  $9,57^\circ$  e *Bias* de  $6,34^\circ$  e  $6,23^\circ$ , respectivamente.

De modo geral, observou-se pela série temporal (terceiro gráfico da Figura 19) que a temperatura foi bem representada nas simulações. As observações revelam máximas temperaturas próximo ao meio-dia, e temperaturas mínimas durante a madrugada. O mesmo padrão foi observado em todos os casos simulados, embora haja uma tendência dos modelos em subestimar a temperatura, principalmente, durante a madrugada. De forma geral, os menores erros estão para o caso\_01 (MAE de  $9,06^\circ$  e *Bias* de  $4,48^\circ$ ) e seguido do caso\_03 (MAE de  $9,47^\circ$  e *Bias* de  $5,89^\circ$ ). Por fim, os casos 02 e 04 apresentam métricas de erros muito semelhantes,  $9,64^\circ$  e  $9,57^\circ$  de MAE e  $6,34^\circ$  e  $6,23^\circ$  de *Bias*, respectivamente.

Para a velocidade de fricção (último gráfico da Figura 19), as métricas de erro apresentaram considerável semelhança entre os quatro casos simulados. Estes minimizaram os picos de alta velocidade de fricção que transcorreram no início do dia devido ao crescimento da turbulência local. Esse aspecto é razoável, uma vez que a comparação é elaborada entre um dado real e uma simulação de  $3 \times 3$  km de resolução de grade. Todavia, as simulações apresentaram um módulo de velocidade análogo aos dados medidos. De modo geral, os casos 01 e 02 apresentaram valores iguais de MAE ( $0,12$  m/s) e *Bias* de  $-0,06$  m/s e  $-0,08$  m/s, respectivamente. O caso\_03 apresentou um desempenho levemente superior, apresentando MAE de  $0,11$  m/s e *Bias* de  $0,07$  m/s).

A seguir realizou-se uma análise dos resultados apresentados na Tabela 5 os quais apresentam as métricas estatísticas de magnitude de velocidade ( $WS_{100\_LiDAR}$ ) e direção do vento ( $WD_{100\_LiDAR}$ ), a 100 m, referente às observações do LiDAR.

Para a velocidade do vento, as melhores métricas estatísticas foram representadas pelo caso\_03, sendo MAE de  $1,52$  m/s e *Bias* de  $-0,2$  m/s. Para a direção do vento, a simulação que apresentou menores erros foi o caso\_02 ( $11,86^\circ$  de MAE e  $-10,46^\circ$  de *Bias*). Para o período simulado, o melhor conjunto de parâmetros foi o caso\_03. Os erros de simulação para velocidade do vento obtido pelo MYNN 2.5 e 61 números verticais foram iguais a  $1,66$  e  $1,52$



m/s de MAE e -0,7 e -0,2 m/s de *Bias*, para torre e LiDAR, respectivamente. Apresentando ainda o melhor conjunto de parâmetros para o LiDAR, sendo MAE de 1,52 m/s e *Bias* de -0,2 m/s. Em relação à direção do vento, o caso\_03 apresentou o segundo melhor conjunto de parâmetros para a torre (9,47° de MAE e 5,89° de *Bias*) e o terceiro melhor conjunto para o LiDAR (9,47° de MAE e 5,89° de *Bias*). Para a temperatura, o caso\_03 apresentou o desempenho menos satisfatório, iguais a 0,59 °C de MAE e -0,48 °C de *Bias*, entretanto dentre as quatro variáveis analisadas (*WS*, *DV*, *T* e *U\**), a temperatura foi a que apresentou os menores erros gerais. Em relação à velocidade de fricção, todas as combinações de parametrizações demonstraram desempenho muito semelhante, mas o caso\_03 apresentou os menores erros (0,11 m/s de MAE e -0,05 m/s de *Bias*).

Após análises discutidas anteriormente, a parametrização escolhida para configurar o WRF foi o caso\_03: MYNN 2.5 como esquema de camada limite e camada superficial, para 41 níveis verticais.

## 5.2 SIMULAÇÕES PARA DIFERENTES RESOLUÇÕES

Para as simulações de alta resolução na UEPS, foram realizadas simulações para duas semanas que apresentaram padrões de ventos distintos. A semana entre 15 a 22 de julho de 2014 apresentou vento moderado (9,2 m/s). E a semana de 15 a 22 de outubro de 2013 foi selecionada por representar uma semana de ventos intensos (12,78 m/s). Para ambas as semanas as primeiras 24 horas foram descartadas considerando o tempo de inicialização do modelo (*spin-up*), dessa forma, a análise foi realizada considerando os períodos de 16 a 22 de julho de 2014 e 16 a 22 de outubro de 2013.

Nas simulações, utilizou-se o modelo WRF com quatro domínios aninhados com resoluções variando de 9 km (D1), 3 km (D2), 1 km (D3), 333 m (D4). O primeiro domínio (D1) e mais externo, engloba uma porção significativa do nordeste brasileiro, bem como uma considerável região do oceano Atlântico (Figura 21). As configurações do WRF seguiram os parâmetros do caso\_03, sendo adotado o esquema de camada limite e camada superficial MYNN 2.5 Além disso, utilizou-se 41 níveis verticais na malha computacional de todos os domínios.

As Figuras 23 e 23 e Figuras 24 e 25 apresentam a série temporal e o ciclo diário médio para as semanas dos meses de julho e outubro, respectivamente. As variáveis simuladas da velocidade do vento ( $WS_{100}$ ), direção do vento ( $DV_{100}$ ), temperatura ( $T_{100}$ ) e componentes de

velocidade ( $U_{100}$ ) e ( $V_{100}$ ) foram interpoladas linearmente para as coordenadas da torre e do LiDAR na direção horizontal, e à 100 m ANS na direção vertical. As análises referentes ao domínio D2 serão aplicadas para avaliações das séries temporais, ciclo diário, componente  $U$  da velocidade, temperatura potencial e magnitude de velocidade para ambas às semanas. Já o domínio mais refinado, D4, será utilizado para representação espaço temporal da componente  $V$  da velocidade com intuito de representar mais detalhadamente os processos de circulação de brisa na UEPS, tanto para a semana de julho como para a semana de outubro.

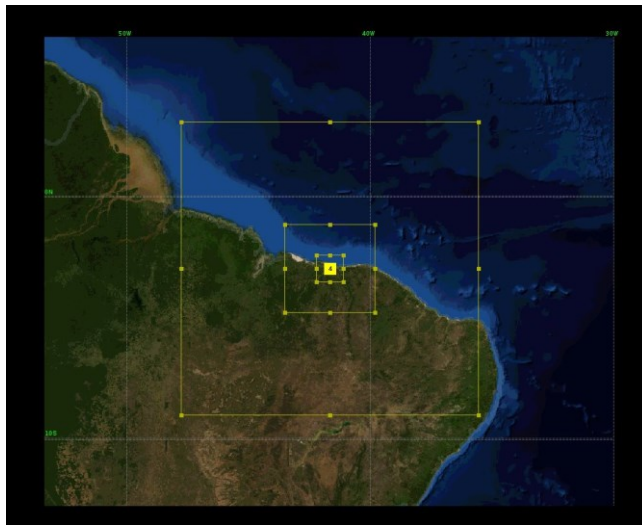


Figura 21 – Localização do Parque Eólico de Pedra do Sal e domínios D1, D2, D3 e D4 aninhados do modelo de mesoescala.

As componentes  $U$  e  $V$  da velocidade do vento são importantes para a caracterização dos ventos na região costeira de Pedra do Sal. A componente  $V$  relaciona-se com a forçante da brisa marítima, enquanto a componente  $U$  está, em grande medida, associada aos ventos alísios de grande escala. A influência dos ventos alísios na região costeira do estado do PI será abordada nos próximos capítulos.

### 5.2.1 Julho

Conforme apresentado pela série temporal (Figura 22) o modelo apresenta dificuldades em representar a velocidade do vento na UEPS. Para a direção do vento, o modelo apresentou boa relação com os dados medidos, apresentando padrões semelhantes de mudança na direção do vento. O mesmo é observado para a temperaturas noturnas mais frias.

O ciclo diário (Figura 23) para a velocidade do vento em julho, apresenta boa relação com as medições durante a madrugada até início da manhã, mas apresenta dificuldades em representar o vento entre o período de 13 h às 23 h. O modelo apresentou dificuldade, também, em representar a velocidade do vento entre 8 h e 11 h, superestimando-a, durante esse período. Os picos de máxima velocidade são observados durante a madrugada, seguido de uma queda considerável da velocidade do vento ao nascer do sol. Entre 15 h e meia-noite a velocidade do vento apresenta menor variabilidade temporal.

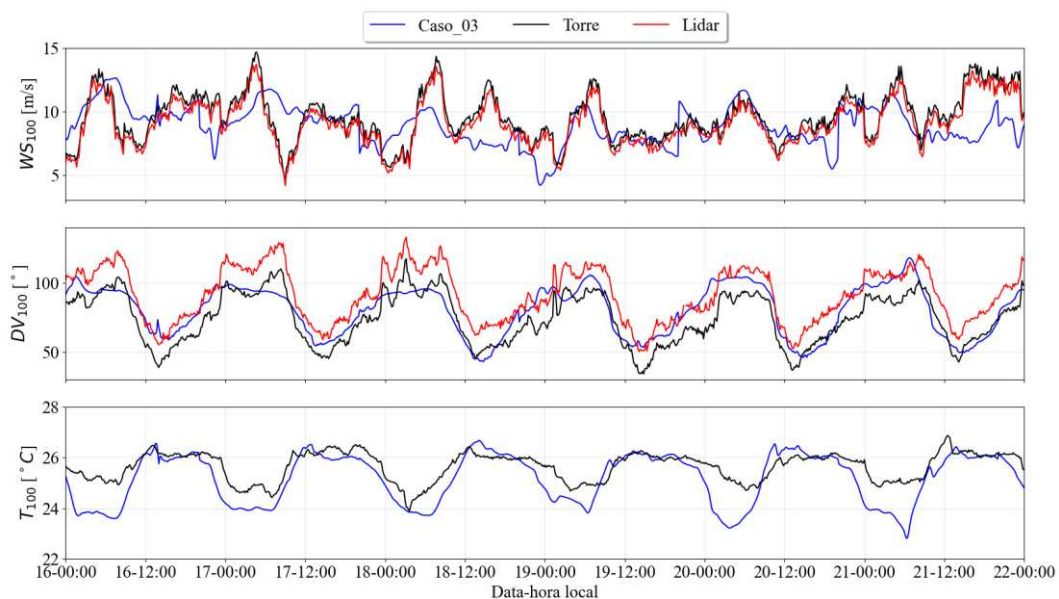


Figura 22: Séries temporais para velocidade do vento ( $WS_{100}$ ), direção do vento ( $DV_{100}$ ) e temperatura ( $T_{100}$ ) para o mês de julho, para o domínio D2.

A mudança na direção do vento acontece de maneira acentuada por volta de 8 h e permanece até o início da tarde (Figura 23). Do início da tarde até o meio da madrugada o vento retorna a soprar na direção sudeste. Na madrugada, o vento apresenta angulação aproximada de  $120^\circ$ , isso ocorre devido à predominância dos ventos alísios e ao enfraquecimento da brisa marítima. Os padrões discutidos aqui são observados diariamente. Assim, o efeito combinado dos alísios de grande escala e do sistema local de brisa marítima são os responsáveis pela mudança na direção do vento que mudam de sentido anti-horário (direção norte) durante o dia para o sentido horário (direção sul) durante a noite, conforme se alinham com o litoral. Para todos os dias padrões de temperatura podem ser observados, a citar o aumento de temperatura às 8 h, devido a maior incidência de radiação na atmosfera. Além disso, entre meio-dia e 22 h

as temperaturas não sofrem grandes variações, ao contrário dos períodos de transição entre 7 h e meio-dia que mudanças de temperaturas são observadas.

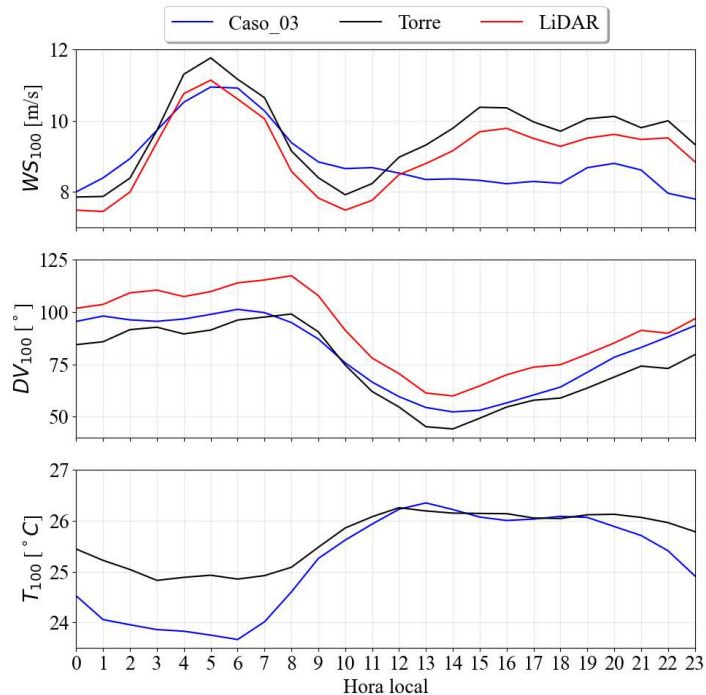


Figura 23: Ciclo diário para velocidade do vento ( $WS_{100}$ ), direção do vento ( $DV_{100}$ ) e temperatura ( $T_{100}$ ) para o mês de julho, para o domínio D2.

Por volta de 5 h o vento começa a perder velocidade, entretanto, de forma não esperada o vento não apresenta mudança de direção significativa. O vento começa a girar somente cerca de três horas depois, por volta de 8 h. Isso ocorre devido à influência da topografia na região, onde a cadeia de montanhas da Serra do Ibiapaba dificulta a passagem dos ventos que sopram da direção sudeste. Esse aspecto será melhor caracterizado na seção 5.4.3.

## 5.2.2 Outubro

Durante o mês de outubro, perdas significativas dos dados do LiDAR foram detectadas devido à falhas no funcionamento do limpador da lente do mesmo (SAKAGAMI, 2017). Devido à isso, as simulações para os dias 15 a 22 de outubro de 2013 foram comparadas aos dados da torre anemométrica. Assim como julho, a série temporal da semana de outubro (Figura 24) revela que o modelo apresenta dificuldades em representar a velocidade do vento, subestimando-a na maioria do tempo. As máximas velocidades ocorreram durante as tardes dos

dias, 16, 18, 19 e 21, e nas madrugadas dos dias 16 e 17. Entretanto, tanto a direção do vento quanto a temperatura simuladas apresentam padrões semelhantes aos dados medidos. A análise da direção do vento aponta que, após o nascer do sol, o vento gira no sentido anti-horário, passando de cerca de  $90^\circ$  às 7 h, para cerca de  $60^\circ$  às 12 h. Esse padrão é observado para todos os dias simulados. As máximas temperaturas são registradas no período da tarde (12 h às 16 h) e as mínimas durante a madrugada, pouco antes do nascer do sol (entre 2 h às 6 h).

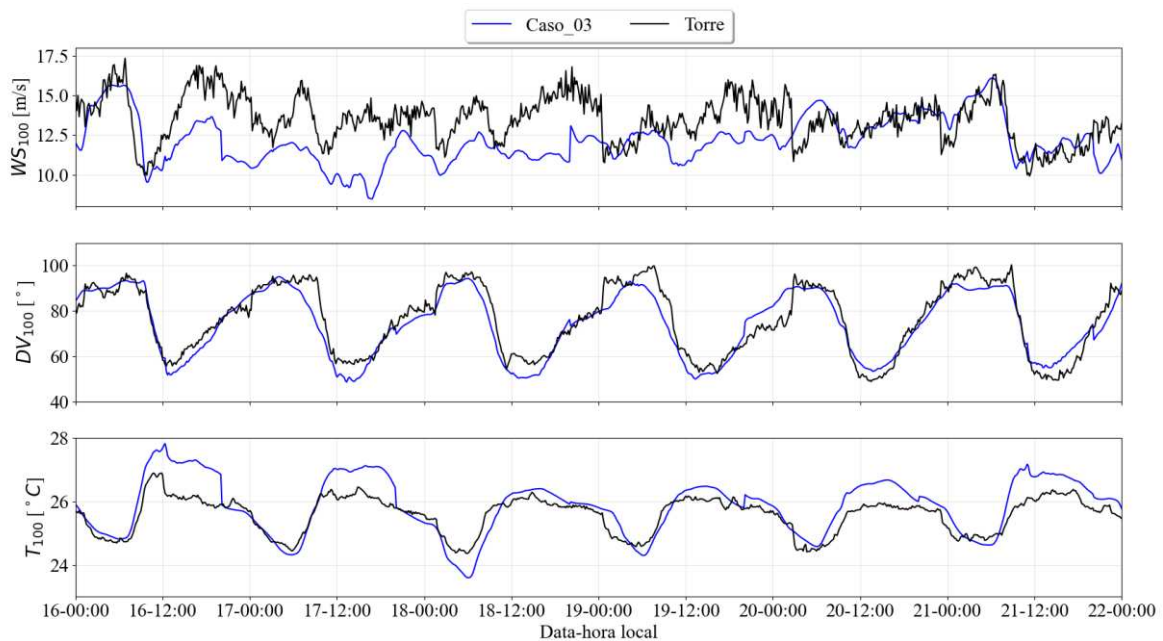


Figura 24: Séries temporais para velocidade do vento ( $WS_{100}$ ), direção do vento ( $DV_{100}$ ) e temperatura ( $T_{100}$ ) para o mês de outubro, para o domínio D2.

O padrão de ganho de velocidade do vento somado a mudança de direção do vento estão associados à brisa marítima, causada pela diferença de temperatura entre terra e mar que produz um gradiente de pressão local, responsável pela formação de ventos que se orientam do mar para a costa (STULL, R., 2015; SAMUEL T. K. MILLER BARRY D. KEIM; MAO, 2003; AHRENS, 2019). Esse padrão é observado para ambas as semanas simuladas.

Segundo o ciclo diário (Figura 25), por volta das 10 h, o vento ganha velocidade até o final da noite (23 h). Entre 23 h até as 3 h o vento perde velocidade e se recupera na sequência, apresentando máxima velocidade às 6 h. Após o nascer do sol, o vento perde velocidade até às 10 h, onde o ciclo diário se repete. A temperatura simulada foi melhor representada entre 20 h e 8 h. Entre 9 h e 19 h o modelo superestimou levemente a temperatura em cerca de  $1^\circ\text{C}$ . As

máximas temperaturas são registradas entre às 12 h e 16 h e as mínimas temperaturas são observadas entre às 4 h e 6 h, ou seja, no período que antecede o nascer do sol.

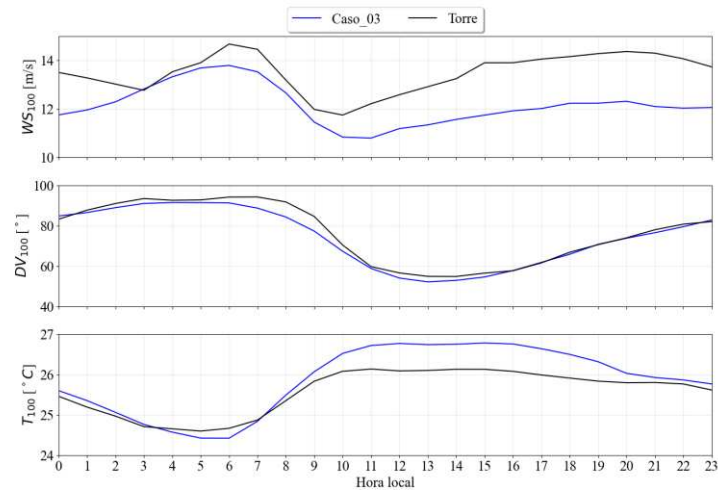


Figura 25: Ciclo diário para velocidade do vento ( $WS_{100}$ ), direção do vento ( $DV_{100}$ ) e temperatura ( $T_{100}$ ) para o mês de outubro, para o domínio D2.

### 5.3 REPRESENTAÇÃO E EVOLUÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA CIRCULAÇÃO DE BRISA MARÍTIMA

Foi visto que os ventos predominantes em Pedra do Sal são uma combinação entre os ventos de grande escala, os alísios, e os ventos locais, a circulação de brisa. A usina eólica de Pedra do Sal encontra-se em uma linha aproximadamente alinhada na direção leste/oeste, dessa forma, a presença da brisa marítima e seu ciclo diário, bem como os ventos alísios, podem ser verificados através da combinação das velocidades médias decompostas nas componentes  $U$  e  $V$  de velocidade.

Assim, entende-se que o vento meridional, em grande medida, é causado por um vento cada vez mais forte vindo da direção norte (oceano) em direção ao sul (continente), caracterizando assim um vento oriundo do setor *offshore*. Como o vento na componente  $U$  da velocidade apresenta pouca variação diurna, é consistente associá-los aos ventos alísios mais constantes. Esses parâmetros serão discutidos na seção 5.3.1 para julho e na seção 5.3.2 para outubro.

### 5.3.1 Julho

A simulação apresenta, para a componente  $U$  da velocidade do vento, características pouco semelhantes (Figura 26). De forma geral, a componente  $U$  é subestimada pelo modelo. Para todo ciclo diário há a presença de componentes negativas de velocidade na componente  $U$ , o que representa que os ventos estão soprando na direção leste/oeste em sua totalidade. Ainda sobre a componente  $U$ , o pico de maior velocidade se dá por volta das 5 h tanto para a torre, como para o LiDAR e o modelo. Já a velocidade mínima se dá por volta das 13 h para torre e LiDAR e às 14 h para o caso simulado.

No que tange a discussão sobre a componente  $V$  da velocidade, é possível observar um melhor desempenho do modelo em representar essa componente. Aqui, a simulação apresentou valores que oscilaram entre as medições do LiDAR e da torre. Velocidades  $V$  positivas, ou seja, em direção sul/norte, foram observadas todos os dias durante a madrugada e pós-nascer do sol, cerca de 9 h para torre e simulação e às 10 h para o LiDAR.

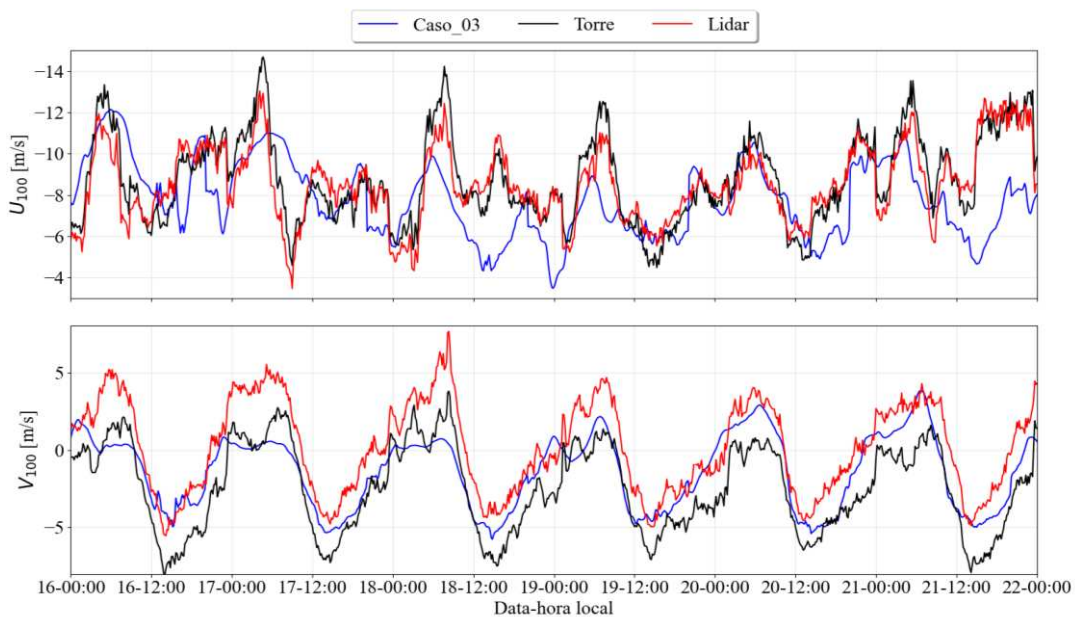


Figura 26: Série temporal para componente  $U$  da velocidade do vento ( $U_{100}$ ) e componente  $V$  da velocidade do vento ( $V_{100}$ ) para o mês de julho a 100 m, para o domínio D2.

Durante o final da noite até a madrugada é visível a influência da componente  $U$  da velocidade que apresenta uma magnitude muito superior a componente  $V$  da velocidade. Aqui

é notória a influência expressiva dos ventos alísios de escala global na composição de ventos na UEPS durante o período noturno (Figura 27).

Apesar da predominância dos ventos alísios na UEPS, no período da manhã até o final da tarde, é possível observar a influência da circulação de brisa na região, principalmente entre 12 h às 16 h, em que a componente  $V$  da velocidade se destaca mais presente (mais negativa). Por volta das 8 h, à medida que a temperatura aumenta, a direção do vento começa a mudar (Figura 23). Esse processo ocorre uma vez que a forçante da brisa surge e começa a agir no vento. Assim, entende-se que o vetor brisa varia sua magnitude durante o dia, começando a se desenvolver no período da manhã, entre 9 h e 10 h, ortogonal a linha da costa, tornando-se máximo às 14 h. Às 14 h há um alto gradiente térmico entre terra/mar e a brisa está mais forte e sobre a costa. A partir desse horário, o vetor começa a diminuir.

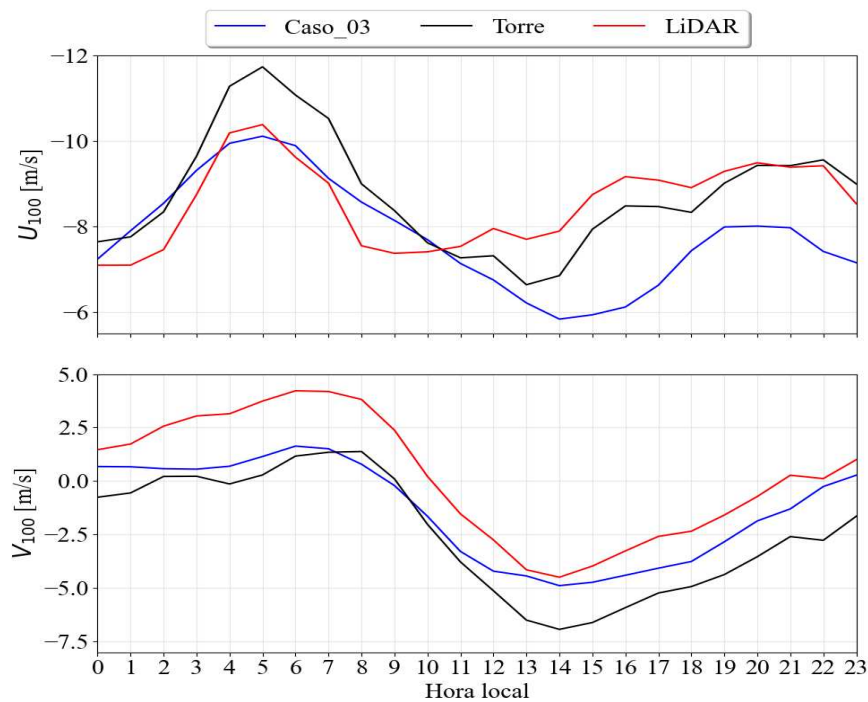


Figura 27: Ciclo diário para componente  $U$  da velocidade do vento ( $U_{100}$ ) e componente  $V$  da velocidade do vento ( $V_{100}$ ) para o mês de julho a 100 m, para o domínio D2.

A UEPS está localizada em uma região de baixa latitude onde a força de *Coriolis* é mais fraca quando comparada à regiões de altas latitudes. Apesar disso, é importante ressaltar que a força gradiente de pressão de grande escala também é baixa na porção nordeste brasileira, uma vez que o vento sopra ortogonalmente às isóbaras (em superfície). Ainda há pouca literatura que discute sobre os tipos de brisa em baixas latitudes, entretanto, um estudo recente



caracterizou a brisa na costa centro-norte do Brasil como sendo do tipo *backdoor* (MEDEIROS *et al*, 2021). De fato, estudos realizados nesse trabalho apontam uma diminuição da magnitude de velocidade do vento entre o período da manhã e início da tarde (durante o processo de brisa marítima). Assim, devido ao contraste de rugosidade entre terra e mar, o efeito de *Coriolis* e a direção do vento predominante, o vetor velocidade de grande escala sofre uma convergência sobre o oceano, ocasionando a diminuição da magnitude da velocidade do vento local, forte característica de brisas do tipo *backdoor*.

Até aqui, discutiu-se o papel da circulação de brisa na modulação do vento na UEPS, entretanto, ela não é o único processo presente na região. Segundo a Figura 22, por volta das 5 h a velocidade do vento começa a diminuir, mas a direção do vento não apresenta mudanças significativas. Devido à isso, provavelmente, ainda não há circulação de brisa no local. Esse processo é afetado pela dificuldade do vento em atravessar a cadeia de montanhas da Serra do Ibiapaba. Deste modo, entende-se que os fatores que modulam o vento na região do parque eólico de Pedra do Sal são processos simultaneamente acoplados, relacionando processos de circulação global e local e a interação dos ventos com a topografia.

### 5.3.2 Outubro

Os padrões observados para a semana de julho se assemelham aos padrões da semana de outubro. De forma geral, as velocidades da componente  $U$  são subestimadas entre os dias 16 a 20 (até o meio-dia) e apresentam aspectos semelhantes para os dias 20 (a partir do meio-dia), 21 e 22. A componente  $V$  da velocidade foi melhor caracterizada no período (Figura 28).

Durante todo o ciclo diário analisado, os ventos sopraram de leste para oeste, como a semana de julho. Mas uma vez, nota-se a presença significativa dos ventos de grandes escala na UEPS também no período da primavera. A velocidade máxima ocorre às 6 h para ambas as componentes. Já a mínima é dada às 11 h e às 14 h para as componentes  $U$  e  $V$  da velocidade da torre, respectivamente. O vetor  $V$ , apresenta valores positivos entre 2 h e 8 h para a torre, e, entre 2:30 h a 6:30 h para o Caso\_03, representando ventos na direção sul/norte. Vetores de  $V$  negativos são observados de 8 h às 2 h para torre, e de 6:30 h às 2:30 h para o Caso\_03, caracterizando ventos com orientação norte/sul.

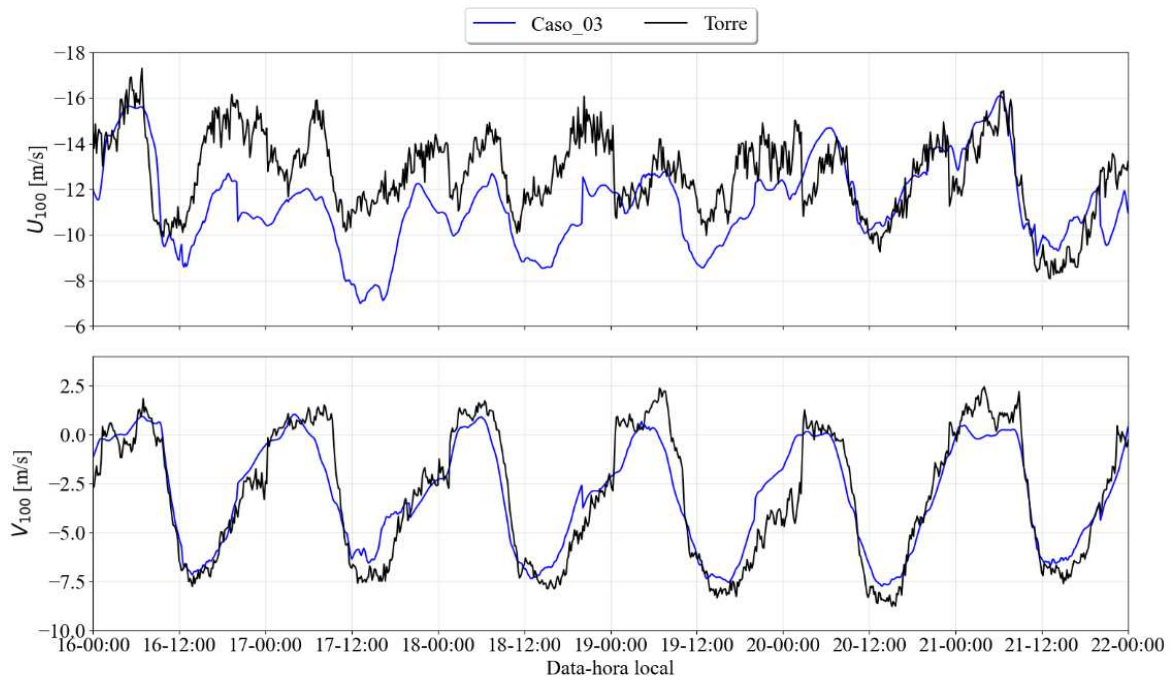


Figura 28: Série temporal para componente  $U$  da velocidade do vento ( $U_{100}$ ) e componente  $V$  da velocidade do vento ( $V_{100}$ ) para o mês de outubro a 100 m, para o domínio D2.

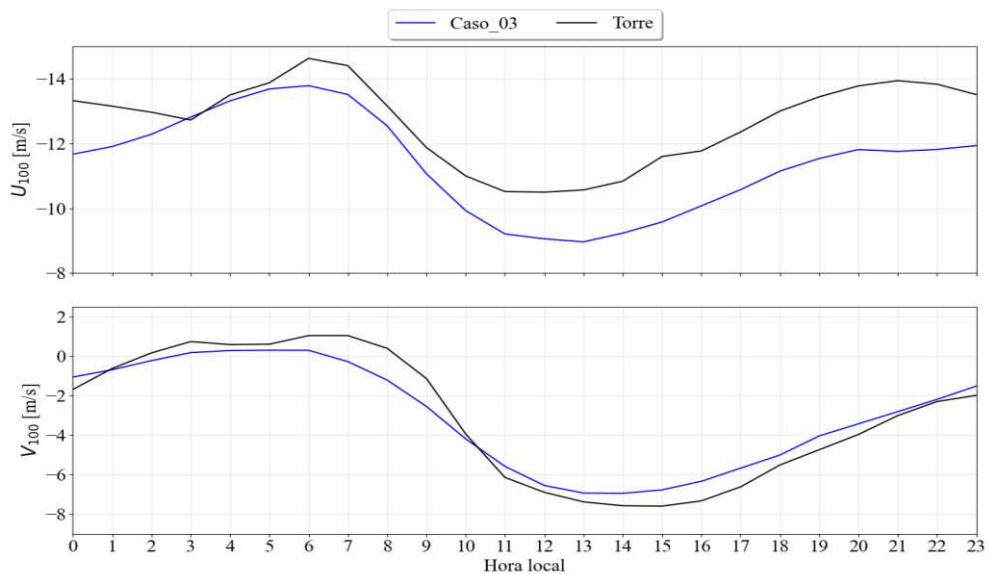


Figura 29: Ciclo diário para componente  $U$  da velocidade do vento ( $U_{100}$ ) e componente  $V$  da velocidade do vento ( $V_{100}$ ) para o mês de outubro a 100 m, para o domínio D2.

A mudança da direção do vento para ambas as componentes ocorre por volta das 6 h (Figura 28). A partir desse horário a componente  $U$  da velocidade diminui sua magnitude ao passo que a componente  $V$  da velocidade aumenta. A combinação entre fatores como mudança na direção do vento e aumento da magnitude da componente  $V$  da velocidade apresentam a possibilidade da presença da circulação de brisa na região do parque eólico de Pedra do sal (Figura 29). Assim como ocorre para julho, o processo de brisa marítima causa uma diminuição da magnitude de velocidade do vento entre 7 h e 15 h. Para outubro entende-se que o processo de brisa marítima ocorra pouco antes do horário observado para julho, sendo seu pico de máxima interferência às 15 h, uma hora após o observado em julho. A partir desse horário permanece constante até as 16 h. Após esse horário apresenta um pico de alta velocidade de 16 h às 22 h.

### 5.3.3 Transecto ortogonal à linha da costa

Com intuito de investigar as características da circulação de brisa na região do parque eólico de Pedra do Sal, um transecto vertical arbitrário (par de coordenadas), cruzando na coordenada do LiDAR da UEPS, foi seccionado para investigação (Figura 30). Essa análise contempla o domínio D2 onde o transecto apresenta direção nordeste/sudoeste e a componente de velocidade  $V$  plotada no transecto, representada pelas Figuras 31 e 32, representam a componente  $V$  do sistema de coordenadas global, ou seja, sentido norte/sul (velocidade paralela ao transecto).

A componente  $V$  da velocidade está representada ao longo do transecto para cada semana, a Figura 31 para julho e a Figura 32 para outubro. As linhas apresentam a variação da velocidade ao longo do dia e as colunas apresentam todos os seis dias simulados. O ponto preto representa o posicionamento do LiDAR.

Para ambas as semanas é possível observar que durante o dia a brisa apresenta uma forçante próximo à superfície em direção *onshore* e um vento enfraquecido em altura em direção *offshore*. Além disso, a brisa marítima em outubro é mais longa quando comparada com a semana do mês de julho. Para o mês de outubro é possível visualizar a presença da brisa marítima antes do meio-dia. Já em julho, a passagem da brisa marítima se inicia após esse horário. As principais condições que favorecem a formação da brisa marítima são: os contrastes de temperatura entre a terra e o oceano e os importantes efeitos do fluxo em escala sinóptica que interagem com a brisa marítima (GAHMBERG *et al.*, 2010).

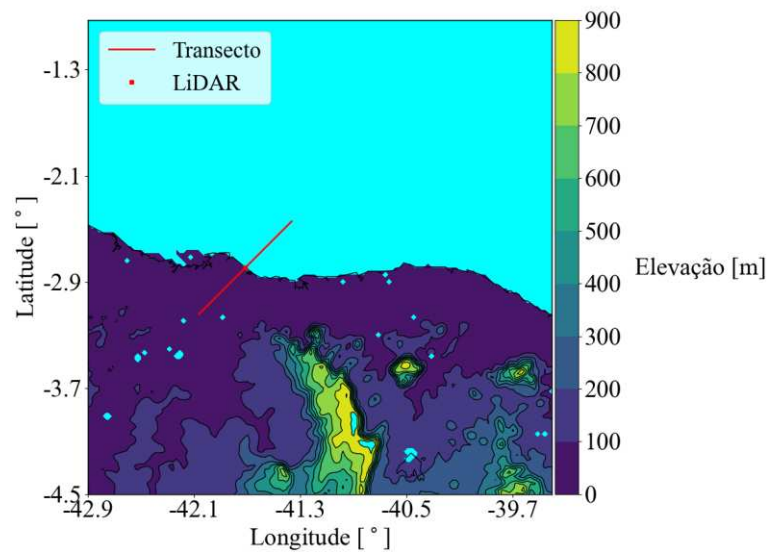


Figura 30: Mapa de elevação na resolução do domínio (D2) onde o quadrado vermelho representa o posicionamento do LiDAR e a linha vermelha representa o transecto.

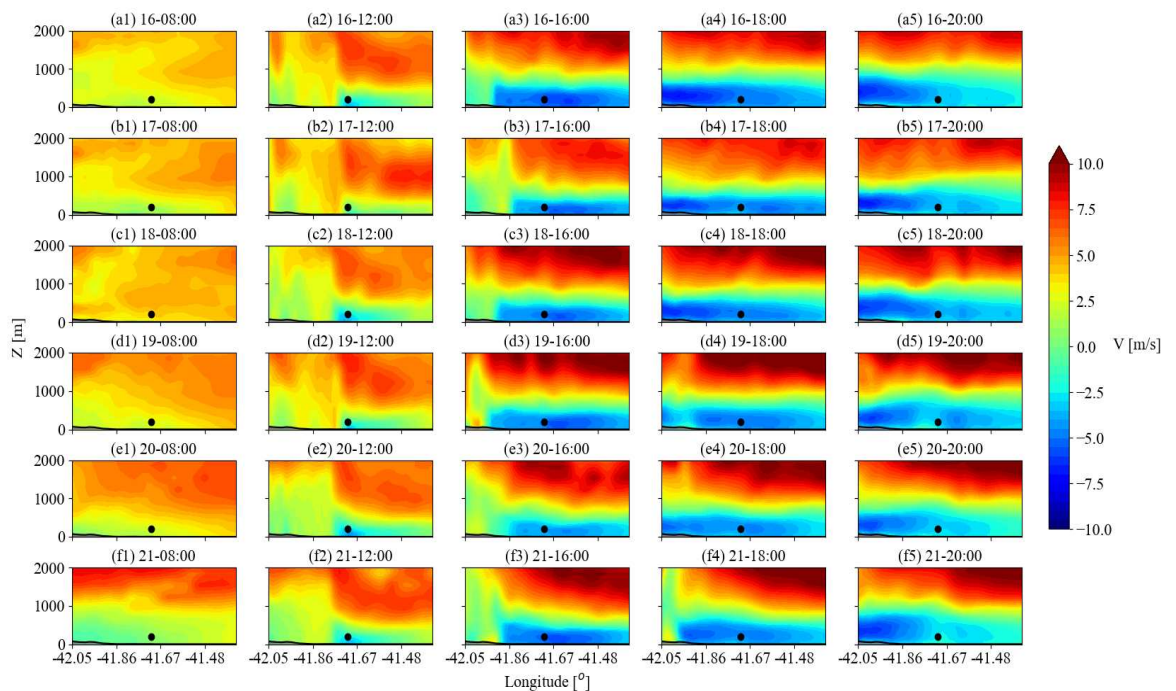


Figura 31: Transectos verticais da componente  $V$  da velocidade do vento no domínio D2 para o caso 3 ilustrando a formação da circulação de brisa no litoral da Usina Eólica de Pedra do Sal para a semana do mês de julho. O ponto preto representa a localização do LiDAR. A brisa marítima está representada por ventos que fluem do oceano para a costa em baixos níveis (azul) acompanhada de um fluxo de retorno que possui orientação da terra para o mar em altos níveis (vermelho). As colunas se referem a evolução temporal para algumas horas do dia. As linhas representam cada dia da semana simulada.

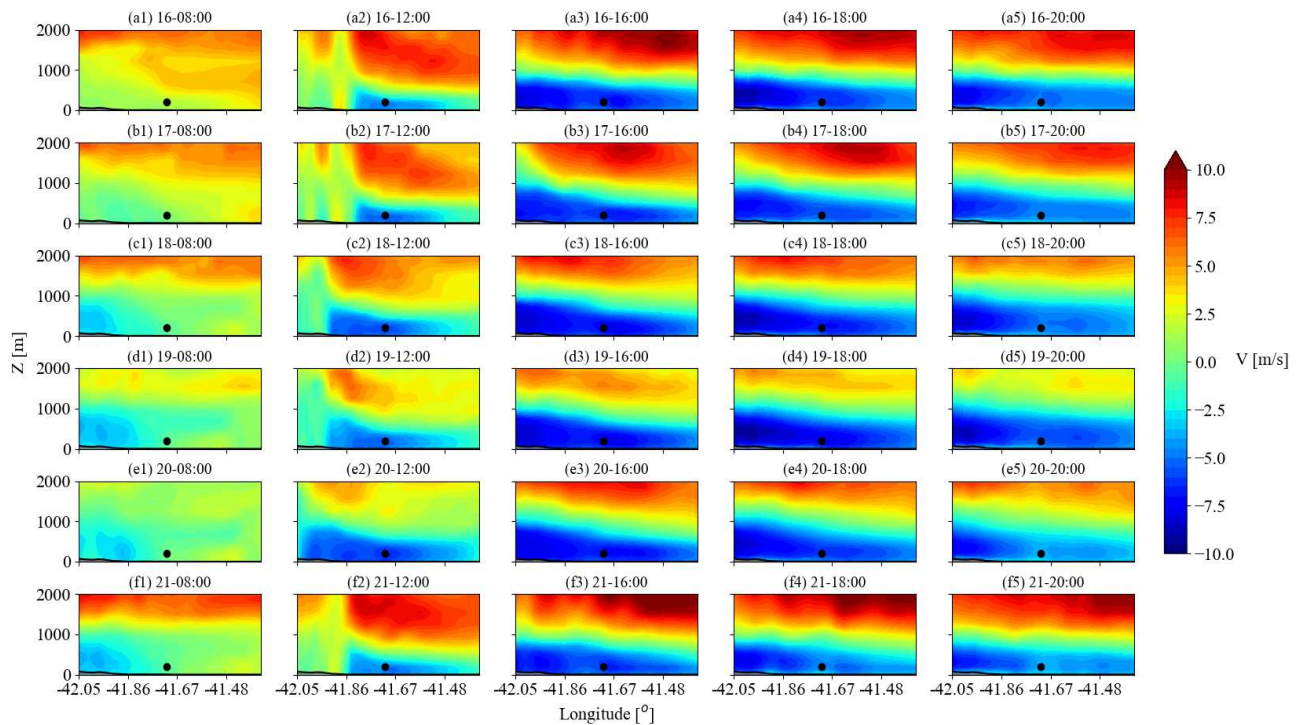


Figura 32: Análoga à Figura 31, para o mês de outubro.

Para ambas as semanas simuladas, é possível observar também que por volta das 18 h a brisa marítima já adentrou o continente e grande parte dos gradientes térmicos e de pressão passam a agir com menos intensidade na costa, e com maior intensidade dentro do continente. A partir desse instante, o vento volta a ganhar velocidade.

#### 5.4 Mapas representativos para a simulação com diferentes resoluções

Os resultados apresentados nessa seção referem-se ao período de 16 a 22 de outubro de 2013 e 16 a 22 de julho de 2014, onde o foco é a avaliação do recurso eólico costeiro e *offshore* na região da Usina Eólica de Pedra do Sal (representada pelo triângulo vermelho). Na seção 5.4.1 serão apresentados os padrões de temperatura potencial para ambas as semanas, posteriormente, na seção 5.4.2 serão apresentados os padrões de componentes de velocidades  $U$  e  $V$  para as duas semanas simuladas. Em seguida, na seção 5.4.3 será abordado sobre a magnitude da velocidade das semanas de julho e outubro. Por fim, a seção 5.4.4 discursa sobre a circulação de brisa. As imagens apresentadas nas seções seguintes são referentes ao domínio D2 e D4, identificadas na legenda.

### 5.4.1 Temperatura Potencial

Os padrões de temperatura potencial do ar à 100 m de altura na UEPS são representados pela Figura 33 para o mês de julho e pela Figura 34 para a semana do mês de outubro, para o domínio D2. As discussões sobre temperatura potencial para ambas as semanas se assemelham em forma geral, apresentando diferenças apenas em magnitude. Para ambas as semanas é expressiva a temperatura constante do oceano para todos os dias e horários devido à alta capacidade térmica da água. Durante a madrugada é possível observar a presença de um ar frio que contorna a cadeia montanhosa próxima à região da UEPS.

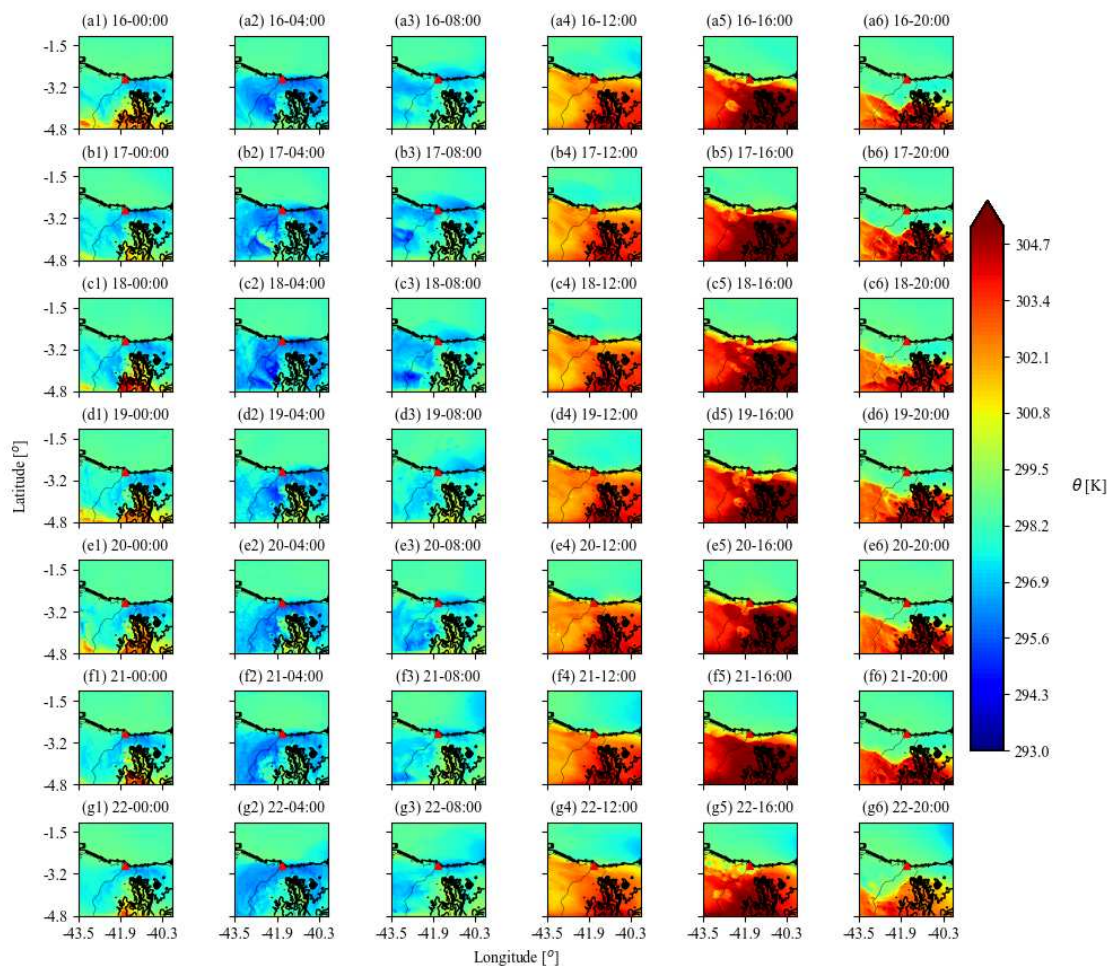


Figura 33: Representação espaço temporal da temperatura potencial, a 100 m, no domínio D2 para a semana do mês de julho. O triângulo vermelho representa a localização do perfilador LiDAR instalado na UEPS. As linhas representam cada dia simulado e as colunas representam alguns instantes de tempo que ilustram a evolução temporal da atividade de mesoescala.

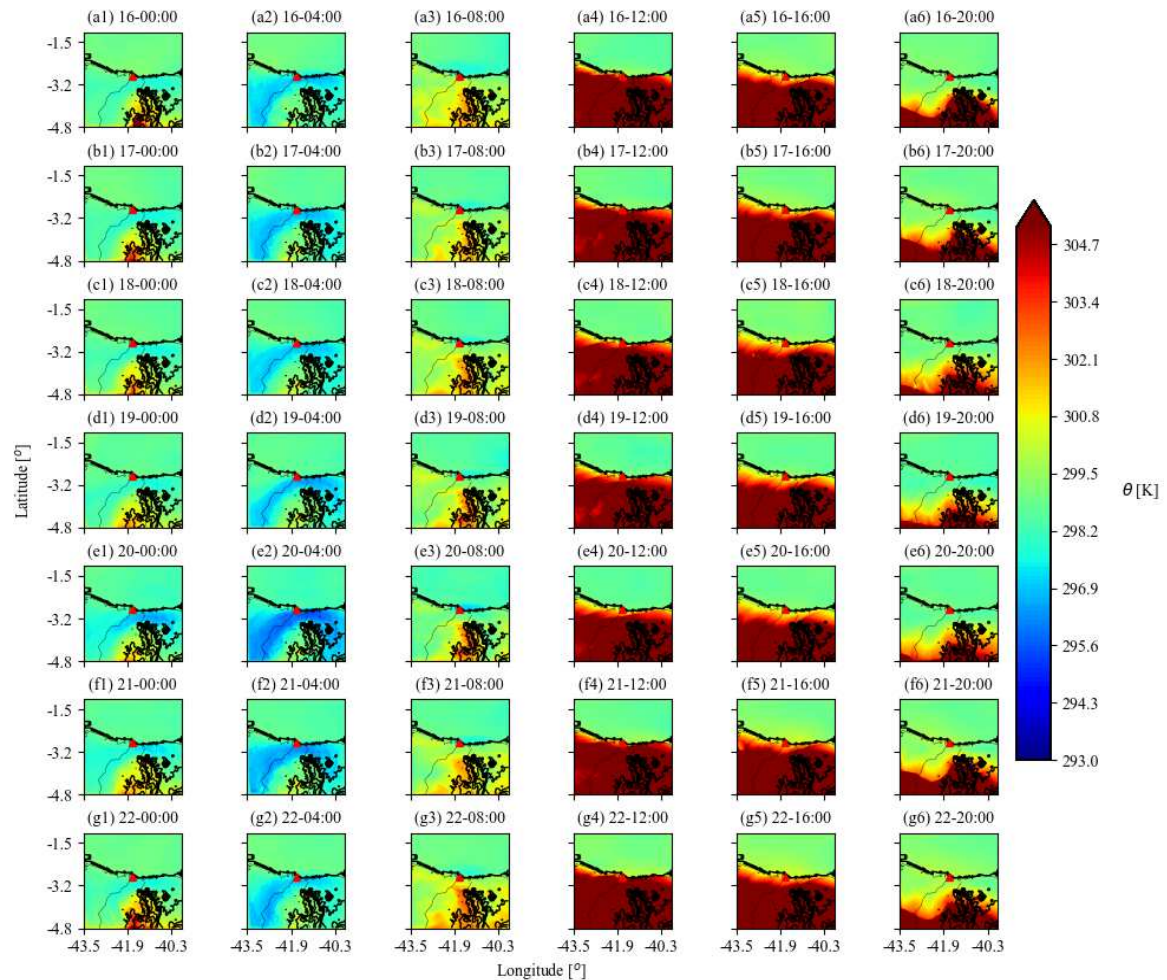


Figura 34: Análoga à Figura 33, para o mês de outubro.

O nascer do sol esquenta o continente e a partir do meio-dia é possível observar um gradiente térmico significativo entre terra e mar. Em outubro é possível observar que o continente aquece mais cedo quando comparado com a semana de julho, isso ocorre devido à alta incidência dos raios solares nas estações de primavera e verão, quando comparadas com a estação de inverno (julho). Além disso, os meses de setembro e outubro são caracterizados por baixa formação de nuvens, ou seja, a radiação solar é mais incidente sobre a terra devido à ausência de barreira física (nuvens), somado ao fato dos raios solares incidirem perpendicularmente no equinócio nessa região do Equador.

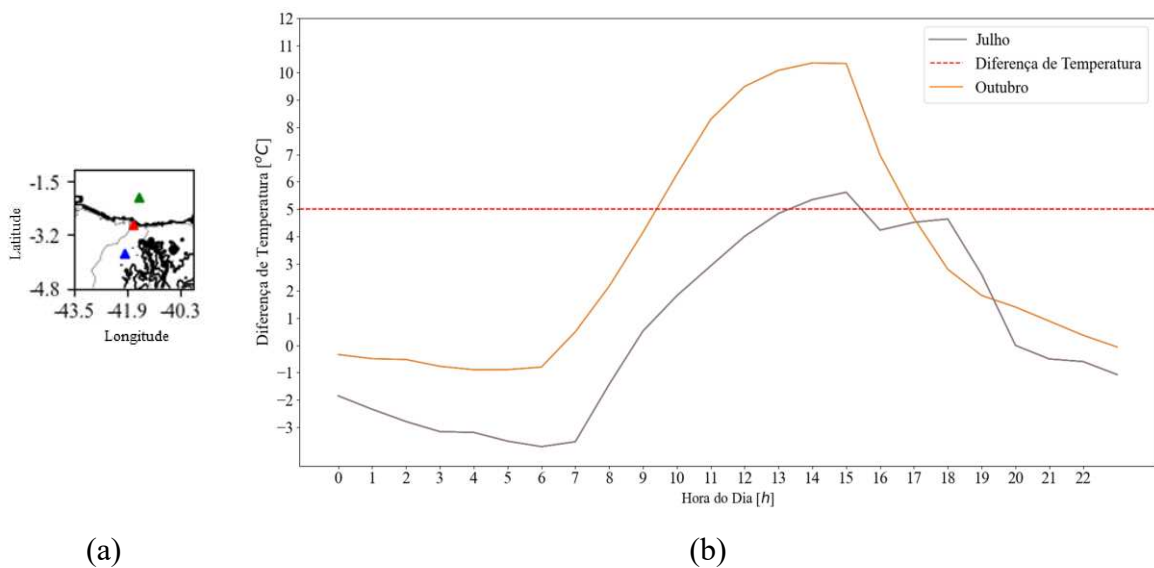


Figura 35: (a) Localização dos marcadores arbitrários no mar (verde) e no continente (azul). Posicionamento do LiDAR (vermelho). (b) Diferença de temperatura de  $5^{\circ}$  (linha pontilhada vermelha) entre dois pontos arbitrários entre terra e mar para a semana do mês de julho (linha laranja) e para a semana do mês de outubro (linha marrom).

A partir do meio-dia até o final da noite, há uma região relativamente mais fria que avança da costa em direção ao interior do continente. No final da tarde e início da noite é possível identificar que o ar frio vindo do oceano adentra mais o continente no mês de outubro quando comparado ao mês de julho. As diferenças de temperaturas globais produzem um gradiente de pressão responsáveis pela formação global dos ventos. O gradiente de pressão de grande escala é o responsável por originar os ventos alísios (seção 2.1.1). Somado a esse fenômeno existe um gradiente de pressão local que se soma nas direções leste e oeste, e parcialmente se opõe na direção norte sul (durante o dia), esse é o gradiente produzido pela brisa, que se origina, também, pela diferença de temperatura entre o continente e o oceano. Em outubro, essa diferença de temperatura entre a terra e o mar é mais acentuada e, como consequência, apresenta um maior gradiente de pressão, produzindo ventos mais fortes. A brisa marítima é causada por uma diferença de temperatura de cerca de  $5^{\circ}\text{C}$ , ou mais, entre a terra quente e a água do mar mais fria (STULL, 2015). À medida que a frente da brisa se move para o interior, uma rápida queda de temperatura, geralmente na ordem dos  $5^{\circ}\text{C}$ , ocorre logo atrás dela (AHRENS, 2019). A Figura 35 apresenta um gráfico da diferença de temperatura entre dois pontos arbitrários, sendo um, no mar ( $2^{\circ} 02' 00''\text{S}$ ,  $41^{\circ} 54' 00''\text{W}$ ) e o outro, na plataforma continental ( $3^{\circ} 69' 00''\text{S}$ ,  $42^{\circ} 00' 00''\text{W}$ ) onde as linhas marrom e laranja representam os dias 20



de julho de 2014 e 20 de outubro de 2013, respectivamente. A linha pontilhada em vermelho representa uma diferença de temperatura de 5°C entre esses dois pontos, justificando a presença de uma brisa marítima mais intensa e duradoura no mês de outubro na região da Usina Eólica de Pedra do Sal.

#### 5.4.2 Componente V da Velocidade

A componente  $V$  da velocidade do vento está representada pela Figura 36 para a semana do mês de julho e pela Figura 37 para a semana do mês de outubro, para resultados numéricos do domínio D4. Para ambas as semanas o início da madrugada é caracterizado pela presença de um vento que sopra na direção norte/sul. Antecedendo às 4 h a direção do vento começa a girar e às 8 h é possível observar a inversão completa do vento que passa a soprar de sul para norte, esses aspectos foram confirmados na seção 5.3. À medida que a terra começa a aquecer e uma diferença de temperatura considerável entre terra e mar é gerado, um gradiente de pressão local é criado em uma direção contrária ao gradiente de pressão de grande escala, caracterizando assim, a brisa marítima. O início desse fenômeno é visivelmente observado por volta das 12 h e intensificado às 16 h, para ambas as semanas. É possível constatar que a evolução do fenômeno da circulação da brisa pode ser observada no final da manhã e se estende por todo período da tarde. Como complemento, uma vez que o aquecimento do continente no mês de outubro acontece com mais intensidade e um pouco mais cedo que no mês de julho, é possível observar que o fenômeno de brisa marítima começa a ocorrer um pouco mais cedo na semana do mês de outubro quando comparado com a semana do mês de julho. No apêndice A, é apresentado o resultado para o mesmo caso, porém com maior e menor detalhe temporal, para o domínio D2.

A comparação entre as escalas dos domínios D2 e D4, mostram que a linha da costa apresenta orientações distintas, apresentando orientação leste/oeste para a grande escala (domínio D2) e sudeste/noroeste na pequena escala (domínio D4). É esperado que a forçante da brisa aponte ortogonalmente aos gradientes de temperatura potencial (em baixos níveis), ou seja, paralelos à linha da costa, independente do domínio simulado. Principalmente para os dias 16, 17 e 22, para o domínio D4, esse fenômeno não é observado. Aqui, a frente da brisa está se desenvolvendo próximo à costa no sentido leste/oeste, assim, os gradientes de pressão de mesoescala predominante é norte/sul, e não ortogonal a linha da costa. O que a simulação de alta resolução apresenta é que o gradiente de pressão de mesoescala segue mais a orientação do

domínio D2, do que do domínio D4, já que a brisa está se desenvolvendo na direção da escala maior. Apesar disso, a componente  $V$  da velocidade confirma sua sensibilidade às características de brisa marítima, uma vez que a frente da brisa apresenta orientação leste/oeste.

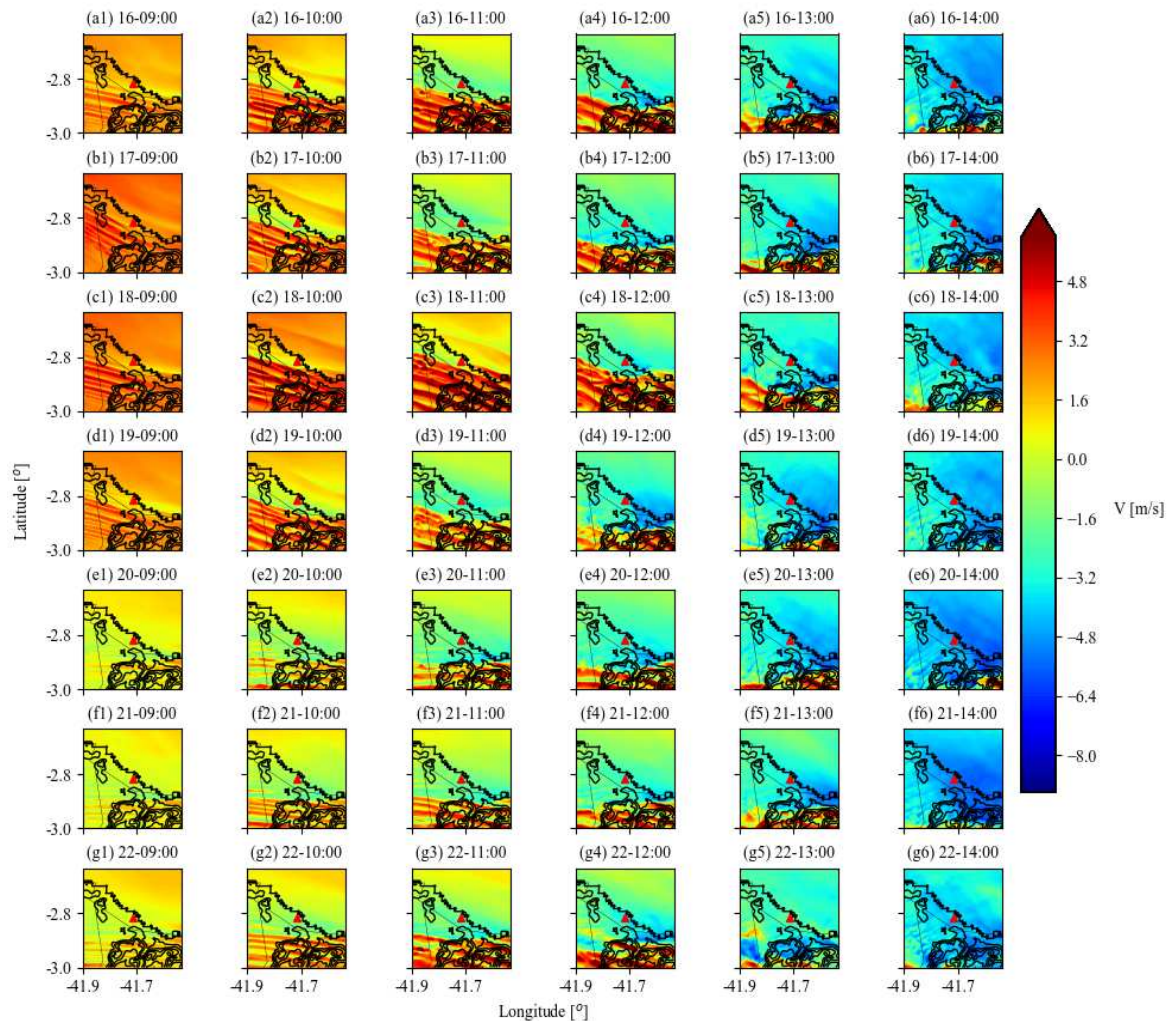


Figura 36: Representação espaço temporal da componente  $V$  da velocidade, a 100 m, no domínio D4 para a semana do mês de julho. O triângulo vermelho representa a localização do perfilador LiDAR instalado na UEPS. As linhas representam cada dia simulado e as colunas representam alguns instantes de tempo que ilustram a evolução temporal da circulação de brisa marítima.

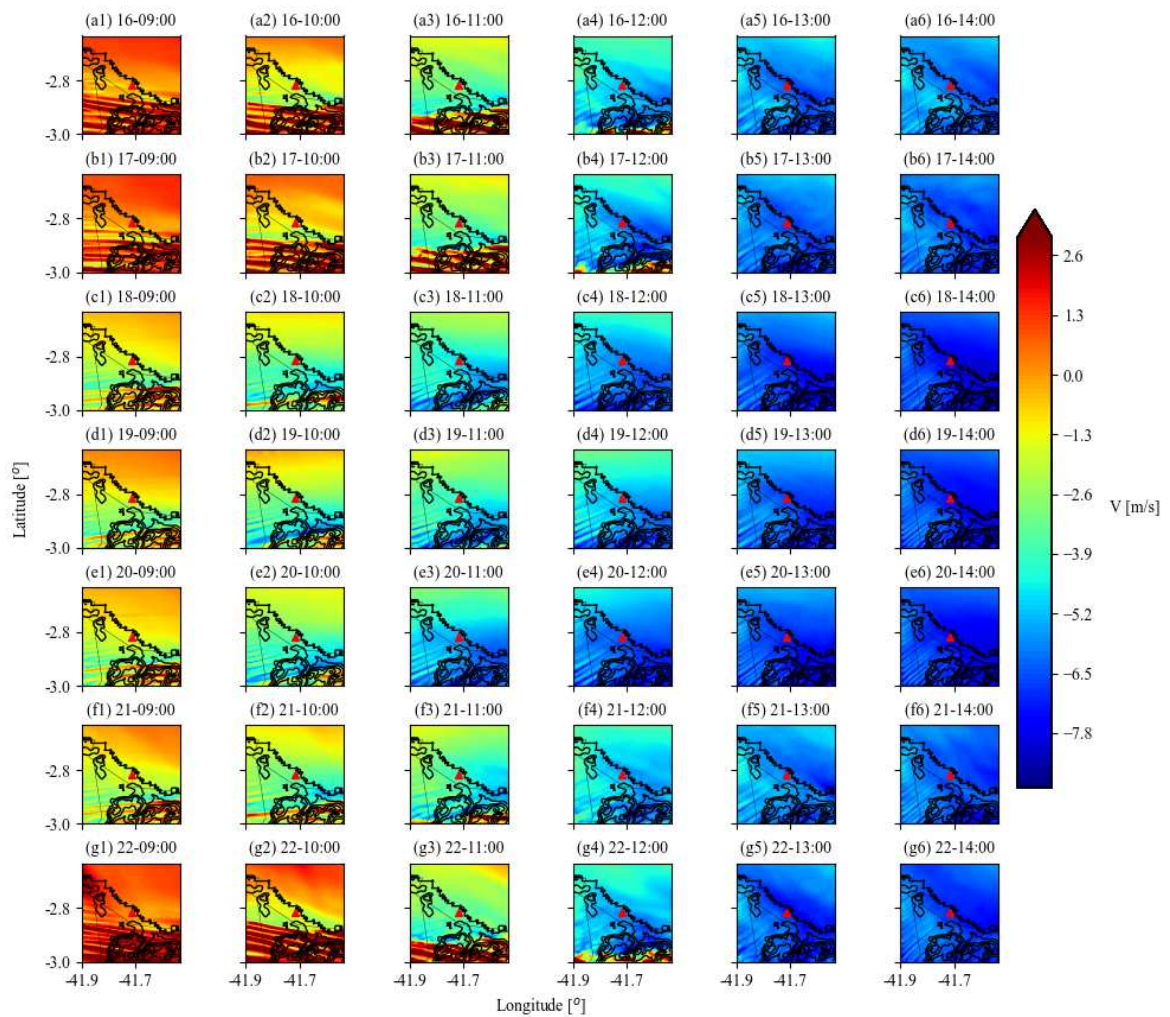


Figura 37: Análoga à Figura 36, para o mês de outubro.

É possível observar, para ambos as semanas e meses (Figuras 36 e 37) estruturas retilíneas sobre o continente. A princípio, sugere-se representar artefatos numérico uma vez que surgem próximos às bordas do domínio e na região da topografia gerando uma perturbação no escoamento. Entretanto, existe também a possibilidade de ser uma representação de um processo físico relacionado à formação de *cloud streets*, apesar do modelo não possui resolução para resolver padrões dessa magnitude. Dessa forma, para compreender esses padrões, sugere-se uma investigação mais detalhada do problema, o qual não foi o foco dessa dissertação.

### 5.4.3 Magnitude da Velocidade

A magnitude de velocidade representa uma importante variável para caracterização do recurso eólico costeiro e *offshore* uma vez que apresenta, de forma geral, intensidades e desaceleração do vento, bem como observações de esteiras. As Figuras 38 e 39 e Figuras 40 e 41 apresentam a magnitude de velocidade para as semanas dos meses de julho e outubro, respectivamente. Tanto durante o dia quanto durante a noite, a semana do mês de julho é marcada por ventos menos intensos quando comparada à mesma semana do mês de outubro.

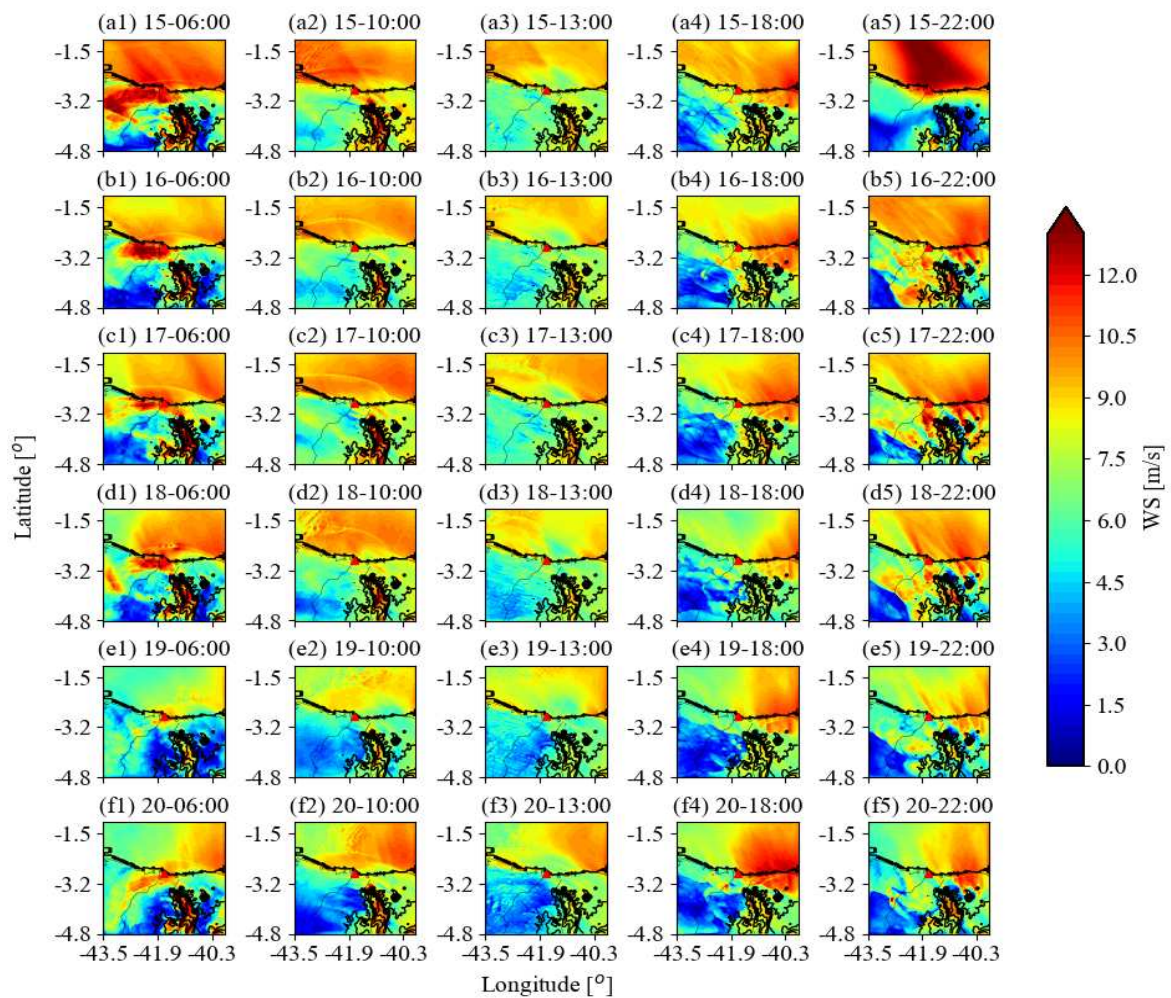


Figura 38: Representação espaço temporal da magnitude da velocidade do vento, à 100 m, no domínio D2 para a semana do mês de julho. O triângulo vermelho representa a localização do perfilador LiDAR instalado na UEPS. As linhas representam cada dia simulado e as colunas representam alguns instantes de tempo que ilustram o comportamento da magnitude da velocidade do vento ao contornar a Serra da Ibiapaba, durante o dia e noite.

Durante o dia, devido ao aquecimento da terra, há uma mistura entre as camadas superiores e inferiores que caracterizam a estabilidade atmosférica como instável. Devido a essa movimentação há a presença de maior turbulência e com isso a propagação dos ventos vindo do oceano em direção ao continente são prejudicados. De forma contrária, durante a noite, em que não há trocas de calores intensas entre terra e mar, a atmosfera é caracterizada como estável e os ventos de grande escala que vem da direção sudeste conseguem adentrar ao continente com menos resistência.

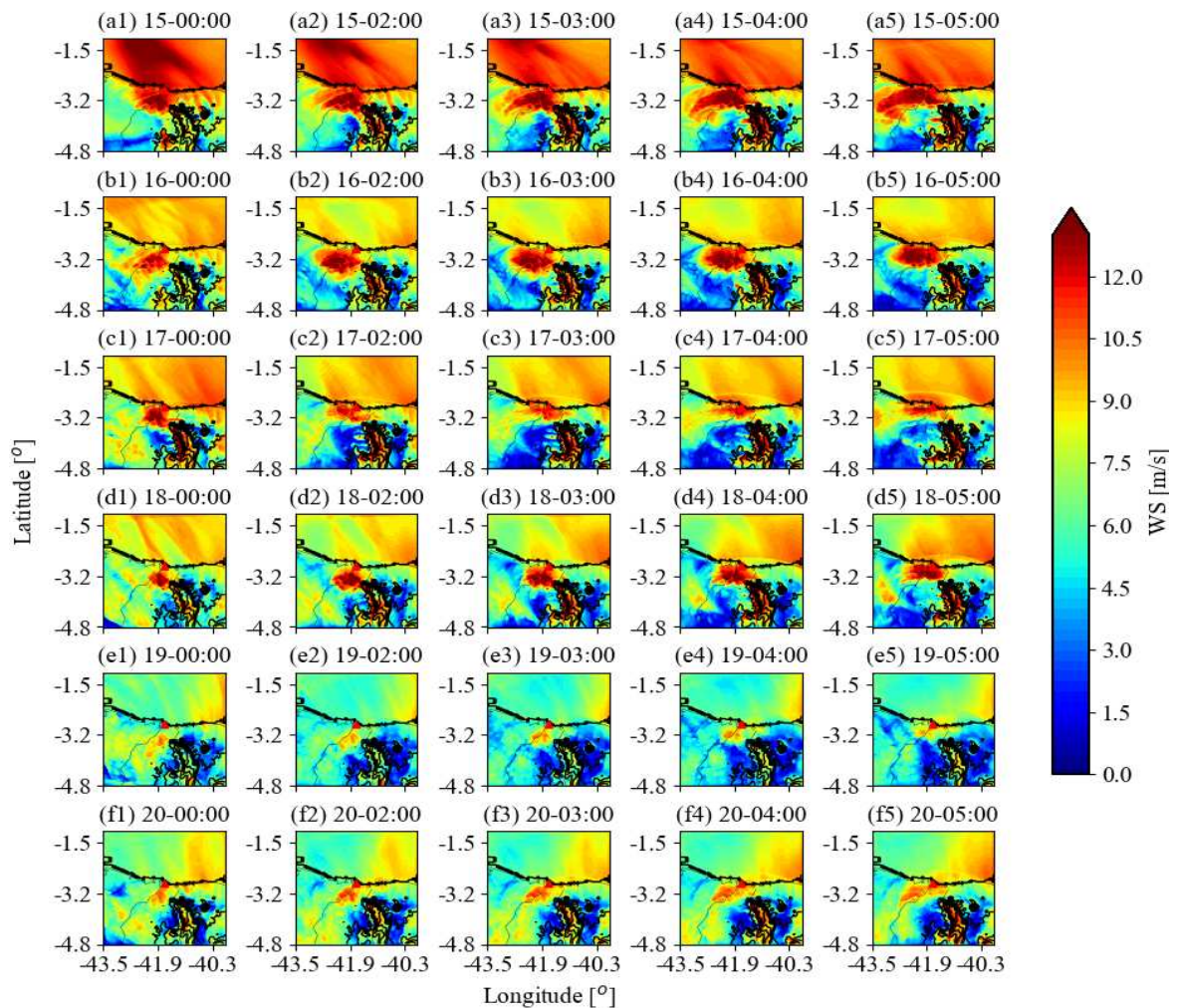


Figura 39: Análoga à Figura 38, para madrugada.

Outro aspecto importante a ser abordado é a influência da topografia na caracterização dos ventos na Usina Eólica de Pedra do Sal. A cerca de 80 km de distância da UEPS há a presença de uma cadeia de montanhas (Serra do Ibiapaba) onde o ponto mais alto se encontra a 954 m de altitude. Esse conjunto de montanhas influencia no bloqueio dos ventos vindos das

direções sul e sudeste. É possível observar, principalmente durante a madrugada e início da manhã, o contorno realizado pelo vento sobre a serra, fazendo que o vento que desvia da montanha siga o curso do rio Parnaíba, no vale da região. Devido às características dessa topografia, o vento ao superar esse obstáculo (a cadeia de montanhas) e seguir em direção ao curso do rio (região de vale) ganha velocidade e apresenta, durante a madrugada, magnitudes de velocidades de ventos superiores a ventos *offshore*.

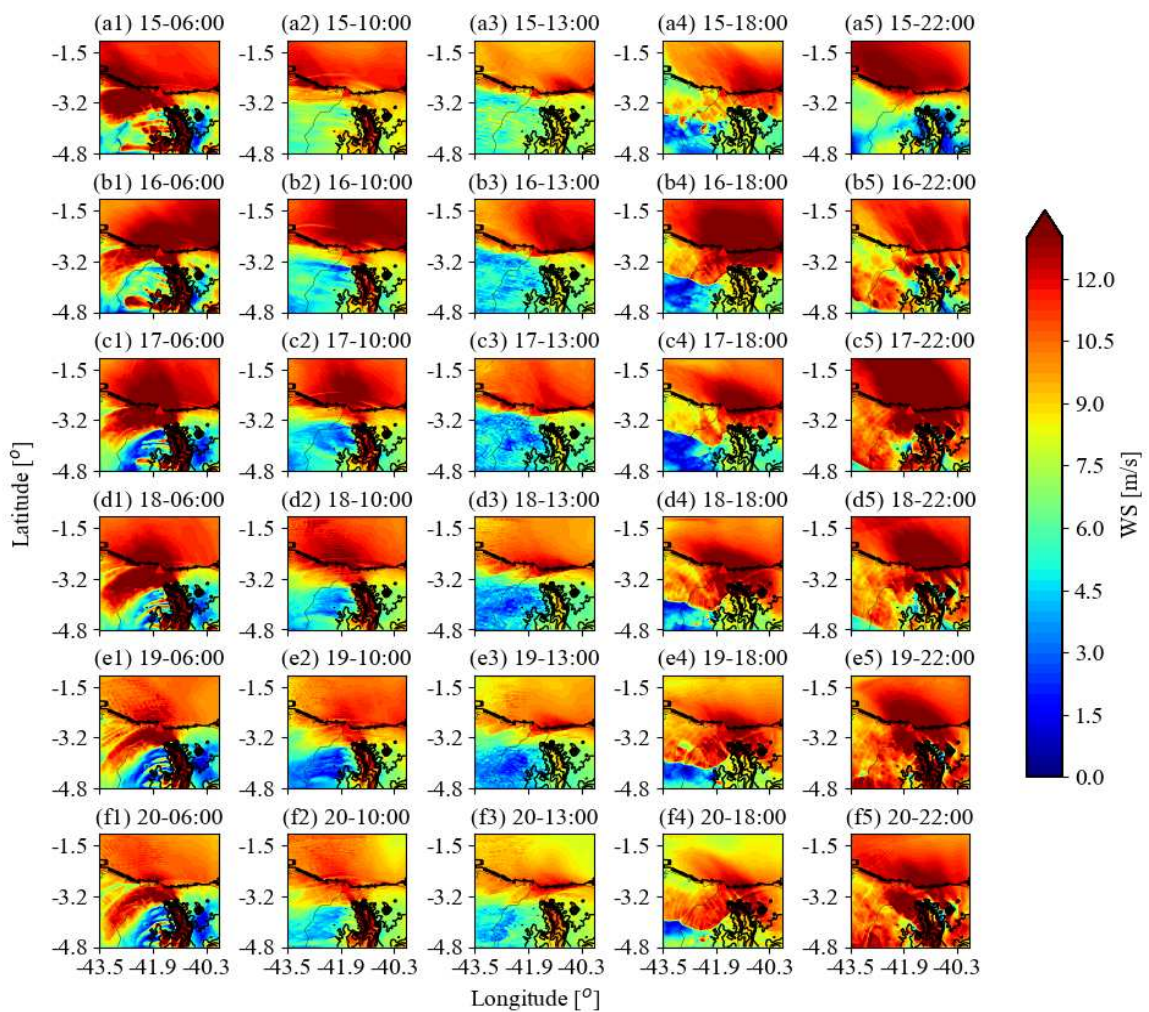


Figura 40: Representação espaço temporal da magnitude da velocidade do vento, à 100 m, no domínio D2 para a semana de outubro. O triângulo vermelho representa a localização do perfilador LiDAR instalado na UEPS. As linhas representam cada dia simulado e as colunas representam alguns instantes de tempo que ilustram o comportamento da magnitude da velocidade do vento ao contornar a Serra de Ibiapaba, durante o dia e noite.

Outro fator influenciador da magnitude de velocidade do vento local é a localização da ZCIT. A ZCIT é estabelecida devido ao encontro entre os alísios do hemisfério norte com os alísios do hemisfério sul (FERREIRA; MELLO, 2005). Sua posição não é estacionária e sua modulação anual ocorre conforme o movimento do sol, seguindo o hemisfério mais aquecido (LUTGENS; TARBUCK, 2014). A ZCIT apresenta variação de 14°N durante agosto-setembro e 2°S durante março e abril (CAVALCANTI *et al*, 2009). Na discussão sobre energia eólica, a ZCIT se faz importante, pois, sua posição influencia diretamente a velocidade do vento, (GRODSKY; CARTON, 2003). Portanto, quanto mais afastado a ZCIT estiver do local de interesse, mais forte a velocidade do vento deve ser (MACHUCA, 2019). Assim, no mês de julho, a proximidade da ZCIT com a UEPS contribui para o enfraquecimento do vento, enquanto no mês de outubro, devido ao afastamento da ZCIT com a UEPS, há um fortalecimento dos ventos.

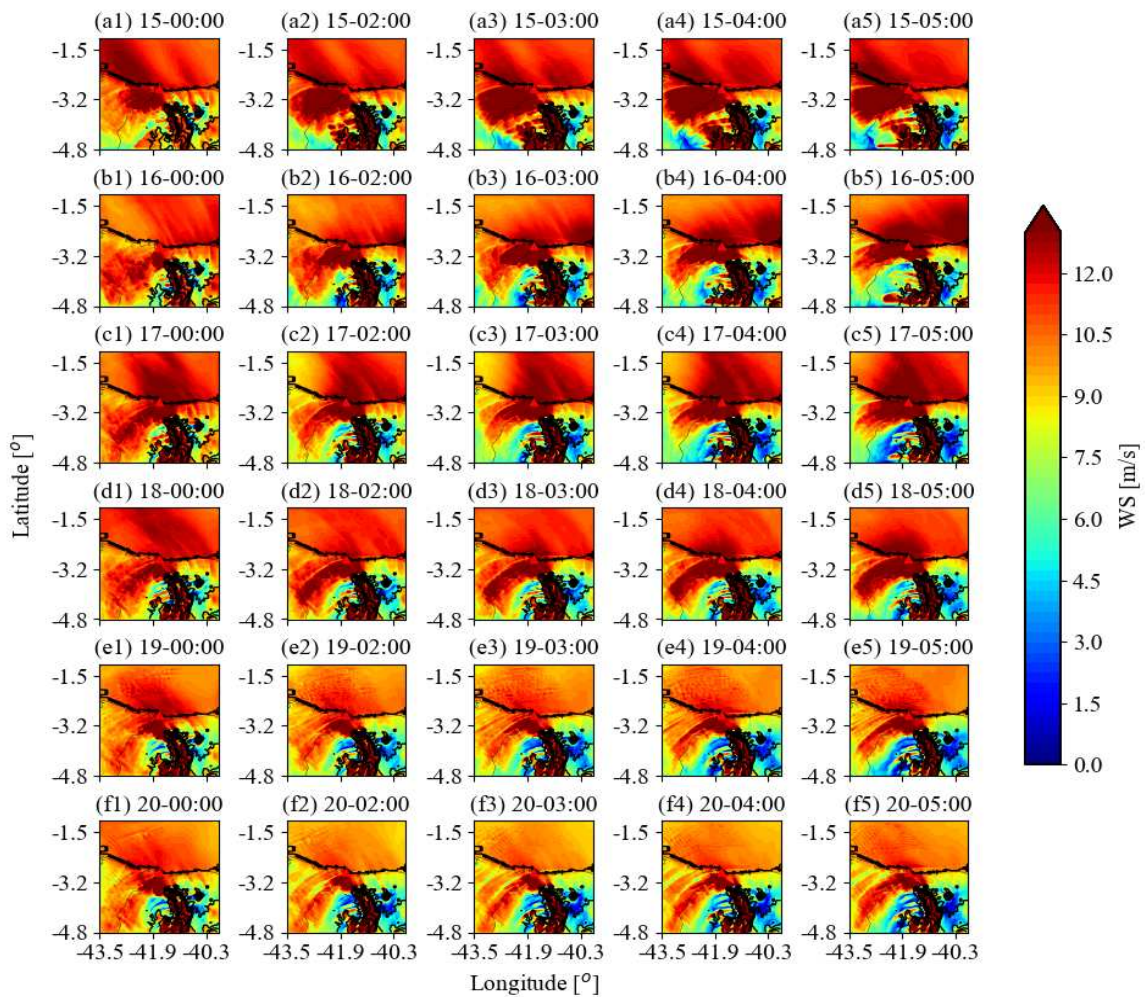


Figura 41: Análoga à Figura 40, para madrugada.

## 5.5 DISCUSSÕES

### 5.5.1 VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DO RECURSO EÓLICO OFFSHORE

Devido ao aumento significativo dos parques eólicos *offshore*, os gradientes horizontais de velocidade (produzidos por efeitos costeiros) podem causar grandes variações de velocidade de vento em um mesmo complexo eólico (SCHULZ-STELLENFLETH *et al.*, 2022). Fortes gradientes horizontais de temperatura causados, por exemplo, pela diferença de temperatura entre terra e mar, contribuem para a formação de grandes gradientes de velocidades do vento, podendo originar um alto cisalhamento do vento ao longo da altura das turbinas, afetando o desempenho de parques eólicos *offshore*.

As Figuras 42 e 43 apresentam um corte vertical ao longo do transecto (Figura 30), para o domínio D2, e representam a variabilidade do recurso eólico costeiro e *offshore* através do ciclo diário na região da Usina eólica de Pedra do Sal para as semanas dos meses de julho e outubro, respectivamente. A linha vermelha pontilhada demarca a linha da costa.

Para a semana de julho, é possível verificar que os gradientes horizontais do vento sobre o oceano são menores que em terra (Figura 42). Em locais longe da costa, para dentro do continente, é possível visualizar uma variabilidade temporal de cerca de 7 m/s durante o ciclo diário. Acima da lâmina d'água, essa variação é cerca de 4 m/s. Um comportamento semelhante é observado em outubro, porém em maior magnitude (Figura 43). Em locais longe da costa, para dentro do continente, a variação no ciclo diário de velocidade é cerca de 9 m/s e acima da lâmina d'água cerca de 3 m/s. Sobre o continente, tanto para semana de julho quanto de outubro, observa-se que as maiores velocidades do vento ocorrem durante a madrugada. Para ambas as semanas, a menor velocidade do vento é encontrada durante o período de circulação de brisa, sendo de 12-17 h para o mês de julho e um pouco mais cedo para o mês de outubro, entre 10-15 h. Sobre o oceano, o mês de julho apresenta as máximas velocidades também durante a madrugada para toda extensão do transecto, ao passo que para o mês de outubro, a máxima velocidade muda de horário à medida que se afasta da costa. Em outubro, próximo à costa, velocidades da ordem de 13 m/s são registradas durante a madrugada. À medida que se distancia da costa, a velocidade máxima é encontrada durante o período noturno.

Análises dessa natureza apresentam importância uma vez que podem contribuir para que empresas façam escolhas inteligentes por conhecerem os aspectos de seus parques. Por exemplo, uma empresa pode definir os planos de manutenção em suas turbinas conforme o



horário de menor produtividade de seu parque eólico. Para parques eólicos *onshore*, é nítido que a menor produtividade ocorre no início da tarde.

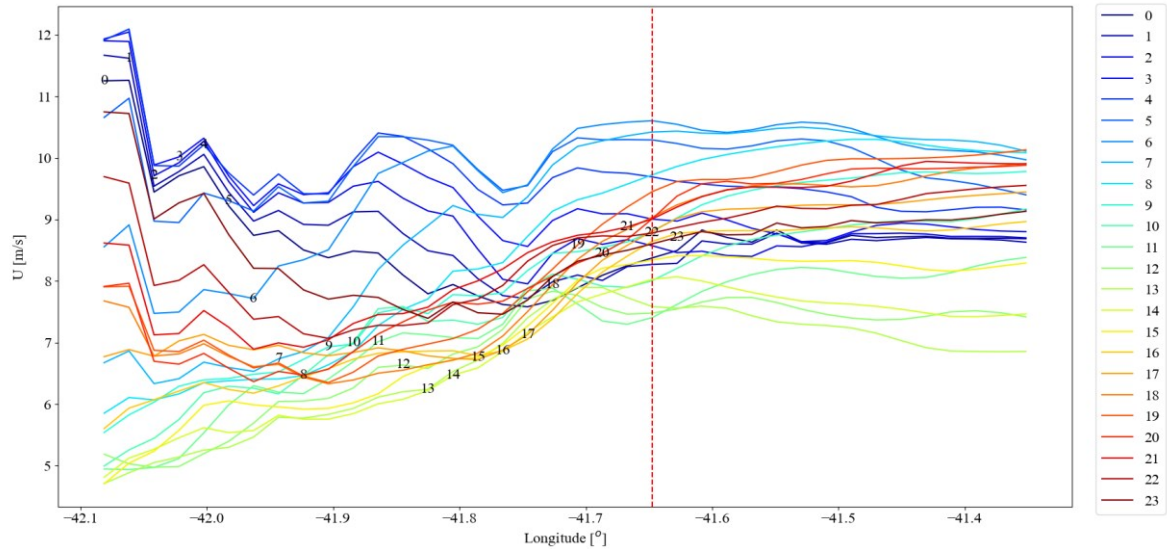


Figura 42: Seção vertical da componente  $U$  da velocidade do vento ao longo do transecto para o caso 3 e domínio D2, à 100 m. Ilustra o ciclo diário da componente  $U$  da velocidade média para a semana do mês de julho. A variação da variável  $U$  de velocidade representa a variabilidade do recurso eólico costeiro e *offshore* na região de Pedra do Sal. A linha pontilhada representa a transição da terra para o mar.

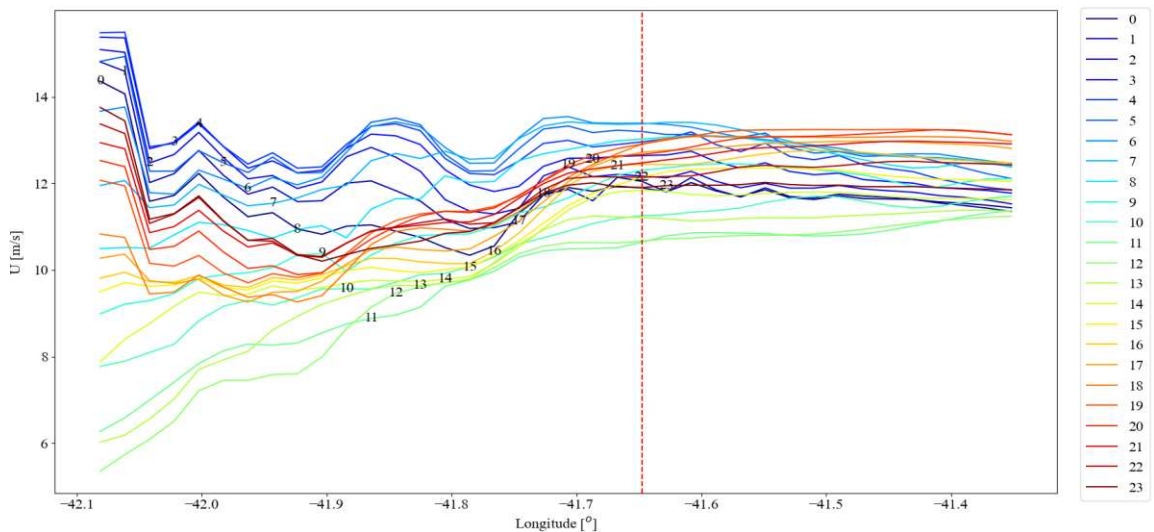


Figura 43: Análoga à Figura 42, para o mês de outubro.

A variabilidade do recurso eólico *offshore* no litoral do PI segue aspectos interessantes. Ventos fortes, cargas baixas em turbinas, uma vez que apresentam pouca variabilidade diurna, e ventos favoráveis próximo à costa são fatores animadores para a construção de futuros parques eólicos *offshore* no mar do PI.

No que segue a discussão sobre parques eólicos *offshore*, a diferença da variabilidade diurna da velocidade do vento entre condições *onshore* e *offshore* próximo à costa é muito semelhante. Essa constatação auxilia na escolha da melhor distância da costa para construção de futuros parques eólicos na região. De forma geral, estudos dessa categoria contribuem para ser possível otimizar o desempenho de parques eólicos tanto *onshore* como *offshore*, através da melhor escolha da localização do mesmo bem como do tipo de turbina a ser escolhida.

## 6 CONCLUSÃO

### 6.1 Contribuições

A transição energética requer o entendimento e a caracterização do vento em regiões promissoras ao desenvolvimento de parques eólicos *offshore*. O ambiente marítimo permite aliar simultaneamente o grande potencial eólico sobre a lâmina d'água com sua grande extensão livre de obstáculos tornando possível a construção de grandes parques eólicos. Apesar do seu rápido crescimento, o setor de energia eólica *offshore* ainda apresenta vários desafios científicos, tais como a caracterização do recurso eólico costeiro e *offshore* e a influência da circulação de brisa na composição dos ventos em regiões próximas à costa. Assim, o foco deste estudo foi a caracterização do recurso eólico costeiro e *offshore* a fim de se avaliar como o processo de circulação de brisa interfere na caracterização e nas componentes de velocidade dos ventos na região da Usina Eólica de Pedra do Sal (UEPS), situada no litoral do nordeste brasileiro, aplicando simulações atmosféricas de mesoescala do modelo WRF e dados experimentais de torre anemométrica e LiDAR.

A dissertação dividiu-se em duas partes. Na primeira parte do estudo, foram selecionadas duas semanas de dados: uma caracterizada por um período de ventos fortes (15 a 22 de outubro de 2013) e outra por ventos moderados (15 a 22 de julho de 2014), ambos escolhidos a fim de permitir a comparação com os dados de medição coletados pela torre anemométrica e pelo perfilador LiDAR. Escolhidos os períodos de análise buscou-se avaliar o desempenho do modelo WRF na caracterização dos ventos na região costeira e *offshore* do Estado do Piauí. Para isso, foram selecionadas quatro diferentes configurações de camada limite e diferentes resoluções para os níveis verticais. Concluído o estudo de sensibilidade e a validação com medições realizadas, a configuração MYNN para 41 níveis verticais foi selecionada, pois apresentou as melhores métricas estatísticas ao comparar dados de LiDAR e torre. Considerando os testes aqui realizados, pode-se concluir que o modelo apresentou dificuldades em representar a componente  $U$  da velocidade do vento, subestimando-a. Entretanto, apresentou um bom desempenho na caracterização da componente  $V$  da velocidade do vento, direção do vento e temperatura potencial. Esses aspectos foram observados em ambas as semanas.

Na segunda parte do estudo faz-se uma análise da variabilidade do recurso eólico costeiro e *offshore* da região permitindo uma compreensão sobre a interferência da circulação

de brisa dos ventos no litoral do PI. A região que contempla a UEPS apresenta predominância de ventos com característica *offshore*, influenciados pela combinação dos ventos alísios, de grande escala, com a brisa marítima, local. O vento predominante ocorre de leste/sudeste representando os ventos alísios. Para ambas as semanas, a maior magnitude de velocidade do vento ocorreu durante a madrugada. Neste período, o vento na UEPS apresenta velocidade superior à encontrada em ambientes *offshore*. Esse aspecto é influenciado por uma cadeia de montanhas localizadas ao sul do parque, que força o vento a desviar-se, ganhando velocidade ao contorná-la em direção ao curso do Rio Parnaíba. Assim, é evidente a influência da topografia na configuração dos ventos na região.

Após o nascer do sol, devido ao aquecimento desigual entre terra e mar, há a formação de um gradiente de pressão de mesoescala que gera um vento com direção do oceano para a plataforma continental, a brisa marítima. Durante o período da manhã (entre 6 h e 10 h) observa-se uma diminuição da magnitude de velocidade do vento na região próxima à costa. Além de fatores como a transição da brisa terrestre para a brisa marítima, essa diminuição de magnitude de velocidade ocorre também devido às características da topografia local, bem como ao aquecimento da plataforma continental, que influencia a transição de uma camada limite estável (noite) para uma camada limite de mistura (dia), sendo essa última mais turbulenta, pelos processos de convecção, a qual contribui para ventos menos intensos.

A brisa marítima apresenta altos valores de velocidade na componente  $V$  negativa entre 12 h e 16 h para a semana do mês de julho (7 m/s), e entre 11 h e 17 h para a semana do mês de outubro (8 m/s). Para outubro, além de apresentar valores superiores para a componente de velocidade  $V$  negativa, a presença de uma brisa mais intensa ocorre, também, devido à combinação de alta radiação solar e céu limpo, ou seja, a brisa marítima é mais acentuada durante o período de maior contraste térmico entre terra e mar (final da manhã até o meio da tarde). Aspectos que apresentam o início e desenvolvimento da brisa são representados através de um transecto vertical que contempla parte terra e parte mar, cruzando a coordenada do LiDAR presente na UEPS. É nítida a presença de um vento que sopra em direção ao continente em baixas altitudes e em direção ao mar em altas altitudes, confirmando, mais uma vez, a existência de circulação de brisa no local.

O recurso eólico é caracterizado por ventos com pouca variabilidade diurna em ambiente costeiro e *offshore* e sua variabilidade aumenta à medida que desloca-se em direção ao continente. Acima da lâmina d'água as velocidades máximas são observadas durante a madrugada, para o mês de julho, apresentando variabilidade de cerca de 4 m/s. Para o mês de

outubro, as máximas velocidades são encontradas durante a madrugada próximo à costa e, durante a noite, à medida que se afasta da costa, apresenta variabilidade de cerca de 3 m/s. Como esperado, devido ao processo de maior intensidade da circulação de brisa, as mínimas velocidades são observadas entre 11 h e 16 h, para ambas as semanas simuladas, tanto em ambiente *onshore* quanto *offshore*.

De forma geral, os objetivos da pesquisa foram alcançados. As principais conclusões são apresentadas a seguir:

- Um estudo de sensibilidade foi aplicado para o modelo WRF onde foram testadas quatro diferentes configurações de camada limite (YSU e MYNN 2.5 para camada limite planetária e similaridade Monin – Obukov e MYNN 2.5 para camada superficial), para cada par de configuração foram aplicados 41 e 61 níveis verticais. Para validar os modelos, foram utilizados dados de observações (LiDAR e torre anemométrica). Por meio de uma análise estatística, utilizando as métricas MAE e *Bias*, a configuração que melhor representou o comportamento dos ventos na região foi o caso\_03.

- Há uma predominância de ventos *offshore* na UEPS. As direções do vento variam de sudeste a leste e as condições locais são predominantemente influenciadas pelos ventos alísios e pela circulação de brisa local. As mínimas velocidades são verificadas no período de maior intensidade da brisa, ou seja, momento de maior radiação térmica, entre 10 h e 16 h. As máximas velocidades são encontradas durante a madrugada, e apresentam, sobre o continente, magnitudes de velocidades superiores às encontradas em ambiente *offshore*. Tal resultado atípico se deve à influência da topografia local que força o vento a desviar-se da cadeia de montanhas da Serra do Ibiapaba (com altitude 964 m), ganhando velocidade ao seguir em direção ao Rio Parnaíba, no vale da região.

- Os ventos locais apresentam variabilidade espaço-temporal distintas sobre a plataforma continental e o oceano. A variação é da ordem de 7 m/s para o mês de julho e 9 m/s para o mês de outubro, sobre o continente. Acima da lâmina d'água essa variação cai para 4 m/s e 3 m/s para os meses de julho e outubro, respectivamente. A circulação de brisa afeta a velocidade do vento para ambas as semanas, tanto *onshore* quanto *offshore*. Entretanto, prejudica de maneira mais acentuada, contribuindo para uma diminuição considerável da velocidade do vento, à medida que se desloca para dentro do continente. Independente da hora do dia, os ventos continentais são caracterizados por uma descontinuidade espaço-temporal expressiva como, por exemplo, a velocidade do vento, às 7 h para o mês de julho, varia de 6,5 m/s a 10 m/s, dependendo da localização geográfica. Ou mesmo o vento às 13 h para o mês de

outubro que varia de 6,5 m/s a 10 m/s, ocorrendo um aumento da sua velocidade à medida que se aproxima do mar. Uma das principais implicações desta investigação é que o melhor local para instalar turbinas tanto *onshore* quanto *offshore* pode depender muito da variabilidade espaço-temporal da magnitude da velocidade do vento. A maioria dos projetos de parques eólicos atualmente desenvolvidos, tem como principal preocupação a velocidade do vento total a longo prazo, minimizando os efeitos relativos à circulação de brisa (que podem diminuir significativamente a velocidade do vento) e a variabilidade diurna (gerando cargas nas turbinas) que influenciam fortemente o desempenho final dos parques eólicos. Essa discussão fornece informações relevantes, principalmente para complexos eólicos *offshore* que ainda não foram construídos e estão em fase de licenciamento ambiental.

## 6.2 Sugestão para trabalhos futuros

- 1) Investigação da influência da topografia na composição do regime de ventos em Pedra do Sal. O objetivo aqui seria realizar simulações de mesoescala desabilitando a função referente à topografia e observar a orientação dos ventos em Pedra do Sal.
- 2) Análises dos efeitos da circulação de brisa a longo prazo. O estudo abrangeria o efeito sazonal da circulação de brisa para entendimento do fenômeno sobre a perspectiva do desempenho de futuros parques eólicos *offshore* a serem construídos no mar do Piauí.
- 3) Explorar o problema relacionando a força de *Coriolis* com a convergência da brisa marítima local utilizando as tendências (variação de forças) disponibilizadas pelo modelo WRF. Aqui, sugere-se extrair as forças de gradiente de pressão e *Coriolis* a fim de calcular os vetores de cada força, a cada passo de tempo. Após quantificar cada força, é possível constatar a real influência da força de *Coriolis* na composição dos ventos na Usina Eólica de Pedra do Sal.
- 4) Considerar as temperaturas da água e do solo, como referência para as simulações numéricas, bem como mudanças climáticas e posicionamento da Zona de Convergência Intertropical.

## REFERÊNCIAS

AABEÓLICA. Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso: 10/2022.

AGUADO, E.; BURT, J. E. **Understanding weather and climate**. 7th ed. Glenview: Pearson, 2015.

AHSBAHS, T., BADGER, M., KARAGALI, I., & LARSÉN, X. G. Validation of Sentinel-1A SAR coastal wind speeds against scanning LiDAR. **Remote Sensing**, v. 9, n. 6, p. 552, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9060552>

AHRENS, C.D.; HENSON, R. **Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment**. 12. ed. Boston, USA: Cengage Learning, Inc, 2017.

ALCÂNTARA, C.R.; SOUZA, E.P. Uma teoria termodinâmica para brisas: testes utilizando simulações numéricas. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v.23, n.1, p.1-1. 1, março, 2008.

ALLAMILLOS, F. J. S.; VÁSQUEZ, D. P.; ARIAS, J. A. R.; FANEGO, V. L.; PESCADOR, J. T. (2013). *Analysis of WRF Model Wind Estimate Sensitivity to Physics Parameterization Choice and Terrain Representation in Andalusia (Southern Spain)*. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 52(7), 1592–1609 <doi:10.1175/jamc-d-12-0204.1>

ANEEL. **BIG – Banco de Informações de Geração**. Capacidade de geração do Brasil. 2022. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>. Acesso em: 10/2022.

ARYA, S. **Introduction to Micrometeorology**. [S.l.]: Academic Press, 2001. (International geophysics series). ISBN 9780120593545.

BARTHELMIE, R. J., BADGER, J., PRYOR, S. C., HASAGER, C. B., CHRISTIANSEN, M. B., & JØRGENSEN, B. H. (2007). *Offshore Coastal Wind Speed Gradients: Issues for the Design and Development of Large Offshore Windfarms*. **Wind Engineering**, 31(6), 369–382. DOI:10.1260/030952407784079762.

BODINI, N.; LUNDQUIST, J. K.; KIRINCICH, A. U.S. East Coast Lidar Measurements Show Offshore Wind Turbines Will Encounter Very Low Atmospheric Turbulence, **Geophysical Research Letters** 46 (10) (2019) 5582–5591. doi:10.1029/2019GL082636.

BRUNEL. OILANDGASJOBSEARCH. **Energy outlook 2021/22 report**. 2021. Disponível em: <https://hiring.oilandgasjobsearch.com/hubfs/2021%20Energy%20Outlook%20Report.pdf?hsLang=en>. Acesso: 07/2022.

BUSSONI, Caio Vinicius Alves; MOREIRA, Demerval Soares; MACHADO, Jeferson Prietsch. Avaliação do Modelo WRF para Aplicação de um índice de Previsão de Geada na Região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, p. 279-287, 2022.

CAMBAZOGLU, M. K.; BLAIN, C. H.; SMITH, T. A.; LINZELL, R. S. Relationships between wind predictions and model resolution over coastal regions. **Ocean Engineering**, v. 112, p. 97-116, jan. 2016.

CARVALHO, D. J. S. **Optimização do modelo numérico de previsão do tempo WRF no contexto de previsão e produção de energia eólica**. Dissertação Mestrado (Meteorology and Physical Oceanography) - Universidade de Aveiro, Portugal, 2009.

CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMEZ-ESTEIRCA, M.; SANTOS, C. A sensitivity study of the WRF model in wind simulation for an area of high wind energy. **Environmental Modelling & Software**, v. 33, p. 23-34, mar. 2012.

CARVALHO, D., ROCHA, A., GÓMEZ-GESTEIRA, M., & SILVA SANTOS, C. (2014). *Sensitivity of the WRF model wind simulation and wind energy production estimates to planetary boundary layer parameterizations for onshore and offshore areas in the Iberian Peninsula*. **Applied Energy**, 135, 234–246. doi:10.1016/j.apenergy.2014.08.082.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G.A.J.; DIAS, M. A. F. S. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CHEN, Fei; DUDHIA, Jimy. Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 1, p. 569–585, 2001.  
DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2).

COIFFIER, J. **Fundamentals of numerical weather prediction**. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

COIMBRA, Isadora Lima. **Investigation of a coastal wind farm at northeast Brazil using the WRF model**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2018.

EIA. U.S. Energy Information Administration. **Annual energy outlook 2017**. 2017. Disponível em: [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2022\\_Narrative.pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2022_Narrative.pdf). Acesso: 09/2022.

EMEIS, S. **Wind energy meteorology**. Atmospheric physics for wind power generation. Berlin: Springer, 2013.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço COVID-19. Impactos nos mercados de energia no Brasil, 1º Semestre de 2020. Disponível em: [epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-500/Balanco\\_Covid-19%20rev.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-500/Balanco_Covid-19%20rev.pdf). Acesso: 08/2022.



EPE. **Balço energético nacional 2020**. Empresa, de Pesquisa Energetica EPE. Brazilian Energy Balance 2020-year 2019. Disponível em: [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:52083434](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:52083434). Acesso: 07/2022.

EPEa. **Balço energético nacional 2017**. Relatório síntese – ano base 2016. 2017. Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/S%c3%adntese%20do%20Relat%c3%b3rio%20Final\\_2017\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%c3%adntese%20do%20Relat%c3%b3rio%20Final_2017_Web.pdf) Acesso: 06/2022.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. da S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, Associação Brasileira de Climatologia, 2005.

FERREIRA, A. P.; CASTANHEIRA, J. M.; ROCHA, A.; FERREIRA, J. Estudo de sensibilidade das previsões de superfície em Portugal pelo WRF face à variação das parametrizações físicas. **XXX Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española**, Zaragoza, 2008.

FOKEN, T. **Micro-meteorology**. Berlin: Springer, 2008.

GAHMBERG, MARTIN; SAVIJÄRVI, HANNU; LESKINEN, MATTI. The influence of synoptic scale flow on sea breeze induced surface winds and calm zones. **Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography**, v. 62, n. 2, p. 209-217, 2010.

GIANNAKOPOULOU, Evangelia-Maria; NHILI, Regis. WRF model methodology for offshore wind energy applications. **Advances in Meteorology**, v. 2014, 2014.

GIEBEL, G.; BROWNSWORD, R.; KARINIOTAKIS, G.; DENHARD, M.; DRAXL, C. The state-of-the-art in short-term prediction of wind power: A literature overview. **Anemos .plus**, jan. 2011.

GOIT, Jay Prakash; YAMAGUCHI, Atsushi; ISHIHARA, Takeshi. Measurement and prediction of wind fields at an offshore site by scanning Doppler LiDAR and WRF. **Atmosphere**, v. 11, n. 5, p. 442, 2020.

GONÇALVES, J. CORREA, M. RADUNZ, W. PASSOS, J. SAKAGAMI, Y. Simulação de mesoescala de ventos com características offshore utilizando observações de LiDAR em um parque eólico costeiro no nordeste brasileiro. **IX Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Florianópolis. 2022.

GRODSKY, S.A.; CARTON, J.A. The intertropical convergence zone in the South Atlantic and the equatorial cold tongue. **Journal of Climate**, v. 16, p. 723-733, 2003.

GWEC. **Global Wind Report**. Global Wind Energy Council. Disponível em: [https://gwec.net/wp-content/uploads/2022/04/Annual-Wind-Report-2022\\_screen\\_final\\_April.pdf](https://gwec.net/wp-content/uploads/2022/04/Annual-Wind-Report-2022_screen_final_April.pdf). Acesso: 03/2022.

HAHMANN, Andrea N. et al. The making of the New European Wind Atlas–part 1: model sensitivity. **Geoscientific model development**, v. 13, n. 10, p. 5053-5078, 2020.

HALLGREN, C., J. ARNQVIST, S. IVANELL, H. KÖRNICH, V. VAKKARI, E. SAHLÉE, 2020: Looking for an *offshore* lowlevel jet champion among recent reanalyses: a tight race over the Baltic Sea. – **Energies** 13, 3670 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

HAN, B. S., KWAK, K. H., HAHM, J. H., & PARK, S. B. Performance Evaluation of Planetary Boundary Layer Schemes in Simulating Structures of Wintertime Lower Troposphere in Seoul Using One-Hour Interval Radiosonde Observation. **Applied Sciences**, v. 12, n. 13, p. 6356, 2022.

HARIPRASAD, K. B. R. R., SRINIVAS, C. V., SINGH, A. B., RAO, S. V. B., BASKARAN, R., & VENKATRAMAN, B. Numerical simulation and intercomparison of boundary layer structure with different PBL schemes in WRF using experimental observations at a tropical site. **Atmospheric Research**, v. 145, p. 27-44, 2014.

HASAGER, C. B. *et al.* Remote Sensing Observation Used in *Offshore* Wind Energy. Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing, **Roskilde**, p.67-79, mar. 2008.

HASS, R.; SAKAGAMI, Y.; SANTOS, PAA.; PASSOS, JC; FF TAVEZ. Influencia de fenômenos climáticos no desempenho de dois parques eólicos, em: **VII CITENEL - Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, Foz do Iguaçu, 2013, p. 10.

HERSBACH, Hans *et al.* 2020. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999–2049. ISSN 1477870X. DOI: 0.1002/qj.3803.

HONG, Song-You; DUDHIA, Jimy; CHEN, Shu-Hua. A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation. **Monthly Weather Review**, v. 132, n. 1, p. 103–120, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2)

HSU, S. Coastal air-circulation system: observations and empirical model. *Monthly Weather Review*. 98, 487-509. 1970.

HSU, S.-A. **Coastal Meteorology**. [S.l.]: Academic Press, 1988. (International Geophysics Series). ISBN 9780123579553.

IBAMA. **Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis**. Mapas de projetos em licenciamento – Complexos Eólicos Offshore. Licenciamento Ambiental Federal de Complexos Eólicos Offshore. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/laf/consultas/mapas-de-projetos-em-licenciamento-complexos-eolicos-offshore>. Acesso: 08/2022

IEA. **International Energy Agence**. <https://www.iea.org/>. Acesso: Agosto, 2022.

IEA; IRENA; UNSD; WB; WHO. Tracking SDG 7: **The Energy Progress Report**; World Bank: Washington, DC, USA, 2022.

IEAb. **Global Energy Review 2021**. Assessing the Effects of economic recoveries on global energy demand and CO<sub>2</sub> emission in 2021. Intertational Energy Agence. 2022.

IEAc. **Global Energy Review: CO<sub>2</sub> Emissions in 2021**. Global emissions rebound sharply to highest ever level. Intertational Energy Agence. 2022.

<<https://iea.blob.core.windows.net/assets/c3086240-732b-4f6a-89d7-db01be018f5e/GlobalEnergyReviewCO2Emissionsin2021.pdf>>. Acesso: Nov. 2022.

IRENA, Organised; DESA, U. N. **International Renewable Energy Agency**. A new world: The geopolitics of the energy transformation. 2019.

IRENA. **REthinking energy 2017**. 2017. Available in: <[http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA\\_REthinking\\_Energy\\_2017.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_REthinking_Energy_2017.pdf)>. Accessed in: mar. 2017.

JACOBSEN, S., LEHNER, S., HIERONIMUS, J., SCHNEEMANN, J., & KÜHN, M. Joint offshore wind field monitoring with spaceborne SAR and platform-based Doppler LIDAR measurements. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 40, n. 7, p. 959, 2015.

JAIN, P. **Wind energy engineering**. New York: Mc Graw Hill, 2010.

KALNAY, E. Atmospheric modeling, data assimilation and predictability. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

KALVERLA, P.C., J.B. DUNCAN JR, G.J. STEENEVELD, A.A. HOLTSLAG. 2019: Low-level jets over the North Sea based on ERA5 and observations: together they do better. – **Wind Energy Science** 4, 193–209 Publisher: Copernicus GmbH.

KIM, D., KIM, T., OH, G., HUH, J., & KO, K. (2016). *A comparison of ground-based LiDAR and met mast wind measurements for wind resource assessment over various terrain conditions*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 158, 109–121. doi:10.1016/j.jweia.2016.09.011.

KORACIN, DARKO *et al.* A review of challenges in assessment and forecasting of wind energy resources. **Hrvatski meteorološki časopis**, v. 47, n. 47, p. 13-33, 2012.

KORACIN, D R. G. BELU, K. HORVATH, B. CANDILLAS, AND J. JIANG. “A review of challenges in assessment and forecasting of wind energy resources,” **Croatian Meteorological Journal**. In press. 2014.

LACIS, A. A.; HANSEN, J. E. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth’s atmosphere. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 31, n. 1, p. 118–133, 1974.

LANDBERG, L. **Meteorology for wind energy**. An introduction. Chichester: Wiley, 2016.

LEE J., ZHAO F., **Gobal Wind Report 2021**, Global Wind Energy Council (2021) 75. Disponível em: <http://www.gwec.net/global-figures/wind-energy-global-status/>. Acesso: Nov. 2022.

LIRA, M. A. T.; NETO, J. M. M.; LOIOLA, J. V. L.; SILVA, E. M.; ALVES, J. M. B. Caracterização do regime de ventos no Piauí para o aproveitamento de energia eólica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 1, p. 77-88, 2017.

LUTGENS, K.F.; TARBUCK, E.J. **The atmosphere: an introduction to meteorology**. 13 ed. New Jersey, USA: Pearson Education, Inc., 2014.

MACHUCA, M. N. **Influence of large-scale atmospheric systems on morrinhos wind farm, Bahia-Brazil**. 2019. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/215548>.

MAPA TOPOGRÁFICO DO PIAUÍ. <https://pt-br.topographic-map.com/map-mq5gt/Piau%C3%AD/?center=-3.9081%2C-41.19873&zoom=8&popup=-3.40924%2C-37.69684>. Acesso: 03/2023

MARZIN, C., RAHMAT, R., BERNIE, D., BRICHENO, L., BUONOMO, E., CALVERT, D. & ZHANG, S. (2015). Singapore's second national climate change study–phase 1. *E. Met Office, Uk, Centre for Climate Research Singapore, S., National Oceanography Centre, L., UK, Csiro, A. & Newcastle University, N., UK (ed)*.

MASSON-DELMOTTE, Valérie *et al*. Climate change 2021: the physical science basis. **Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**, p. 2, 2021.

MEDEIROS, L. E., FISCH, G., ACEVEDO, O. C., COSTA, F. D., IRIART, P. G., ANABOR, V., & SCHUCH, D. (2021). Low-Level Atmospheric Flow at the Central North Coast of Brazil. **Boundary-Layer Meteorology**, 180(2), 289-317.

MILLER BARRY D. KEIM, ROBERT W. TALBOT; MAO, HUITING. Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts. **Reviews of Geophysics**, v. 41, n. 3, 2003. ISSN 87551209. DOI: <https://doi.org/10.1029/2003RG000124>.

MLAWER, Eli J. *et al*. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. d14, p. 16663–16682, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1029/97JD00237>.

MURTHY, K. S. R., & RAHI, O. P. (2017). A comprehensive review of wind resource assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 1320-1342, 2017.

MURDOCK, Hannah E. *et al*. **Renewables 2021-Global status report**. 2021.

MUSIAL, W., SPITSEN, P., DUFFY, P., BEITER, P., MARQUIS, M., HAMMOND, R., & SHIELDS, M. (2022). **Offshore Wind Market Report: 2022 Edition** (No. NREL/TP-5000-83544). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

NAKANISHI, Mikio; NIINO, Hiroshi. An Improved Mellor–Yamada Level-3 Model: Its Numerical Stability and Application to a Regional Prediction of Advection Fog.

**Boundary-Layer Meteorology**, Elsevier Ltd, v. 119, p. 397–407, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10546-005-9030-8>.

NASA. **National Aeronautics and Space Administration**. Earth Observatory. Incoming Sunlight. Disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance/page2.php>. Acesso: 04/2022.

NASSIF, F. B., PIMENTA, F. M., D'AQUINO, C. D. A., ASSIREU, A. T., GARBOSSA, L. H. P., & PASSOS, J. C.. Costal Wind Measurements and Power Assessment Using a LIDAR on a Pier. **Revista Brasileira de Meteorologia**. V.35, n. 2, 255-268, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786351007>, 2020.

NJUKI, SAMMY M.; MANNAERTS, CHRIS M.; SU, ZHONGBO. Influence of planetary boundary layer (PBL) parameterizations in the weather research and forecasting (WRF) model on the retrieval of surface meteorological variables over the Kenyan highlands. **Atmosphere**, v. 13, n. 2, p. 169, 2022.

ORLANSKI, I.; A Rational Subdivision Of Scales for Atmospheric Process. *Bull. Amer. Meteorol.*, 1975.

ORTIZ, G. P.; KAMPEL, M. Potencial de energia eólica offshore na margem do Brasil. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. V simpósio Brasileiro de Oceanografia, Santos, 2011.**

PAULIAC, R. WINDCUB, **User's Manual**. NRG Systems. Global Partners in LiDAR Wind Technologies. Novembro, 2009.

PEDRUZZI, Rizzieri et al. Update of land use/land cover and soil texture for Brazil: Impact on WRF modeling results over São Paulo. **Atmospheric Environment**, v. 268, p. 118760, 2022.

PEÑA, A., HASAGER, C. B., GRYNING, S.-E., COURTNEY, M., ANTONIOU, I., & MIKKELSEN, T. (2009). Offshore wind profiling using light detection and ranging measurements. **Wind Energy**, 12(2), 105–124. doi:10.1002/we.283

PIMENTA, F. M., SILVA, A. R., ASSIREU, A. T., ALMEIDA, V. D. S. E., & SAAVEDRA, O. R. Brazil offshore wind resources and atmospheric surface layer stability. **Energies**, v. 12, n. 21, p. 4195, 2019.

RADÜNZ, W. C; SAKAGAMI, S; HAAS, R; PASSOS, J. C; MIQUELETTI, M; DIAS, E. **Computational fluid dynamics for wind farm performance assessment in complex terrain**. 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Online, 2020.

RADÜNZ, William Corrêa **Influência da estabilidade atmosférica e de jatos noturnos no desempenho de parques eólicos em terrenos complexos**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2022.

RAJESWARI, J. R., SRINIVAS, C. V., MOHAN, P. R., & VENKATRAMAN, B. (2020). Impact of Boundary Layer Physics on Tropical Cyclone Simulations in the Bay of

Bengal Using the WRF Model. **Pure and Applied Geophysics**, 177(11), 5523–5550. doi:10.1007/s00024-020-02572-3

ROTUNNO, R. CURRY, J.A.; FAIRALL, C. W.; FRIEHE, C. A.; OVERLAND, J. E.; PIELKE, R. A.; ROGERS, D. P.; STAGE S. A. Coastal meteorology. A review of the state of the science. Washington: **National Academy Press**, 1992.

SAKAGAMI, Y.; SANTOS, P A; HAAS, R; PASSOS, J C; TAVES, F F. Estudo da estabilidade atmosférica em Parques Eólicos. **Ciência e Natura**, v. 35, p. 417-419, 2013. DOI: 10.5902/2179460X11687.

SAKAGAMI, Y.; SANTOS, P. A. HAAS, R.; PASSOS J. C.; TAVES, F.F. Effects of turbulence wind shear wind veer and atmospheric stability on power performance: a case study in Brazil. **Proceeding EWEA Conference**. Paris, 2015.

SAKAGAMI, YOSHIAKI. **Influência da turbulência e do perfil de velocidade do vento no desempenho de aerogeradores em dois parques eólicos na costa no nordeste brasileiro**. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2017. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/188968>.

SAKAGAMI, Y., RADUNZ, W.C., Santos, P.A.A., HAAS, R., Passos, J.C., TAVES, F.F. Power curve performance of coastal turbines subject to low turbulence intensity offshore winds. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 45, p. 1-17, 2023

SALVAÇÃO, N.; GUEDES SOARES, C. Resource assessment methods in the offshore wind energy sector. In: **Floating Offshore Wind Farms**. Springer, Cham, 2016. p. 121-141. doi:10.1007/978-3-319-27972-5\_7

SALVADOR, N.; LORIATO, A.G.; SANTIAGO, A.; ALBUQUERQUE, T.T.A.; REIS JR., N.C.; SANTOS, J.M.; LANDULFO, E.; MOREIRA, G.; LOPES, F.; HELD, G.; MOREIRA, D.M. Study of the thermal internal boundary layer in sea breeze conditions using different parameterizations: application of the WRF model in the greater Vitória region. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, p. 593-609, 2016.

SANTOS ATS, SANTOS E SILVA CM, LEMOS DF, OLIVEIRA LL, BEZERRA LAC. 2016. Assessment of wind resources in two parts of Northeast Brazil with the use of numerical models. **Meteorological Applications**. DOI:10.1002/met.1595.

SANTOS, Pedro; PEÑA, Alfredo; MANN, Jakob. Flux-gradient relation and atmospheric wind profiles—an exploration using WRF and LiDARs. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2020. p. 032032.

SANZ RODRIGO, Javier; CHURCHFIELD, Matthew; KOSOVIC, Branko. A methodology for the design and testing of atmospheric boundary layer models for wind energy applications. **Wind Energy Science**, v. 2, n. 1, p. 35–54, 2017. ISSN 2366-7451. DOI: 10.5194/wes-2-35-2017.

SCHULZ-STELLENFLETH, J *et al.* Coastal Impacts on Offshore Wind Farms—A Review Focussing on the German Bight Area. *Meteorol. Z.* 2022, 31, 289–315  
DOI: 2022 10.1127/metz/2022/1109. 2022.

SCHNEEMANN, J., HIERONIMUS, J., JACOBSEN, S., LEHNER, S., & KÜHN, M. (2015, June). Offshore wind farm flow measured by complementary remote sensing techniques: radar satellite TerraSAR-X and lidar windscanners. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 625, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.

SHU, Z. R., LI, Q. S., HE, Y. C., & CHAN, P. W. (2016). Observations of offshore wind characteristics by Doppler-LiDAR for wind energy applications. *Applied Energy*, 169, 150–163. doi:10.1016/j.apenergy.2016.01.135.

SILVA, A.R.; PIMENTA, F.M.; ASSIREU, A.T.; SPYRIDES, M.H.C. Complementarity of Brazil's hydro and offshore wind power. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 56, 413–427.

SKAMAROCK, W. C.; CO-AUTHORS. **Description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR).** [S.l.], 2008. p. 26. DOI: <http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH>.

SLINGER, C. HARRIS, M. **Introduction to continuous-wave Doppler LiDAR ZephIR Ltd.**, Natural Power, The Old Barns, Fair Oaks Farm. Hollybush, Nr. Ledbury HR8 1EU, U.K, 2012.

STANGROOM, P. ; **“CFD Modelling of Wind Flow Over Terrain”**; Thesis submitted to The University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy 2004.

STEELE, C. J., DORLING, S. R., VON GLASOW, R., & BACON, J. (2015). Modelling sea-breeze climatologies and interactions on coasts in the southern North Sea: implications for offshore wind energy. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 141, n. 690, p. 1821-1835, 2015.

STULL, Roland. **Practical Meteorology - An Algebra-based Survey of Atmospheric Science.** [S.l.]: University of British Columbia, 2015. p. 938. ISBN 978-0-88865-176-1. DOI: 10.14288/1.0300441

STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology.** The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1988.

TAVARES, L. F., SHADMAN, M., ASSAD, L. P., & ESTEFEN, S. F. (2022). Influence of the WRF model and atmospheric reanalysis on the offshore wind resource potential and cost estimation: A case study for Rio de Janeiro State. *Energy*, 240, 122767.

UNITED NATIONS. **Paris Agreement: Framework Convention on Climate Change.** [S.l.]: United Nations Treaty Collection, Chapter XXVII 7. d, 2015. (International geophysics series). Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>.

VEERS, P., DYKES, K., BASU, S., BIANCHINI, A., CLIFTON, A., GREEN, P., HOLTINEN, H., KITZING, L., KOSOVIC, B., LUNDQUIST, J. K., MEYERS, J.,

O'MALLEY, M., SHAW, W. J., AND STRAW, B.: Grand Challenges in the Design, Manufacture, and Operation of Future Wind Turbine Systems. **Wind Energy Science Discussions**, p. 1-102, 2022. DOI: 10.5194/wes-2022-66

VEERS, P., DYKES, K., LANTZ, E., BARTH, S., BOTTASSO, C. L., CARLSON, O., CLIFTON, A., GREEN, J., GREEN, P., HOLTTINEN, H., LAIRD, D., LEHTOMÄKI, V., LUNDQUIST, J. K., MANWELL, J., MARQUIS, M., MENEVEAU, C., MORIARTY, P., MUNDUATE, X., MUSKULUS, M., NAUGHTON, J., PAO, L., PAQUETTE, J., PEINKE, J., ROBERTSON, A., SANS RODRIGO, J., SEMPREVIVA, A. M., SMITH, J. C., TUOHY, A., AND WISER, R.: Grand challenges in the science of wind energy, **Science**, 366(6464), 1–17, DOI: 10.1126/science.aau2027, 2019.

VEERS, Paul *et al.* Grand Challenges: Wind energy research needs for a global energy transition. **Wind Energy Science Discussions**, 1-8. DOI: 10.5194/wes-2022-66. 2022.

VOLKER, P.J.H., J. BADGER, A.N. HAHMANN, S. OTT, 2015: The explicit wake parametrisation v1.0: a wind farm parametrisation in the mesoscale model WRF. – **Geoscientific Model Development** 8, 3715–3731, DOI: 10.5194/gmd-8-3715-2015.

WALLACE, John M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric science: an introductory survey**. Elsevier, 2006.

WANG, X.; GUO, P.; HUANG, X. A review of wind power forecasting models. **Energy Procedia**, v. 12, p. 770-778, 2011.

WARNER, T. **Numerical weather and climate prediction**. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

WISER, RYAN *et al.* Expert elicitation survey predicts 37% to 49% declines in wind energy costs by 2050. **Nature Energy**, v. 6, n. 5, p. 555-565, 2021.

WITHA, BJÖRN, HAHMANN, ANDREA, SILE, TIJA, DÖRENKÄMPER, MARTIN, EZBER, YASEMIN, GARCÍA-BUSTAMANTE, ELENA, GONZÁLEZ-ROUCO, J. FIDEL, LEROY, GRÉGOIRE, & NAVARRO, JORGE. (2019). WRF model sensitivity studies and specifications for the NEWA mesoscale wind atlas production runs. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2682604>.

YNOUE, RITA YURI ET AL. **Meteorologia: noções básicas**. Oficina de Textos, 2017.

ZHANG, M.H. **Wind resource assessment and micro-siting: science and engineering**. Primeira. Singapore: Wiley, 2015.



APÊNDICE A - MAPAS DE EVOLUÇÃO  
TEMPORAL PARA O DOMÍNIO D2

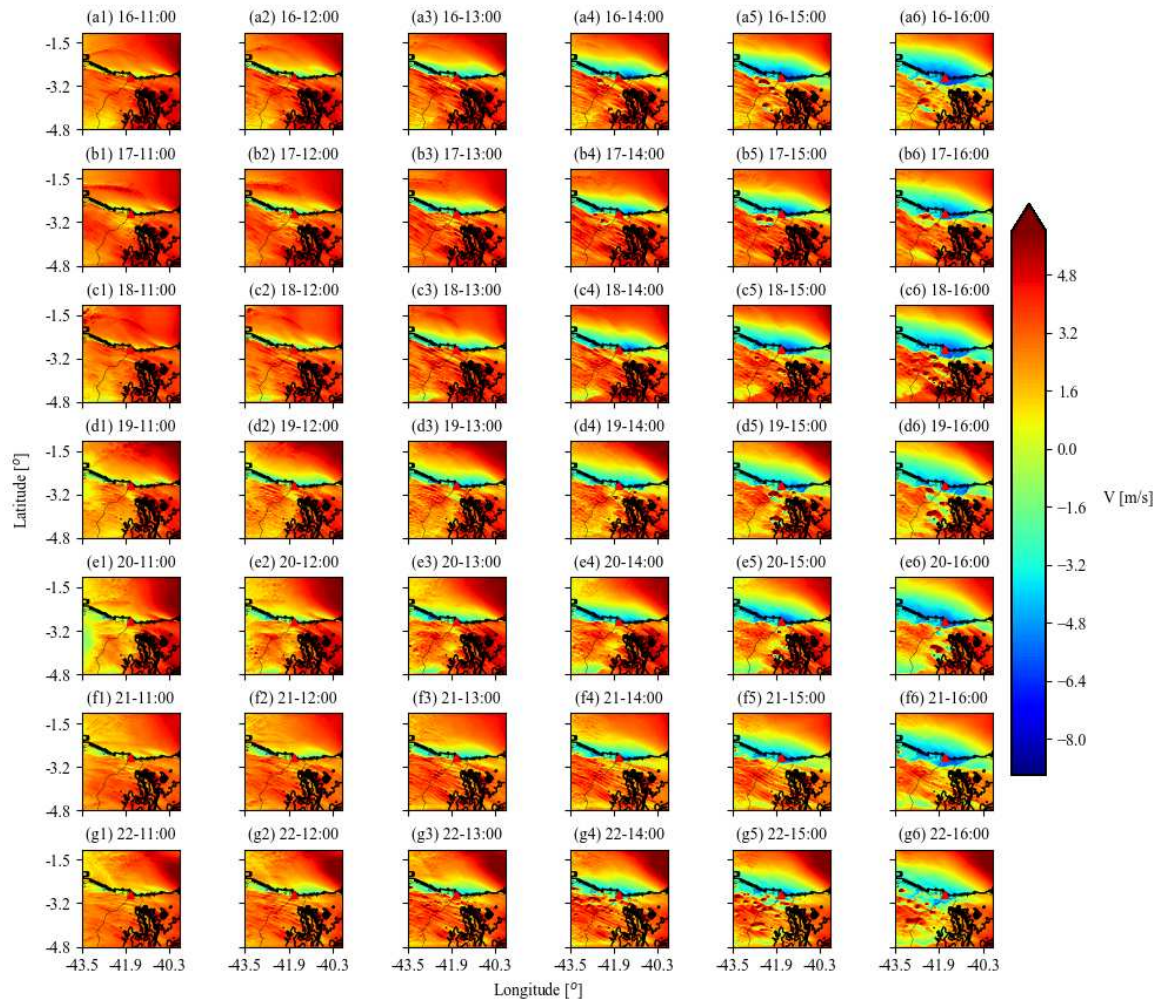


Figura 44: Representação espaço temporal da componente  $V$  da velocidade, a 100 m, no domínio D2 para a semana do mês de julho. O triângulo vermelho representa a localização do perfilador LiDAR instalado na UEPS. As linhas representam cada dia simulado e as colunas representam alguns instantes de tempo que ilustram a evolução temporal da circulação de brisa marítima.

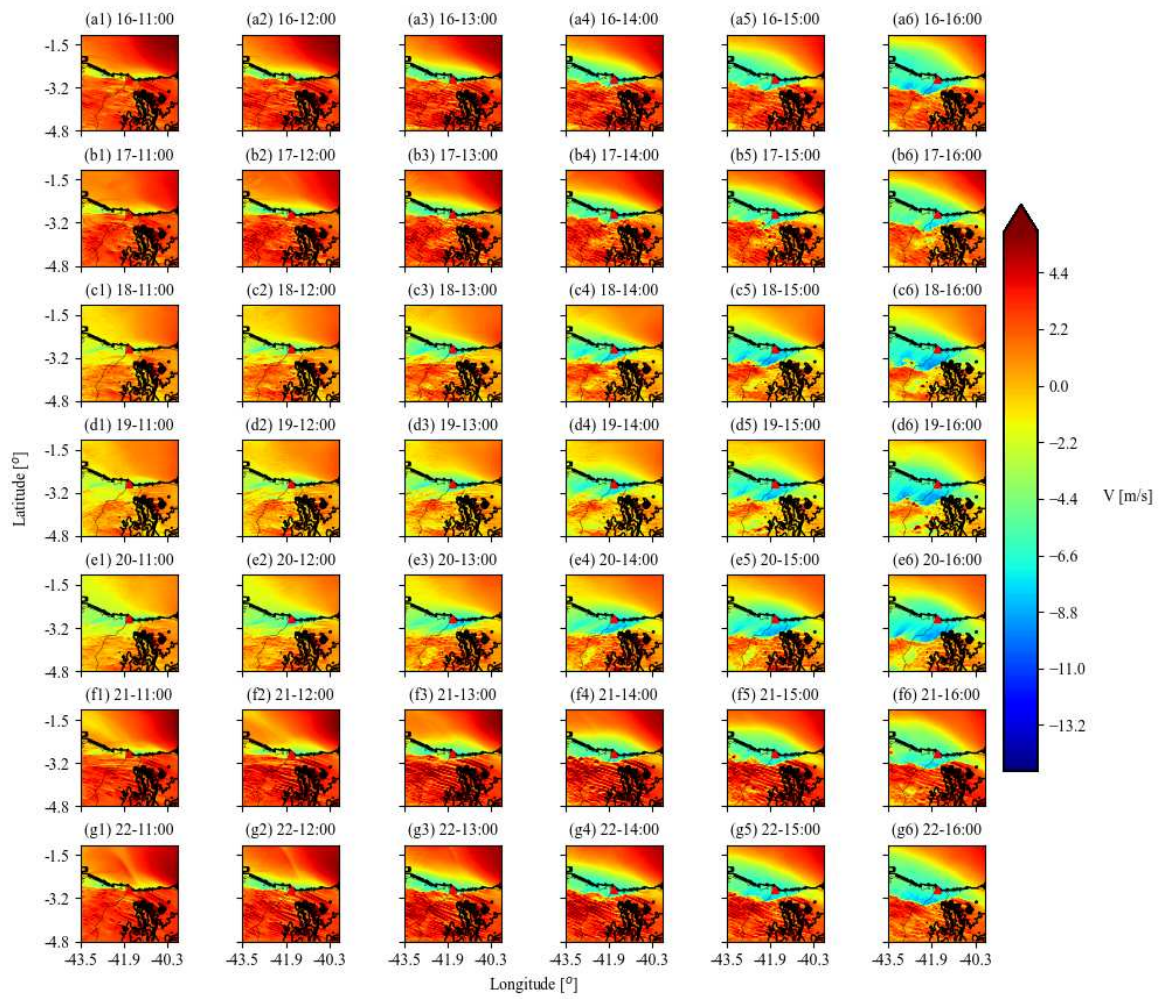


Figura 45: Análoga à Figura 44, para o mês de outubro.

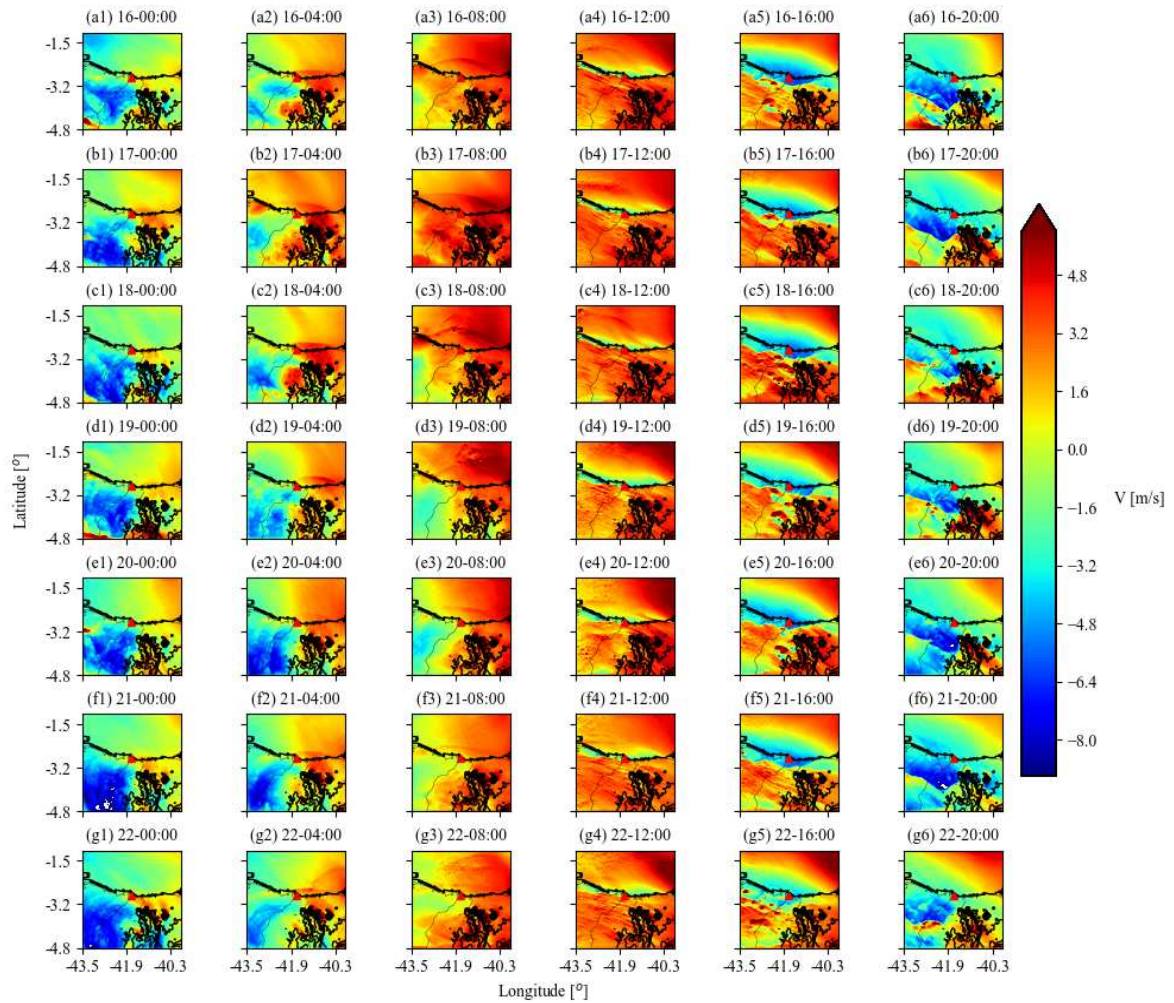


Figura 46: Representação espaço temporal da componente  $V$  da velocidade, a 100 m, no domínio D2 para a semana do mês de julho. O triângulo vermelho representa a localização do perfilador LiDAR instalado na UEPS. As linhas representam cada dia simulado e as colunas representam alguns instantes de tempo que ilustram a evolução temporal da circulação de brisa marítima com menor detalhe temporal.

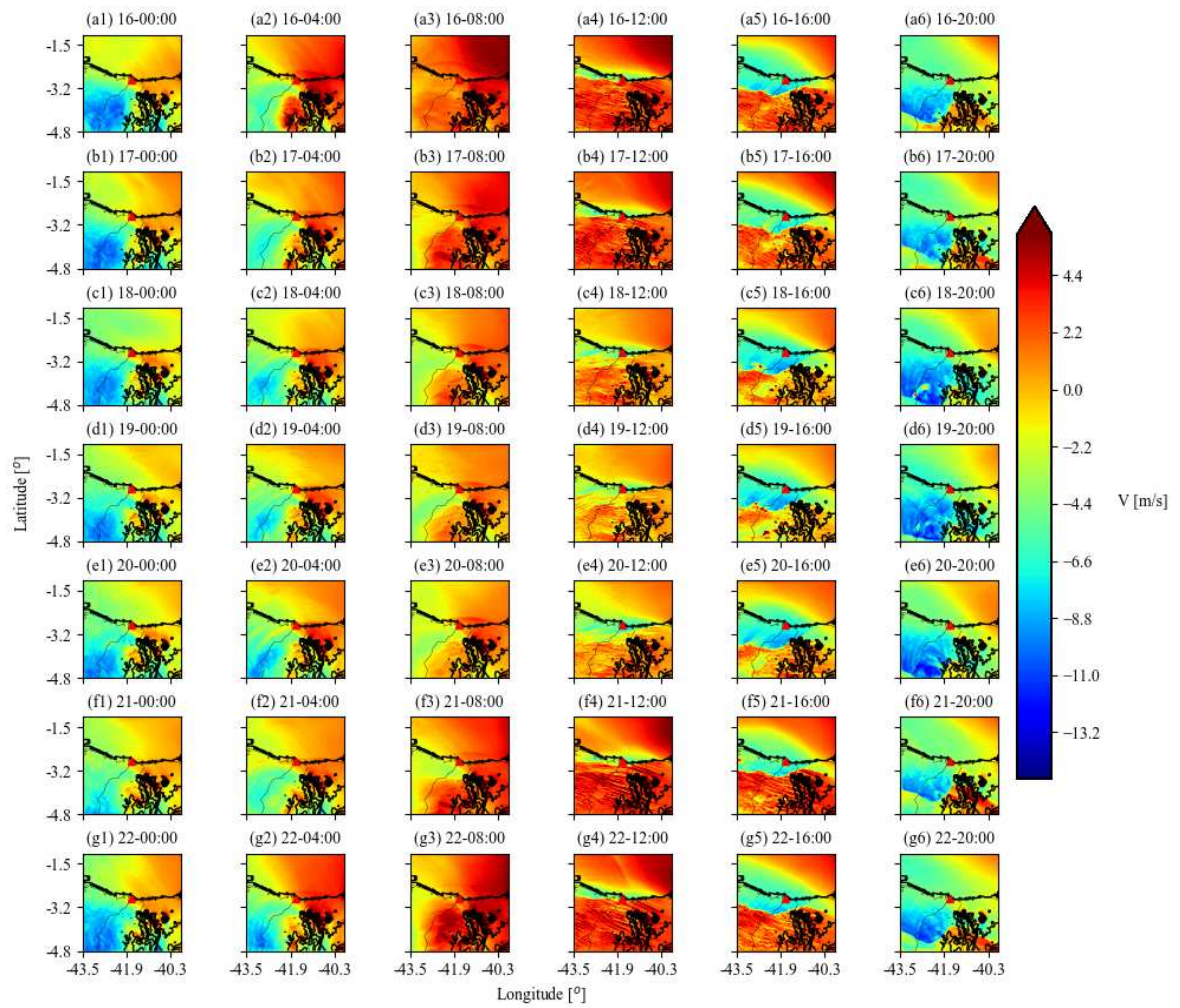


Figura 47: Similar a Figura 46, para o mês de outubro.

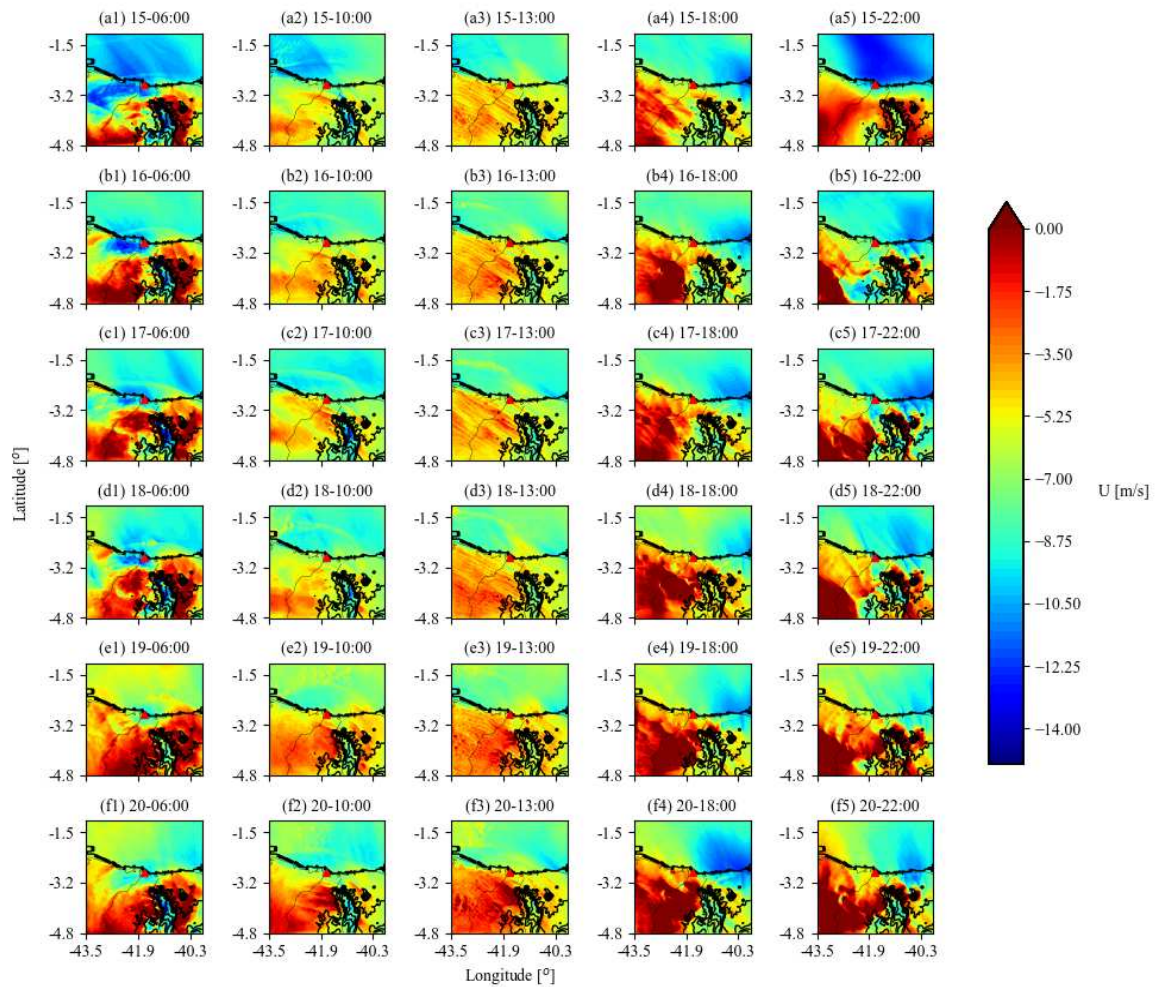


Figura 48: Representação espaço temporal da componente  $U$  da velocidade, a 100 m, no domínio D2 para a semana do mês de julho. O triângulo vermelho representa a localização do perfilador LiDAR instalado na UEPS. As linhas representam cada dia simulado e as colunas representam alguns instantes de tempo que ilustra a predominância de ventos leste.

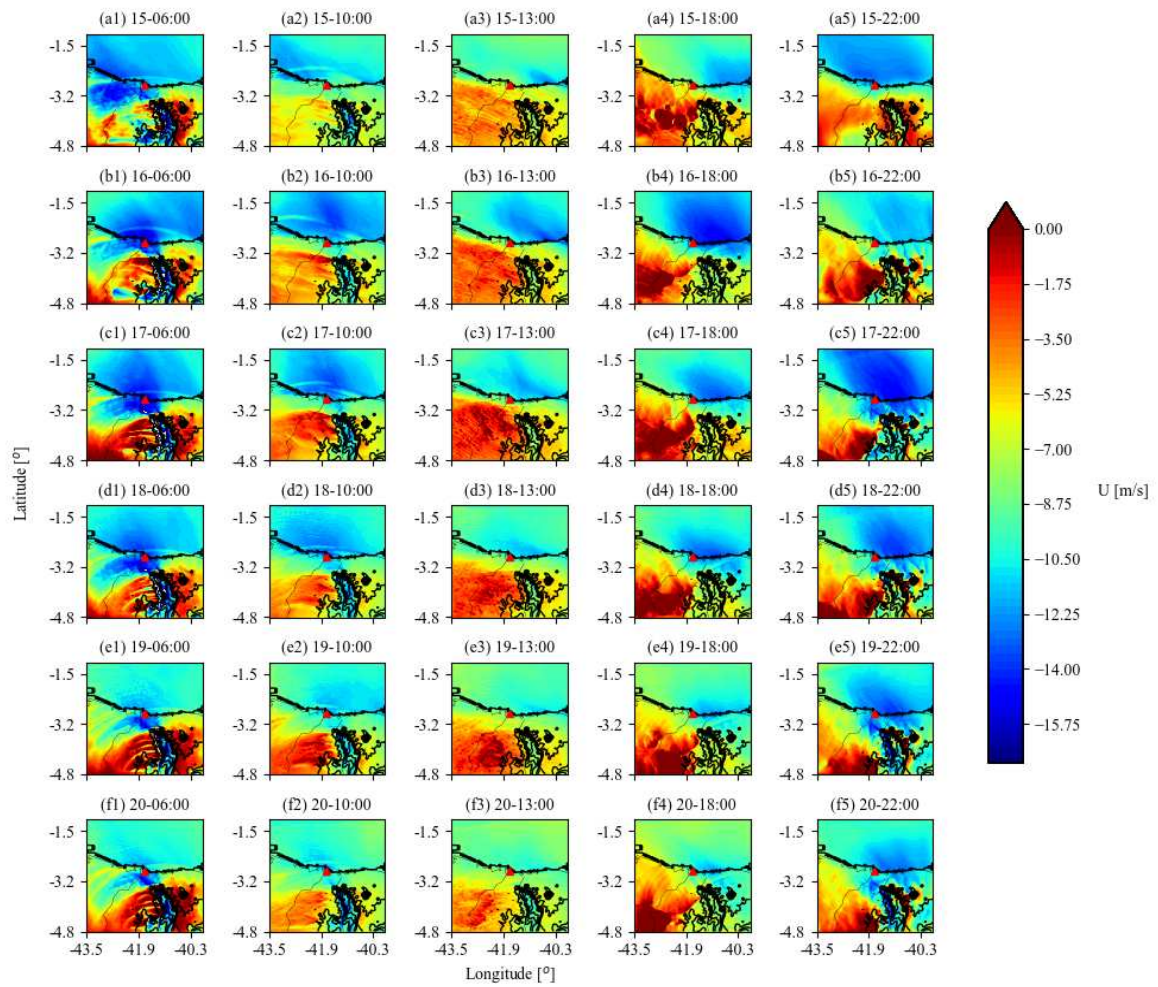


Figura 49: Análoga à Figura 48, para o mês de outubro.

## ANEXO A – PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA



## ENERGIA EÓLICA

### Cenário da energia eólica no Brasil e no mundo

Acordos climáticos como a COP26 e o Acordo de Paris mostram a urgência em se discutir e solucionar problemas relacionados às mudanças climáticas. O objetivo principal de ambos é firmar compromissos internacionais para combater o avanço do aquecimento global. Apesar de todo esforço coletivo para cumprir acordos de metas de ações climáticas, o relatório da AR6 *Climate Change* afirma que sem reduções imediatas, rápidas e em larga escala de emissões dos gases do efeito estufa nessa década, limitar o aquecimento global em até 2°C será improvável (MASSON-DELMOTTE, 2021).

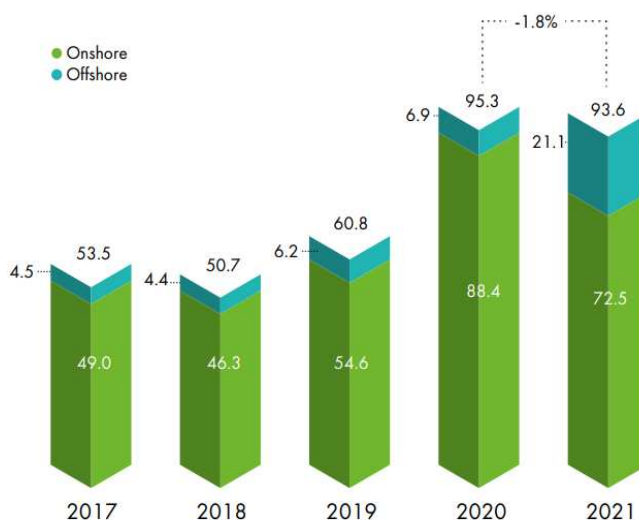


Figura 50 – Novas instalações de energia eólica *onshore* e *offshore* entre os anos de 2017 a 2021, (GWEC, 2022).

Além das questões climáticas e de saúde, a invasão da Ucrânia pela Rússia em fevereiro de 2022 alerta os governantes sobre ameaças à segurança geopolítica e energética em função da extração de combustíveis fósseis (MUSIAL *et al*, 2022). Assim, fontes renováveis de energia, como a eólica, estão cada vez mais sendo consideradas para suprir a matriz energética global, poupando o meio ambiente e evitando conflitos políticos (GWEC, 2022).

As tecnologias relacionadas à energia eólica apresentam um desenvolvimento surpreendente, principalmente nos últimos anos (MURTHY; RAHI, 2017). Durante o ano de 2021, 93,6 GW de potência eólica foram adicionados à rede elétrica mundial, representando

1,8% menos da capacidade adicionada do que o recorde ocorrido no ano de 2020. Apesar da queda de 15,6 GW de novas instalações no mercado *onshore*, o mercado *offshore* apresentou um crescimento três vezes maior que o ano anterior, tornando 2021 o ano recorde em instalação de turbinas eólicas no mar (Figura 50) (GWEC, 2022).

Em 2021 foram registrados 780,3 GW e 57,2 GW de potências instaladas *onshore* e *offshore*, respectivamente, ao redor do mundo. A China lidera ambos os mercados, representando 40% do total de potências instaladas *onshore* e 48% *offshore*. Ainda no mesmo ano, a China sagrou-se como sendo o maior mercado do mundo para novas instalações eólicas representando 51% do total de novas instalações. Seguido da China encontram-se os Estados Unidos (14%), Brasil (4%), Vietnã (4%) e o Reino Unido (3%). O mercado *onshore* é liderado pela China (40%), seguido dos Estados Unidos (17%), Alemanha (7%), Índia (5%), Espanha (4%), Brasil (3%) e França (3%). Já o mercado *offshore*, é liderado também pela China (48%), seguido do Reino Unido (22%), Alemanha (13%), Holanda (5%) e Dinamarca (4%) (GWEC, 2022),( Figura 51).

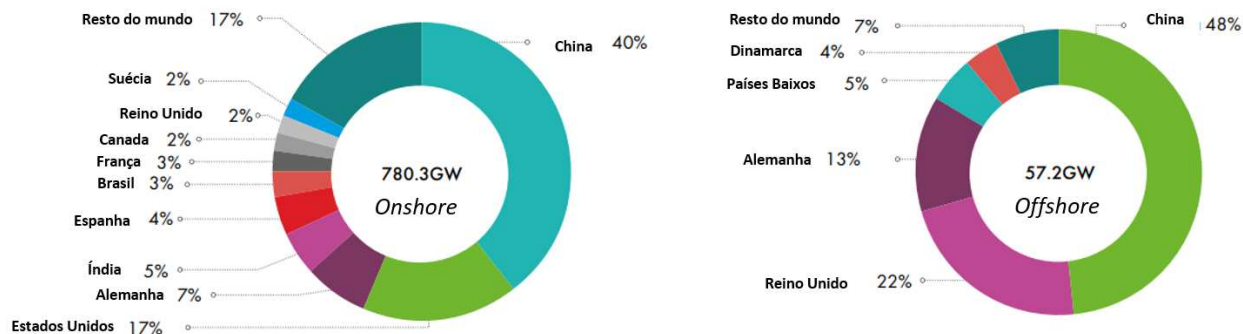


Figura 51: Total de potências instaladas *onshore* e *offshore*, no ano de 2021. Adaptado de (GWEC, 2022).

O desenvolvimento da energia eólica *onshore* no Brasil adaptou-se às turbulências relacionadas à pandemia da COVID-19, que apesar de gerar obstáculos políticos e sociais, apresentou crescimento de quase 4 GW de novas instalações no país (EPE, 2020). Em 2020 foram registrados 2,97 GW de novas instalações e 17,75 GW do total de instalações no país. Já em 2021, ano recorde de novas instalações, o Brasil apresentou 3,8 GW de novas instalações, totalizando 21,58 GW de capacidade instalada (GWEC, 2022).

A energia eólica é hoje a segunda maior fonte de energia renovável do país, com representatividade de 11,8% na matriz elétrica brasileira, perdendo apenas para as usinas hidrelétricas que correspondem a 58% de toda energia elétrica produzida (ABEEÓLICA, 2022). Com isso, o Brasil possui hoje o equivalente a 70% de toda capacidade eólica da América Latina (GWEC, 2022).

### Cenário eólico *offshore* no Brasil

Estudos sobre estimativas de velocidade de vento *offshore* no Brasil foram realizados com base em análise de três diferentes bases de dados públicas. A primeira utilizou dados do Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL) e representa a mesma base de dados utilizada na atualização do Atlas Eólico Brasileiro. A segunda aplicou dados disponibilizados pela DTU (*Technical University of Denmark*) *Global Wind Atlas*, através da Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA). Por fim, a terceira base de dados foi disponibilizada pelo ERA5 - ECMWF (*European Center for Medium-Range Weather Forecasts*), (ROADMAP, 2020). A Tabela 6 apresenta as principais características de cada uma das três bases de dados, e a Figura 52 apresenta os dados analisados. Esse estudo estima 57 GW de potencial *offshore* até 10 km da costa (EPE, 2019).

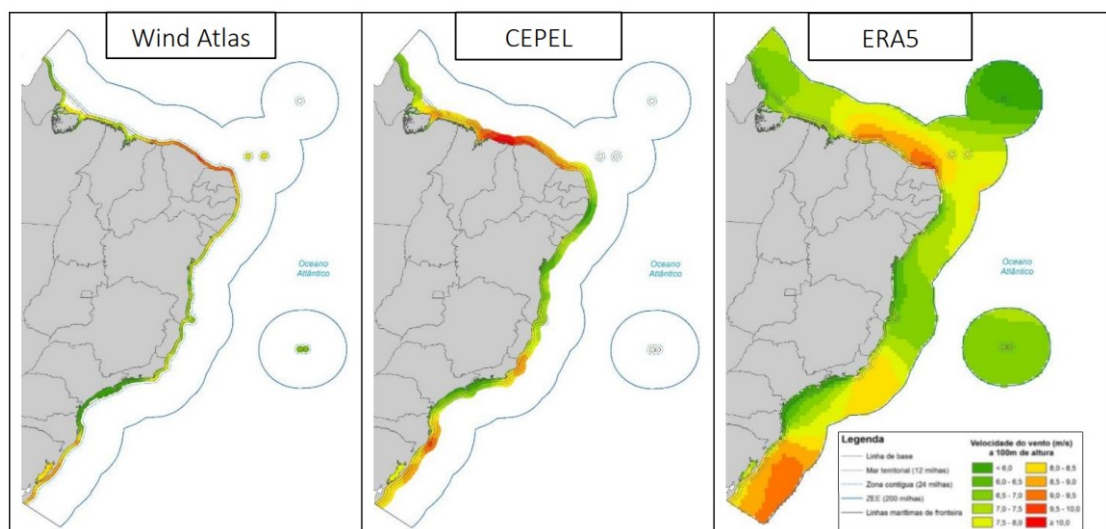


Figura 52: Velocidade média do vento no litoral brasileiro segundo três bases de dados a) Wind Atlas b) CEPEL c) ERA5, (ROADMAP, 2020).

Atualmente não existem parques eólicos *offshore* instalados no Brasil. Entretanto, em janeiro de 2022 foi publicado o decreto N° 10.946 que dispõe sobre a utilização de espaços físicos e aproveitamento de recursos naturais para geração de energia elétrica a partir de usinas *offshore* (DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2022). Esse decreto representa um marco para o mercado de energia eólica *offshore* no Brasil.

Tabela 6: Características das três bases de dados utilizadas para a elaboração dos mapas de recurso eólico apresentados na Figura 52.

	Wind Atlas	CEPEL	ERA5
Resolução	1 km	5 km	30 km
Altura (m)	100 e 200	100 e 200	100
Distância da Costa	30 km	70 km	Zona Econômica Exclusiva
Ano de Referência	2015	2013	2000 - 2017

Em junho de 2022 existiam 55 empreendimentos *offshore* em processo de licenciamento ambiental no IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). A Tabela 7 apresenta o número de parques eólicos e o número de turbinas para cada estado, e a Figura 53 apresenta os possíveis locais de instalação e uma estimativa das dimensões dos empreendimentos em questão.

Tabela 7: Apresentação das características dos parques eólicos *offshore*, por estado, em fase de licenciamento ambiental no IBAMA.

Estado	N° de Parques	N° de Turbinas	Potência (GW)
CE	12	2021	28
ES	4	419	5
PI	4	481	6
RJ	9	1871	27
RN	8	1090	15
RS	17	2946	44
SC	1	380	5
Total	55	9208	135

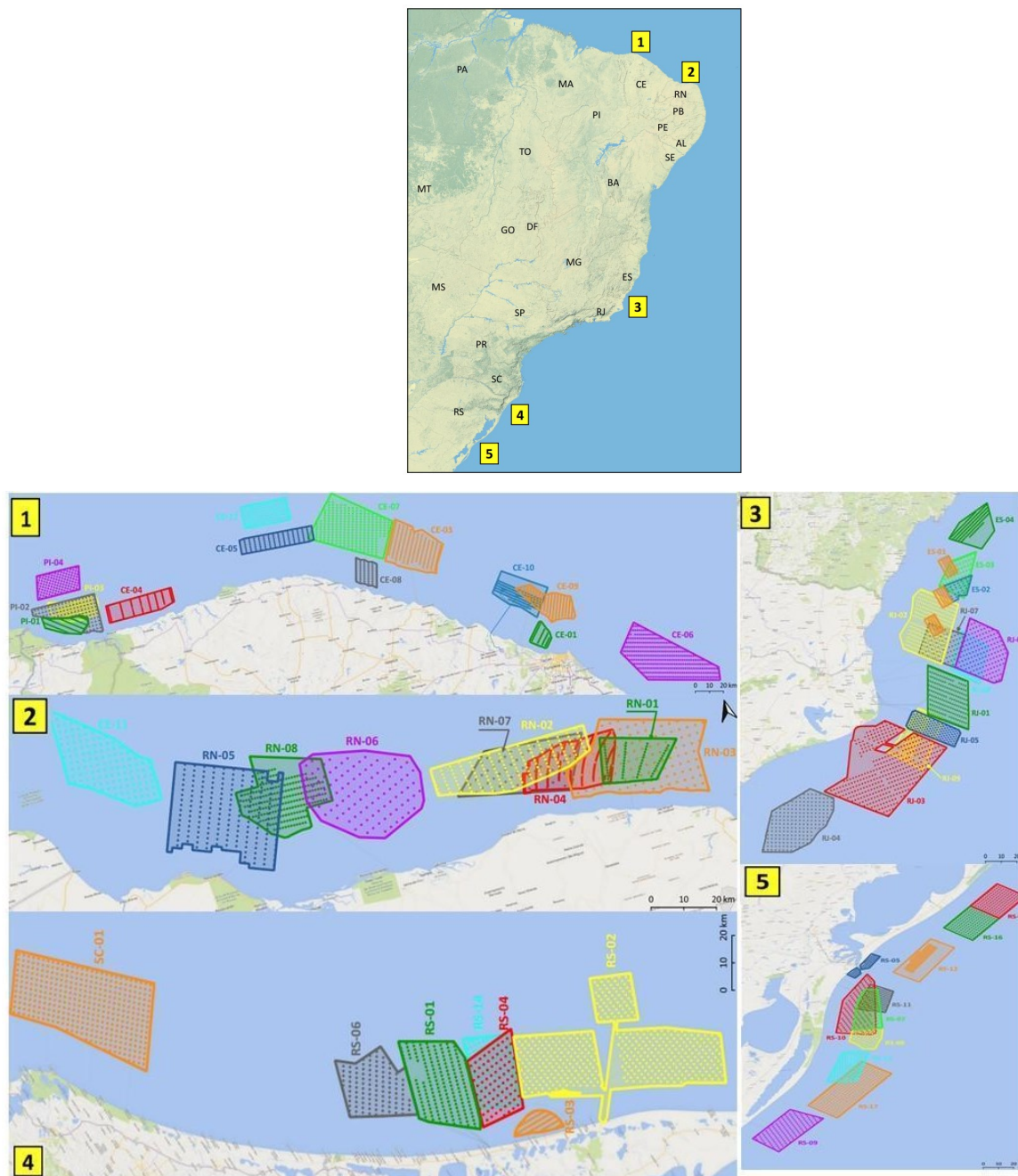


Figura 53: Parques eólicos em processo de licenciamento ambiental no IBAMA. Os polígonos representam a localização e dimensão dos parques eólicos e os pontos dentro do polígono representam a quantidade e o posicionamento das turbinas eólicas. Fonte: Ibama, 2022. (<http://www.ibama.gov.br/laf/consultas/mapas-de-projetos-em-licenciamento-complexos-eolicos-offshore>)

### Possível cenário futuro

A energia eólica será protagonista na transição energética se conseguir garantir a união entre sustentabilidade, responsabilidade social e uma base economicamente viável. A expectativa da evolução da capacidade instalada em 2022 é 27 GW. Para o ano de 2023, estima-se uma capacidade de 31703 MW (ABEEÓLICA, 2022).

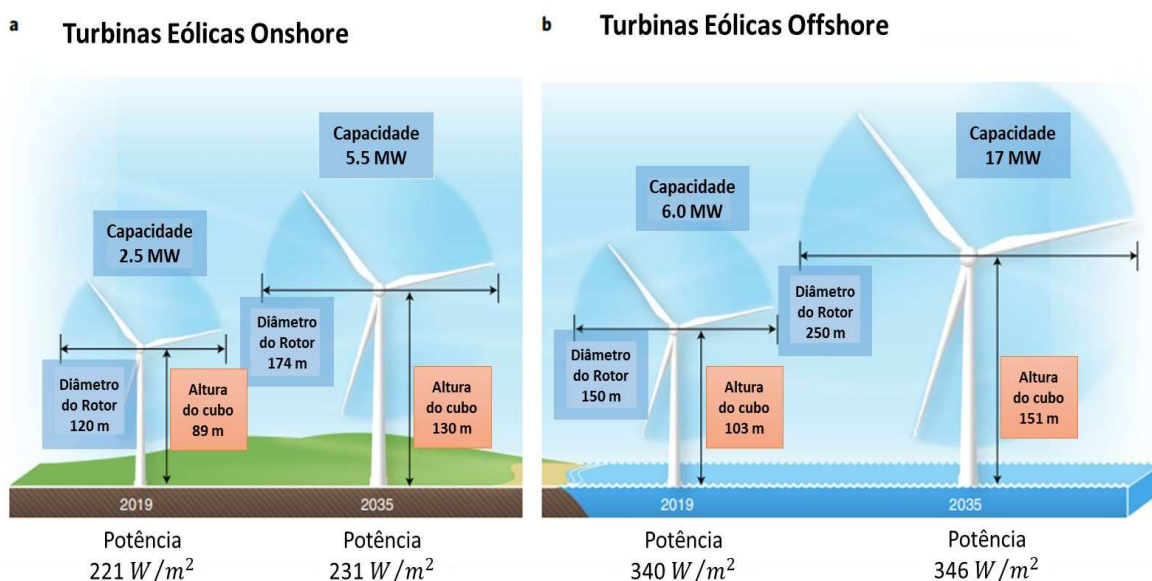


Figura 54: Estimativa de tamanhos de turbinas eólicas para o ano de 2035 em comparação com as turbinas medidas em 2019 para ambiente a) *Onshore* b) *Offshore*. Adaptado de (WISER. R, at al, 2021).

A expansão do setor eólico, aliando a inovação tecnológica e o desenvolvimento das turbinas, trouxe para o setor concorrência entre os fornecedores e incentivos competitivos que contribuíram para a redução dos custos das mesmas. Além disso, o crescimento no tamanho da turbina também representa um importante fator de redução nos preços desses componentes (WISER *et al*, 2021).

Conforme apresentado na Figura 54 especialistas preveem para 2035, mais que o dobro da capacidade de produção de energia por turbinas eólicas *onshore* e quase o triplo de capacidade para turbinas eólicas *offshore*, em comparação ao ano de 2019. Ainda segundo os pesquisadores, à medida que os projetos se distanciam da costa, a qualidade do local eólico pode ser mantida e as turbinas podem ser ainda maiores, com capacidade de experimentar velocidades médias do vento mais altas e, conseqüentemente, aumentar a produção de energia

(Bodini; Lundquist; Kirincich, 2019). Assim, espera-se que o mercado de turbinas *offshore*, principalmente, cresça consideravelmente nos próximos anos (WISER *et al.*, 2021).

### Desafios de pesquisa

O sucesso na previsão do potencial eólico requer a mitigação das incertezas associadas à velocidade do vento. Isso porque a potência teórica,  $P$ , da turbina é proporcional ao cubo da velocidade do vento na altura do cubo (Equação 1), (STULL, 2015).

$$P = \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \rho \cdot E \cdot r^2 \cdot V_v^3 \quad (4)$$

Sendo  $\rho$  a massa específica do ar,  $E$  a eficiência da turbina,  $r$  o raio da pá do rotor da turbina e  $V_v$  a velocidade do vento. Entretanto, a caracterização do vento é fortemente influenciada pela região em que ele se encontra. Por exemplo, ventos costeiros, em sua grande maioria, são modelados por diferenças de temperaturas que geram circulações de ventos locais (STULL, 2015). Como há variações de temperatura dependendo da sazonalidade, hora do dia e condições climáticas diárias, a caracterização do vento pode apresentar grandes variações e a definição de seus padrões, devido à sua volatilidade, apresenta um grande desafio de pesquisa. Assim, a energia eólica apresenta alta variabilidade espacial e temporal, podendo ser definida como uma fonte intermitente de energia. Sabendo da importância de uma previsão segura de vento, é essencial adotar uma diversidade de parâmetros para uma conclusão mais consistente (KORACIN *et al.*, 2014).

Há, portanto, grandes desafios inter e multidisciplinares envolvendo conhecimentos científicos de várias áreas: meteorologia, estatística, mecânica dos fluidos, termodinâmica, mecânica dos sólidos acústica e vibrações, aerodinâmica, entre outras. Outros aspectos importantes de projetos de engenharia devem ser considerados: interações entre sistema atmosférico e turbina eólica, sistemas dinâmicos operacionais e aperfeiçoamento de sistemas de controle de plantas eólicas. A compreensão das características dos ventos em diferentes regiões pode ser representada por modelos de mesoescala e microescala, sendo a busca pelo entendimento sobre a transição entre essas naturezas um dos principais desafios de pesquisa discutidos na atualidade (VEERS *et al.*, 2019).

Se tratando de um sistema energético integrado, é imprescindível que os três principais desafios técnicos da eólica (atmosfera, a turbina e a integração planta/rede) se desenvolvam concomitantemente. Apesar do conhecimento de todo potencial eólico *offshore* global, as investigações sobre o recurso eólico ainda são insatisfatórias, assim, existe uma lacuna entre o que se sabe e o que deve ser feito para explorar esse recurso (VEERS *et al.*, 2022).



