



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia

**ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE
ENERGIA EÓLICA DE PEQUENO PORTE EM SERGIPE**

Bruno Pires Dumas

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

2023

Bruno Pires Dumas

ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE
ENERGIA EÓLICA DE PEQUENO PORTE EM SERGIPE

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).

Orientador: Prof. Luiz Cláudio Gomes Pimentel, D.Sc.

Co-orientador: Nilton Oliveira Moraes, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

2023

CIP - Catalogação na Publicação

D886e Dumas, Bruno Pires
Estudo da Viabilidade Econômica da Geração de
Energia Eólica de Pequeno Porte em Sergipe / Bruno
Pires Dumas. -- Rio de Janeiro, 2023.
148 f.

Orientador: Luiz Cláudio Gomes Pimentel.
Coorientador: Nilton Oliveira Moraes.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Meteorologia, 2023.

1. Agricultura Familiar. 2. Geração Eólica de
Pequeno Porte. 3. Brisa Marítima. I. Pimentel, Luiz
Cláudio Gomes, orient. II. Moraes, Nilton Oliveira,
coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA DE PEQUENO PORTE EM SERGIPE

Bruno Pires Dumas

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).



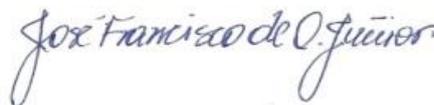
Prof. Dr. Luiz Cláudio Gomes Pimentel



Dr. Nilton Oliveira Moraes



Prof. Dr. Luiz Paulo de Freitas Assad



Prof. Dr. José Francisco de Oliveira Júnior



Prof. Dr. Corbiniano Silva

AGRADECIMENTOS

Esta sessão de agradecimentos deveria ter mais páginas do que a própria Dissertação. Citarei alguns nomes aqui, mas com certeza esquecerei muitos outros, por isso já me adianto com desculpas. Primeiramente, presto meus agradecimentos ao contribuinte brasileiro. Vivemos tempos onde até mesmo as coisas óbvias precisam ser explicadas de forma clara e objetiva, sem margem para dúvida. Desta forma, agradeço ao contribuinte brasileiro por ter financiado por meio de seus impostos meu curso de Mestrado e, sinceramente, espero retribuir no decorrer de minha caminhada acadêmica e profissional com muito amor e dedicação à Ciência.

Segundo, gostaria de agradecer meus pais Márcia e Pedro, minha esposa Alessandra e a toda minha família e amigos próximos (Bela, Linda e Margout, vocês também), que não têm a menor ideia de que o Teorema de Betz veio das equações de Bernoulli, que também nasceu em 8 de fevereiro, mas me ensinaram o que realmente é importante na vida. Ademais, toda conquista esconde renúncias e sacrifícios, e em muitos momentos sei que fui ausente por conta da produção deste documento.

Terceiro, agradeço a meus orientadores oficiais (Luiz e Nilton) e não-oficiais (Maurício, Bianco e Larissa). Além do conhecimento compartilhado, serviram como inspiração para finalizar esta etapa e seguir seus passos nesta trajetória complicada que é ser pesquisador (provavelmente sem o Nilton teria trancado o curso, mas não contem isso por aí). Também gostaria de agradecer a todos os colegas de profissão e pesquisa. Essa Dissertação é uma consolidação de muitos anos de Curso Técnico, Bacharelado e Mestrado em Meteorologia, por isso seria um tanto injusto não considerar todos vocês destes últimos 15 anos, que contribuíram com ensinamentos e inspiração profissional.

Por último, e com certeza não menos importante, agradeço a Deus, que me ensinou que mais importante que o “aonde” queremos chegar é o caminho que nós percorremos, e que me guiou por anos de pesquisa extremamente desafiadores, onde aprendi muito mais sobre mim, meus medos e limitações, do que sobre qualquer coisa escrita nas próximas 140 páginas.

Vento que dá na vela
Vela que leva o barco
Barco que leva a gente
Gente que leva o peixe
Peixe que dá dinheiro, Curimã
(O Vento - Dorival Caymmi).

Não havia pessoas necessitadas entre eles,
pois os que possuíam terras ou casas as vendiam,
traziam o dinheiro da venda
e o distribuíam segundo a necessidade de cada um.
(Atos, 4:34-35).

RESUMO

Transições energéticas são processos complexos, demandando mudanças não apenas no método de geração de energia, mas também em toda a rede de infraestrutura, políticas de investimento e precificação, aceitação da população, entre outros (EPE, 2022). Não se trata, portanto, de um processo de ruptura com os padrões de produção antigos, mas de coexistência entre o novo e as fontes de energia que são progressivamente substituídas. O objetivo principal deste trabalho é fomentar a inserção de inovações tecnológicas em regiões de nosso país que ainda dispõem de um planejamento energético deficitário, por meio de um estudo de caso onde se propõe a transformação do recurso eólico disponível em capital social. Assim, investigou-se a influência do sistema de brisa marítima (SBM) no Sertão de Sergipe, o potencial eólico, a viabilidade econômica de geração eólica de pequeno porte como subsídio para irrigação em propriedades de agricultura familiar do Sertão de Sergipe e a habilidade do modelo WRF em reproduzir o vento na região de estudo. Os resultados obtidos demonstram como o SBM interage com o vento dominante da região (alísios/componente norte da Alta Subtropical do Atlântico Sul) e que este sistema de mesoescala atua como um agente climatológico no Estado de Sergipe. A principal conclusão da análise meteorológica foi de que os ventos alísios não são intensos o suficiente para possibilitar a geração de energia eólica no Sertão de Sergipe, no entanto a composição “alísios+SBM” observada nos períodos da manhã e tarde intensifica o escoamento e permite o aproveitamento para geração eólica de pequeno porte, sendo restrito, portanto, pela duração do ciclo diário do SBM. Em relação ao estudo de caso, os resultados indicam que a metodologia proposta oferece uma alternativa economicamente vantajosa e intermediária às modalidades “irrigante noturno” e “não-irrigante noturno”, não sendo viável para estabelecimentos que dispõem do desconto de irrigante noturno, de forma que estabelecimentos que não se encaixem nas normas estabelecidas pela REN 1000 (não irrigantes noturnos ou estabelecimentos que utilizem energia elétrica para outros fins) seriam beneficiados pela geração eólica de pequeno porte.

Palavras-chave: Agricultura Familiar, Geração Eólica de Pequeno Porte, Brisa Marítima.

ABSTRACT

Energy transitions are complex processes, demanding changes not only in the energy generation method, but also in the entire infrastructure network, investment and pricing policies, population acceptance, among others (EPE, 2022). It is not, therefore, a process of breaking with the old production patterns, but of coexistence between the new and the energy sources that are progressively replaced. The main objective of this work is to promote the insertion of technological innovations in regions of our country that still have a deficient energy planning, through a case study where it is proposed to transform the available wind resource into social capital. Thus, the influence of the sea breeze system (SBM) in the Sertão of Sergipe, the wind potential, the economic viability of small wind generation as a subsidy for irrigation in family farming properties in the Sertão of Sergipe and the ability of the WRF model to reproduce the wind in the study region were investigated. The obtained results demonstrate how the SBM interacts with the dominant wind in the region (trades/northern component of the South Atlantic Subtropical High) and that this mesoscale system acts as a climatological agent in the State of Sergipe. The main conclusion of the meteorological analysis was that the trade winds are not intense enough to enable the generation of wind energy in the Sertão of Sergipe, however the composition "trade + SBM" observed in the morning and afternoon periods intensifies the flow and allows the use for small wind generation, being restricted, therefore, by the duration of the daily cycle of the SBM. Regarding the case study, the results indicate that the proposed methodology offers an economically advantageous and intermediate alternative to the "nocturnal irrigator" and "non-night irrigator" modalities, not being viable for establishments that have the discount of night irrigator, so that establishments that do not comply with the norms established by REN 1000 (no night irrigation or establishments that use electricity for other purposes) would benefit from small wind generation in the region.

Keywords: Family Farming, Small Wind Generation, Sea Breeze.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xviii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Sustentabilidade e Energias Renováveis	1
1.2. Estado Atual da Geração Eólica no Brasil e no Mundo	5
1.3. Geração Eólica de Pequeno Porte e Legislação Brasileira	8
1.4. Relevância do Estudo	12
CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS	15
CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 Caracterização da Região de Estudo	16
3.1.1 Atividade Rural e Irrigação	18
3.2 Sistema de Informação Geográfica	21
3.3 Caracterização Meteorológica	24
3.3.1 Sistema de Brisa Marítima (SBM)	33
3.3.2. El Niño-Oscilação Sul (ENOS)	37
3.4 Análise do Potencial Eólico.....	38
3.4.1 Distribuição de Weibull	43
3.5 Avaliação Econômica: <i>Payback</i>	44
3.6 Análise de Agrupamento	45
3.7 Modelagem Computacional da Atmosfera: <i>Weather Research and Forecasting Pre-Processing System (WRF)</i>	49

3.7.1 Descrição do modelo <i>Weather Research and Forecast (WRF)</i>	49
3.7.2 Sistema de Pré-Processamento do WRF (WPS)	51
3.7.3 Núcleo Dinâmico ARW	52
CAPÍTULO 4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	56
4.1 Sistema de Brisa Marítima	56
4.2 Análise de Agrupamento	59
4.3 Estudos de Caso de Geração Eólica de Pequeno Porte	60
4.4 Testes de Sensibilidade do WRF	63
4.4.1 Estudos realizados com o WRF no Estado de Alagoas	69
CAPÍTULO 5 – ESTRATÉGIA METODOLÓGICA	72
CAPÍTULO 6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
6.1 Análise de Agrupamento	80
6.1.1 Velocidade do Vento em 10m (V)	81
6.1.2 Componente Zonal do Vento em 10m (V _x)	85
6.1.2 Componente Meridional do Vento em 10m (V _y)	89
6.2 Análise do Regime de Vento: litoral (Aracaju) e interior (Carira) de Sergipe	93
6.2.1 Período Diurno	96
6.2.2 Período Noturno	98
6.3 Estudo de Caso: Viabilidade da Geração de Energia Eólica de Pequeno Porte para o Plantio de Milho no Sertão de Sergipe	100
6.4 Avaliação do Modelo de Mesoescala WRF para a Representação do Regime de Vento	105

6.4.1 Análise Sinótica	105
6.4.2 Simulações Simulações Numéricas do Campo de Temperatura e Vento para Subáreas de Sergipe	109
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E DISCUSSÕES	115
REFERÊNCIAS	122

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1. Participação das fontes de energia renováveis na matriz elétrica brasileira e as médias mundiais e dos países membros da OCDE (Fonte: EPE (2022))	6
FIGURA 1.2. Participação das diferentes fontes de energia renovável presentes na matriz elétrica brasileira (Fonte: EPE (2022))	6
FIGURA 1.3. Evolução anual da geração de energia por fontes eólicas em comparação com a geração nuclear e por biomassa (Fonte: EPE (2022))	7
FIGURA 1.4: Relação entre o diâmetro de rotação das pás e a potência gerada (Fonte: ROSATO (2018))	9
FIGURA 1.5. Linha do tempo com políticas públicas e precificação para irrigação e geração eólica de pequeno porte propostas pela legislação brasileira (Próprio autor)	12
FIGURA 1.6: Região de estudo desta Dissertação (Próprio autor)	13
FIGURA 3.1: Uso do solo da região Nordeste do Brasil (Fonte: REBOITA et al. (2016))	17
FIGURA 3.2: Representação do mundo real a partir do Sistema de Informação Geográfica (Fonte: SILVA (2013))	22
FIGURA 3.3: Resultados obtidos através do SIG por RODRIGUES et al. (2017)	23
FIGURA 3.4: Escala de Orlanski (adaptado de ORLANSKI (1975))	25
FIGURA 3.5: Classificação dos regimes de precipitação da América do Sul (Fonte: REBOITA et al. (2010))	27
FIGURA 3.6: Climatologia da ZCIT a partir de médias de precipitação e ROL entre 1983 e 2005 (Fonte: MAMALAKIS et al. (2020))	28
FIGURA 3.7: Figura xxx: Distribuição da função densidade de probabilidade da localização da ZCIT entre Maio e Outubro (a), entre Novembro e Abril (b) e anual (c) a partir de médias de precipitação e ROL entre 1983 e 2005 (Fonte: MAMALAKIS et al. (2020))	29

FIGURA 3.8: Modelo conceitual de formação do VCAN e nebulosidade associada (Fonte: KOUSKY e GAN, 1981)	30
FIGURA 3.9: Estrutura e elementos do Sistema de Brisa Marítima (Fonte: MILLER et al., 2003)	34
FIGURA 3.10: Modelos conceituais de interação entre o SBM e o vento dominante de uma região (Fonte: MILLER et al., 2003)	36
FIGURA 3. 11: Níveis de Potencial Eólico (Fonte: VINHOZA (2019))	41
FIGURA 3.12: Curva de Potência de uma Turbina (Fonte: LÍVIA e PEREIRA (2018))	42
FIGURA 3.13: Representação Gráfica de uma Função Densidade de Probabilidade (OLIVEIRA FILHO et al. (2018))	43
FIGURA 3.14: Representação dos Critérios de Ligação a) Simples, b) Média e c) Ward	47
FIGURA 3.15: Exemplo de dendrograma (Próprio autor)	48
FIGURA 3.16: Estrutura do WRF (adaptado de SKAMAROCK et al., 2019)	50
FIGURA 3.17: Interações entre os esquemas de parametrização no núcleo ARW. (adaptado de SKAMAROCK et al., 2019)	53
FIGURA 4.1: Imagem de satélite indicando a presença da frente de brisa marítima (Fonte: DUBREUIL et al., 2004)	57
FIGURA 4.2: Imagens de satélite indicando a presença da frente de brisa marítima e a interação com os ventos alísios (Fonte: TEIXEIRA, 2008)	58
FIGURA 4.3: Resultados obtidos por LOPES DE LIMA et al. (2010) a partir de Análise de Agrupamento no estado do Rio Grande do Norte	60
FIGURA 5.1: Período de dados disponíveis para cada estação utilizada nesta Dissertação	73
FIGURA 5.2: Localização das estações meteorológicas automáticas de superfície	74

FIGURA 5.3: Fluxograma da estratégia metodológica aplicada nesta Dissertação	76
FIGURA 5.4: Configuração do aninhamento de grade das simulações	77
FIGURA 6.1: Dendograma da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Completa	81
FIGURA 6.2: Mapa de Similaridade da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Completa	81
FIGURA 6.3: Dendograma da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Média	82
FIGURA 6.4: Mapa de Similaridade da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Média	82
FIGURA 6.5: Dendograma da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Ward	83
FIGURA 6.6: Mapa de Similaridade da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Ward	83
FIGURA 6.7: Dendograma da componente zonal da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Completa	85
FIGURA 6.8: Mapa de Similaridade da componente zonal da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Completa	85
FIGURA 6.9: Dendograma da componente zonal da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Média	86
FIGURA 6.10: Mapa de Similaridade da componente zonal da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Média	86
FIGURA 6.11: Dendograma da componente zonal da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Ward	87
FIGURA 6.12: Mapa de Similaridade da componente zonal da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Ward	87

FIGURA 6.13: Dendograma da componente meridional da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Completa	89
FIGURA 6.14: Mapa de Similaridade da componente meridional da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Completa	89
FIGURA 6.15: Dendograma da componente meridional da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Média	90
FIGURA 6.16: Mapa de Similaridade da componente meridional da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Média	90
FIGURA 6.17: Dendograma da componente meridional da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Ward	91
FIGURA 6.18: Mapa de Similaridade da componente meridional da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Ward	91
FIGURA 6.19: Médias mensais da velocidade do vento em 10 m das estações Aracaju (2003-2021) e Carira (2009-2020)	94
FIGURA 6.20: Médias mensais de precipitação das estações Aracaju (2003-2021) e Carira (2009-2020)	94
FIGURA 6.21: Distribuição de frequência do vento em 10 m na estação Aracaju entre 2003 e 2021	95
FIGURA 6.22: Distribuição de frequência do vento em 10 m na estação Carira entre 2009 e 2020	96
FIGURA 6.23: Médias mensais da velocidade do vento em 10 m das estações Aracaju (2003-2021) e Carira (2009-2020) para os horários entre 06h-18h	97
FIGURA 6.24: Distribuição de frequência do vento em 10 m na estação Aracaju entre 2003 e 2021 nos horários de 10h-18h local	98
FIGURA 6.25: Distribuição de frequência do vento em 10 m na estação Carira entre 2009 e 2020 nos horários de 10h-18h local	98

FIGURA 6.26: Médias mensais da velocidade do vento em 10 m das estações Aracaju (2003-2021) e Carira (2009-2020) para os horários entre 18h-06h	99
FIGURA 6.27: Distribuição de frequência do vento em 10 m na estação Carira entre 2009 e 2020 nos horários de 03h-09h local	99
FIGURA 6.28: Configuração espacial da produção agrícola do estado de Sergipe (Próprio autor)	101
FIGURA 6.29: Distribuição de Weibull dos dados de velocidade do vento em 10 m na estação Carira entre 2009 e 2020 (entre 09h e 21h local)	102
FIGURA 6.30: Tempo de <i>payback</i> do investimento proposto para um consumidor do tipo “não irrigante noturno”	104
FIGURA 6.31: Cartas de superfície para os dias 1 e 2 de janeiro de 2022 (DHN, 2022): 01/01/2022, 12Z (6.30a), 02/01/2022, 00Z (6.30b), 02/01/2022, 12Z (6.30c) e 03/01/2022, 00Z (6.30d)	106
FIGURA 6.32: Cartas de altitude para os dias 1 e 2 de janeiro de 2022 (CPTEC, 2022): 01/01/2022, 12Z (6.31a), 02/01/2022, 00Z (6.31b), 02/01/2022, 12Z (6.31c) e 03/01/2022, 00Z (6.31d)	107
FIGURA 6.33: Imagens de satélite para os dias 1 e 2 de janeiro de 2022 (CPTEC, 2022): 01/01/2022, 12Z (6.32a), 02/01/2022, 00Z (6.32b), 02/01/2022, 12Z (6.32c) e 03/01/2022, 00Z (6.32d)	108
FIGURA 6.34: Simulações do WRF para temperatura a 2 metros (sombreado) e vento a 10 metros (barbelas) para os dias 1 e 2 de janeiro de 2022	110
FIGURA 6.35: Simulações do WRF para água precipitável (sombreado) e vento a 10 metros (barbelas) para os dias 1 e 2 de janeiro de 2022	110
FIGURA 6.36: Comparação das simulações do WRF da temperatura do ar em 2 m para Maceió (-9,55°/-35,77°)	111
FIGURA 6.37: Comparação das simulações do WRF velocidade do vento em 10 m para Maceió (-9,55°/-35,77°)	111

FIGURA 6.38: Comparação das simulações do WRF da temperatura do ar em 2 m para Piranhas (-9,62°/-37,77°)	112
FIGURA 6.39: Comparação das simulações do WRF da velocidade do vento em 10 m para Piranhas (-9,62°/-37,77°)	112
FIGURA 6.40: Comparação das simulações do WRF da temperatura do ar em 2 m para Itabaianinha (-11,27°/-37,79°)	112
FIGURA 6.41: Comparação das simulações do WRF da velocidade do vento em 10 m Itabaianinha (-11,27°/-37,79°)	113
Figura 6.42: Comparação das simulações do WRF para direção e velocidade do vento em 10m em Maceió (-9,55°/-35,77°), Piranhas (-9,62°/-37,77°) e Itabaianinha (-11,27°/-37,79°).....	113

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1: Geração de eletricidade no Brasil, região Nordeste e nos estados do NEB, de acordo com a fonte utilizada. Valores em GWh (Fonte: EPE (2022))	14
TABELA 1.2: Capacidade instalada de Mini e Microgeração Distribuída no Brasil, de acordo com a fonte utilizada. Valores em GWh (Fonte: EPE (2022))	14
TABELA 3.1: Eventos significativos de precipitação sobre o ENEB avaliados por SARMENTO (2009)	32
TABELA 5.1: Período de dados disponíveis para cada estação utilizada nesta Dissertação	78
TABELA 5.2: Configurações de modelo e domínio utilizadas nas simulações realizadas neste trabalho	79
TABELA 6.1: Médias mensais da velocidade do vento das estações Aracaju (2003- 2021) e Carira (2009-2020)	93
TABELA 6.2: Taxas mensais de calmaria das estações Aracaju (2003-2021) e Carira (2009-2020)	100
TABELA 6.3: Resumo das informações técnicas do estudo de caso	102
TABELA 6.4: Distribuição de probabilidade dos dados de velocidade do vento em 10 m na estação Carira entre 2009 e 2020 (entre 09h e 21h local)	103
TABELA 6.5: Informações da Análise Financeira do Estudo de Caso	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACM2	Asymmetrical Convective Model version 2
AF	Agricultura Familiar
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARW	Advanced Research Weather Research and Forecasting
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
CBM	Circulação do Sistema de Brisa Marítima
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLI	Camada Limite Interna
CLS	Camada Limite Superficial
CONUS	Continental United States
DOL	Distúrbio Ondulatório de Leste
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMDAGRO	Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ERA-Interim	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis
EUA	Estados Unidos da América
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
FNL	Final Operational Global Analysis
FBM	Frente de Brisa Marítima
GFS	Global Forecast System

HS	Hemisfério Sul
ICU	Ilha de Calor Urbano
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISS	Interação Solo-Superfície
LiDAR	Light Detection and Ranging
MERRA	Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications
MM5	Pennsylvania State/NCAR Mesoscale Model Version 5
MOST	Teoria da Similiaridade de Monin-Obukhov
MRF	Medium Range Forecast Model
MYJ	Mellor-Yamada-Janjic
MYNN2	Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino Level 2.5
MYNN3	Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino Level 3
NAM	North American Mesoscale Model
NARR	North American Regional Reanalysis
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NNRP	National Center for Environmental Prediction Reanalysis Project
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NEB	Nordeste do Brasil
OBM	Onda de Gravidade da Brisa Marítima
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OPE	Oceano Pacífico Equatorial
OPT	Oceano Pacífico Tropical
PX	Pleim-Xiu

QNSE	Quasi-Normal Scale Elimination
REN	Resolução Normativa
RRTM	Rapid Radiative Transfer Model
SBM	Sistema de Brisa Marítima
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SoDAR	Sound Detection And Ranging
TIR	Taxa Interna de Retorno
TKE	Energia Cinética Turbulenta
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
VPL	Valor Presente Líquido
WAsP	Wind Atlas Analyses and Application Program
WPS	Weather Research and Forecasting Pre-Processing System
WRF	Weather Research and Forecasting
WSM3	Weather Research and Forecasting Single-Moment 3-Class
WSM6	Weather Research and Forecasting Single-Moment 6-Class
YSU	Yonsei University
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

1. Introdução

1.1. Sustentabilidade e Energias Renováveis

A degradação ambiental de nosso planeta devido às ações do homem tem sido vivida e estudada pela população mundial nas últimas décadas. A destruição de ecossistemas a partir da derrubada de matas nativas, seguida da extinção de espécies animais e vegetais, juntamente com a poluição atmosférica e de rios e oceanos são alguns exemplos de desastres ambientais que infelizmente vivenciamos e que temos apenas a nós mesmos como responsáveis. Atualmente há um consenso sobre a idade da humanidade oscila em torno de 100.000 anos, baseado nos primeiros indivíduos capazes de desenvolver raciocínio lógico e ferramentas. Paleoantropólogos estimam que as primeiras civilizações humanas com razoável desenvolvimento e técnicas de Agricultura se desenvolveram a partir de 12.000 A.C. Chamada de Revolução Neolítica, este período de transição entre as rudimentares atividades de caça e extrativismo e, posteriormente, atividades de domesticação de animais e cultura de plantas, permitiu que as comunidades humanas deixassem de ser nômades e caçadoras-coletoras para fixar moradia em regiões mais propícias às atividades de cultivo. Este estilo de vida mais sedentário permitiu um crescimento da população e a criação de comunidades de forma organizada (BOCQUET-APPEL, 2011).

Acompanhando a evolução humana, é possível destacar também a evolução das ferramentas humanas, que passaram a produzir ainda mais, contudo consumindo cada vez mais matéria-prima e gerando mais resíduos, que são devolvidos ao meio ambiente sem o tratamento adequado (DUPUY, 1980; SACHS, 1992; RASKIN et al., 2002). O grande salto tecnológico ocorreu a partir da Revolução Industrial, sendo acompanhado por uma elevação igualmente significativa de extração de matéria-prima e de produção de resíduos despejados no meio ambiente. As Revoluções Industrial e Tecnológica representaram marcos de inovação e crescimento econômico e populacional que impulsionaram o desenvolvimento da humanidade. Por outro lado, o crescimento da sociedade industrial logo conduziu comunidades tradicionais para a lógica de mercado e pressionou os limites da capacidade ambiental do planeta (DUPUY, 1980; SACHS, 1992; RASKIN et al., 2002).

A partir deste ponto começa o principal debate de nossa geração: a busca pelo equilíbrio entre o crescimento econômico e tecnológico, impulsionado pela nossa

capacidade de desenvolver ferramentas potentes, e a preservação do meio ambiente, que não é apenas nossa fonte de matéria-prima, mas também nosso único lar. O conceito de desenvolvimento sustentável surgiu com a ideia de que é possível alinhar o desenvolvimento econômico e tecnológico da humanidade com a preservação de nossos ecossistemas e fontes de matéria-prima. DUPUY (1980) propôs que o Capitalismo possui contradições, como a relação direta entre crescimento econômico e degradação ambiental e que perecerá caso não sofra mutações. Dentre as mutações citadas, o autor cita a preservação do meio ambiente, utilização de recursos renováveis, o aumento da eficiência de produção e a produção de bens imateriais.

SACHS (1992) abordou o ecodesenvolvimento e suas cinco dimensões: social (distribuição de renda), econômica (redução das desigualdades econômicas e tecnológicas entre as nações), ecológica (preservação do meio ambiente, uso de energias renováveis), espacial (desurbanização, agricultura de pequeno porte) e cultural (valorização dos bens imateriais e das culturas locais), propondo um desenvolvimento econômico mais sustentável, diferente do utilizado pelos países desenvolvidos durante o século XX. Segundo o autor, os países subdesenvolvidos não podem replicar o modelo de desenvolvimento dos países já desenvolvidos, pois seria insustentável para o meio ambiente. Estes devem reduzir a utilização dos recursos naturais e buscar uma maior inclusão social. Já os países desenvolvidos devem promover uma substituição energética, buscando padrões de consumo mais sustentáveis, além de auxiliar os países em desenvolvimento a não cometer os mesmos erros, também em busca de uma economia sustentável.

RASKIN et al. (2002) afirma que a humanidade vive sua fase planetária, o ápice da evolução humana. Pela primeira vez, a dinâmica do desenvolvimento humano deve ser entendida como um fenômeno de escala global e não mais enxergado através de divisões locais. Conseqüentemente, os impactos ambientais também serão globais. Nos últimos anos observamos o exemplo da disseminação global da COVID-19, com os primeiros casos identificados em dezembro de 2019 e sendo declarada como uma pandemia em pouco mais de três meses (SICILIANO et al., 2020). Outro exemplo da fase planetária são as mudanças climáticas. Neste contexto, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) ocupa papel de referência mundial na divulgação do conhecimento científico sobre as mudanças climáticas e no direcionamento de práticas de combate e mitigação, compilando os últimos resultados obtidos sobre mudanças climáticas, seus

impactos e riscos associados por todo o planeta e consolidando propostas de adaptação e mitigação a pequeno e médio prazo (IPCC, 2023).

As últimas publicações ratificam a influência das atividades antropogênicas em uma elevação de 1,1°C na temperatura média do planeta entre os períodos 1850-1900 e 2011-2020, destacando que esse aumento foi ainda maior sobre regiões continentais (1,59°C). Dentre as causas, o relatório destaca a emissão de gases de efeito estufa, mas também pontua contribuições referentes às mudanças no uso do solo, mudanças no estilo de vida da população e um consumo insustentável de energia.

REGOTO (2020) analisou tendências sazonais e anuais de indicadores de extremos de temperatura do ar e precipitação no Brasil, investigando se há mudanças nos extremos climáticos do Brasil nas últimas décadas, avaliando se o clima no Brasil está se alterando e se extremos de precipitação estão se tornando mais frequentes e mais intensos. O estudo consistiu de dados diários observados de temperaturas máxima e mínima e precipitação oriundos de estações do INMET e pluviômetros da Agência Nacional de Águas para o período de 1961 a 2018. Para avaliar a significância estatística das tendências dos extremos climáticos, o autor utilizou os métodos estatísticos Curvatura de Sen e Mann-Kendall.

Os resultados obtidos em REGOTO (2020) indicam uma tendência de aquecimento estatisticamente significativo sobre o Brasil, destacando-se uma redução na amplitude térmica diária para a Região Sul (maiores temperaturas mínimas) e uma elevação da amplitude térmica diária para as regiões Centro-Oeste, Nordeste e Sudeste (maiores temperaturas máximas). Em relação à precipitação, observa-se que não há um indicativo consistente sobre o Brasil, apenas regionalmente. No Nordeste, por exemplo, observa-se um sinal consistente e robusto de redução da precipitação média, indicando um clima menos chuvoso. Por outro lado, as evidências indicam um clima chuvoso para a Região Sul e porção sul do Centro-Oeste. O indicador CDD, por exemplo, que contabiliza o máximo de dias consecutivos no ano com precipitação abaixo de 1 mm, estabelece um maior prolongamento dos períodos de estiagens ao longo dos anos para o Nordeste, o centro-norte do Sudeste e o sul do Centro-Oeste.

Após esta breve discussão sobre desenvolvimento sustentável, é importante destacar que um dos pilares das práticas de sustentabilidade é a substituição das fontes de energia derivadas de combustíveis fósseis, como petróleo e carvão, por fontes de energia

renováveis, como a energia solar e a energia eólica. As fontes de energia tradicionais, baseadas na queima de combustíveis fósseis, estão cada vez mais escassas, caras e ambientalmente insustentáveis, ao passo que fontes de energia renováveis impactam menos o meio ambiente e têm se mostrado como alternativas economicamente viáveis a médio e longo prazo (DRAXL et al., 2010; CARVALHO et al., 2012; DEPPE et al., 2013; CARVALHO et al., 2014b; MATTAR E BORVARÁN, 2016). Com efeito, a comunidade científica tem se debruçado sobre a missão de encontrar fontes de energia alternativas baratas e que não impactem tanto no meio ambiente. Dentre o leque de fontes de energia alternativas destaca-se a geração de energia eólica, reconhecida como uma opção economicamente competitiva e viável e que se expande mundialmente ano após ano. Entrementes, a explosão no número de torres eólicas instaladas demanda o aperfeiçoamento das técnicas de previsão do regime de vento que forneçam melhores informações para tomadas de decisão sobre o planejamento de instalações de parques eólicos *onshore* e *offshore*.

Diferentemente de outras fontes de energia, como os combustíveis fósseis e até mesmo a energia solar, a disponibilidade de ventos para a geração de energia eólica varia significativamente no tempo e no espaço, sendo assim indispensável conhecer o comportamento do regime de ventos de uma região de interesse e ser capaz de produzir previsões com alta confiabilidade. A expansão da geração de energia eólica, somada à ocorrência de eventos meteorológicos extremos, tem elevado nos últimos anos a busca por melhores ferramentas para a previsão do vento próximo à superfície. No entanto, diversos fatores dificultam essas simulações, desde o relevo à fenômenos meteorológicos de subescala, e até mesmo a carência de dados observados em superfície e o custo computacional de modelos atmosféricos de maior resolução (GIANNAKOPOULOU E NHILI, 2014; PEREIRA et al., 2015; RAMOS et al., 2018). Estudos que buscam descrever o regime de vento de uma região envolvem a coleta de dados e a modelagem numérica de variáveis meteorológicas. O pontapé inicial do planejamento eólico consiste em realizar simulações do recurso eólico da região de interesse, de forma a obter uma visão preliminar da capacidade de geração de energia do local. Em seguida, é imprescindível a instalação e manutenção de uma rede de anemômetros e torres de anemômetros (ou outros perfiladores verticais anemométricos) por um período de pelo menos um ano, já que a aplicação de um modelo numérico requer, antes de tudo, a validação de suas simulações, de forma a destacar suas virtudes e suas falhas. É

fundamental para o planejamento e para a tomada de decisões sobre a instalação de torres de energia eólica identificar qual configuração do modelo numérico funciona melhor para certo tipo de padrão atmosférico ou para certa região e saber o quanto o modelo pode errar e os riscos associados aos erros das simulações (DRAXL et al., 2010; CARVALHO et al., 2012; DEPPE et al., 2013; CARVALHO et al., 2014b; GIANNAKOPOULOU E NHILI, 2014; MATTAR E BORVARÁN, 2016). Essas simulações preliminares são importantes para a viabilidade econômica do projeto, evitando que a rede de anemômetros seja instalada em local de pouca capacidade de geração de energia e permitindo ao gestor conhecer o comportamento do regime de vento do local.

1.2. Estado Atual da Geração Eólica no Brasil e no Mundo

Em um âmbito mundial, o Departamento de Energia dos EUA espera que 20% dos lares americanos sejam abastecidos por energia eólica até 2030 (DEPPE et al., 2013), enquanto que, de acordo com DRAXL et al. (2010), a geração de energia eólica é responsável por mais de 20% da matriz elétrica da Dinamarca. CARVALHO et al. (2012) e CARVALHO et al. (2014b), por sua vez, afirmam que Portugal é um dos países líderes em capacidade instalada, com cerca de 20% de sua matriz elétrica oriunda de produção eólica, ficando atrás apenas da Dinamarca em termos de percentual da matriz elétrica. Por fim, MATTAR E BORVARÁN (2016) concluíram que o investimento em energia eólica contribuirá para difundir ainda mais uma forma de energia de baixo impacto ambiental e barata, tendo assim grande impacto social em nações em desenvolvimento, como o Chile.

O Balanço Energético Nacional (EPE, 2022), publicado anualmente pela Empresa de Pesquisa Energética, é uma importante referência de fonte de dados de energia no Brasil, servindo como instrumento de planejamento energético e indicando tendências de oferta e consumo de energia. De acordo com o Balanço Energético 2022, relativo ao ano-base 2021, as fontes renováveis respondem por 78,1% da oferta interna de eletricidade do Brasil. A figura 1.1 apresenta a participação das fontes de energia renováveis na matriz elétrica brasileira, além de comparar com a média mundial e dos países membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE).

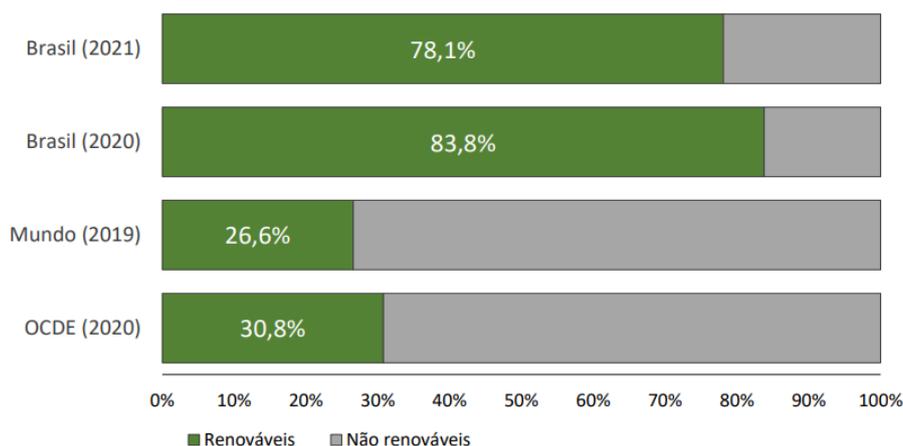


Figura 1.1: Participação das fontes de energia renováveis na matriz elétrica brasileira e as médias mundiais e dos países membros da OCDE (Fonte: EPE (2022)).

O Brasil dispõe de uma matriz elétrica de caráter predominantemente renovável, com destaque para a fonte hidráulica que responde por 53,4% da oferta interna. A produção de eletricidade a partir da fonte eólica alcançou 72.286 GWh em 2021, equivalente a um aumento de 49,1% desde 2018, quando se atingiu 48.475 GWh. Em termos percentuais, a produção eólica representava 6,8% da Matriz Elétrica Brasileira em 2017, pulando para 10,6% em 2021 (EPE, 2022). As figuras 1.2 e 1.3 mostram as diferentes fontes de energia renovável presentes na matriz elétrica brasileira, indicando a predominância da fonte hidráulica, e a evolução anual da geração de energia por fontes eólicas, indicando um forte crescimento na última década.

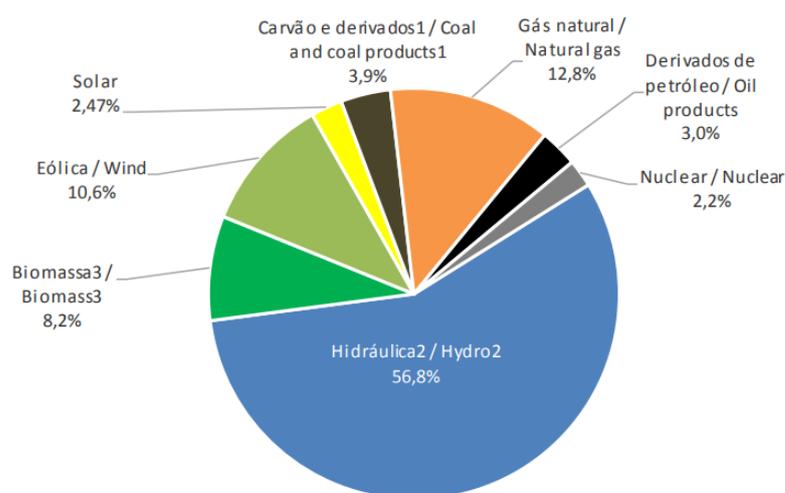


Figura 1.2: Participação das diferentes fontes de energia renovável presentes na matriz elétrica brasileira (Fonte: EPE (2022)).

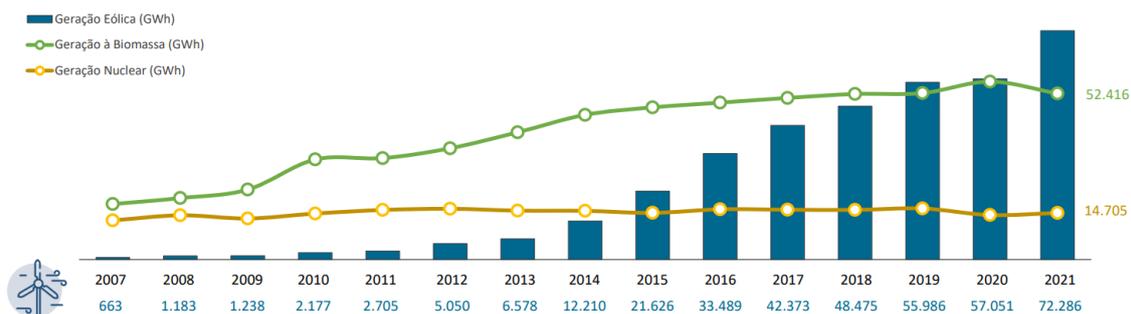


Figura 1.3: Evolução anual da geração de energia por fontes eólicas em comparação com a geração nuclear e por biomassa (Fonte: EPE (2022)).

PEREIRA et al. (2013) destacam que, nas últimas décadas, os países desenvolvidos têm investido substancialmente em fontes renováveis de energia e na aceleração da transição de sua matriz energética. Isto se deve não apenas às metas de redução de emissão dos gases do efeito estufa, mas também pela busca por uma maior segurança energética a partir da diversificação de sua matriz energética. Conforme será discutido nesta Dissertação, a região Nordeste do Brasil (NEB) se destaca negativamente como uma região de contrastes sociais e econômicos e, dentre os obstáculos para um maior desenvolvimento econômico do NEB, é possível destacar um planejamento energético pouco eficiente, que leva a atrasos logísticos e tecnológicos. Por consequência, uma maior dependência em relação aos seus recursos naturais disponíveis acarreta uma maior degradação ambiental, aumentando as taxas de desmatamento e potencializando os processos de desertificação e redução da fertilidade do solo (CASTRO, 2012).

SILVA JÚNIOR et al. (2016) e SANTOS DA SILVA et al. (2018) afirmam que uma importante característica da matriz elétrica do NEB é a viabilidade de estratégias de complementação entre geração hidrelétrica e eólica, visto que a estação de seca se sobrepõe aos períodos com ventos mais favoráveis e vice-versa. Assim, a geração de energia eólica pode ser vista como um complemento à geração de energia hidrelétrica no NEB (SILVA et al. 2015), uma vez que o ciclo sazonal do regime de ventos tem picos alternados aos picos das vazões dos rios. GERMANO et al. (2016) e RAMOS et al. (2018) destacam que a matriz elétrica brasileira é muito dependente da geração hidrelétrica, o que não é adequado do ponto de vista estratégico, pois esta modalidade encontra-se próxima de sua capacidade máxima. Por isso, o investimento na geração eólica ajudará não apenas na redução do impacto ambiental ocasionado pela geração de energia, como

também no aumento da segurança energética nacional. Ademais, cenários de mudanças climáticas apresentados por MARENGO et al. (2016) e REGOTO (2020) indicam redução nos acumulados de precipitação no NEB, afetando a vazão dos rios e, assim, a capacidade de produção hidrelétrica da região.

1.3. Geração Eólica de Pequeno Porte e Legislação Brasileira

De fato, a produção eólica de grande porte está consolidada no Brasil e no mundo. Atualmente, a busca por inovações na produção eólica atua em três principais fronteiras: em direção ao mar, a partir da instalação de parques eólicos *offshore*; em alturas maiores, que proporcionarão o aproveitamento de ventos mais intensos; e para baixo, ou seja, a utilização de aerogeradores de pequeno porte em regiões urbanas ou de baixo potencial eólico, possibilitando a geração eólica em locais onde a construção de grandes parques eólicos é inviável por restrições ambientais, econômicas ou geográficas. O escopo desta Dissertação é justamente a fronteira para baixo. Considerando apenas o segmento de geração eólica de pequeno porte, EUA (40%) e China (37%) concentram grande parte da produção mundial (PEREIRA et al., 2013), enquanto que na Europa, o consumidor atua como um elemento ativo do sistema elétrico, promovendo uma descentralização da geração de energia e uma semi-autonomia energética em algumas residências. Como será apresentado posteriormente, a geração eólica de grande porte já é bastante explorada no NEB, tornando a região protagonista no âmbito nacional. Todavia, a geração de pequeno porte ainda é pouco explorada na região, e no Brasil de forma geral.

ROSATO (2018) destaca que grandes torres eólicas são instaladas onde de fato há um enorme recurso eólico que justifique o investimento na estrutura, enquanto que aerogeradores de pequeno porte atendem diretamente a demanda do consumidor, como, por exemplo, agricultores que necessitam de energia para irrigar suas plantações ou pequenas indústrias buscando alternativas para reduzir o custo com energia e se manter competitivas. O autor afirma ainda que aerogeradores de pequeno porte, juntamente com biodigestores caseiros e placas solares individuais, são fundamentais na manutenção de uma economia circular, descarbonizada e comprometida com práticas de desenvolvimento sustentável para as futuras gerações, além de democratizar o acesso à energia, já que a produção destes equipamentos não necessita de tecnologia sofisticada

As normas internacionais de padronização de tecnologias elétricas e eletrônicas, estabelecidas pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), classificam um

aerogerador como de pequeno porte quando a área de varredura das suas pás for menor do que 200m^2 , o que equivale a um diâmetro de rotor menor que 16m e potência em torno de 20kW (IEC, 2013). Em relação à altura, os aerogeradores podem ser instalados em torres de no mínimo 9 m de altura. A figura 1.4 ilustra a relação entre o diâmetro de rotação das pás e a potência esperada, considerando a mesma velocidade do vento:

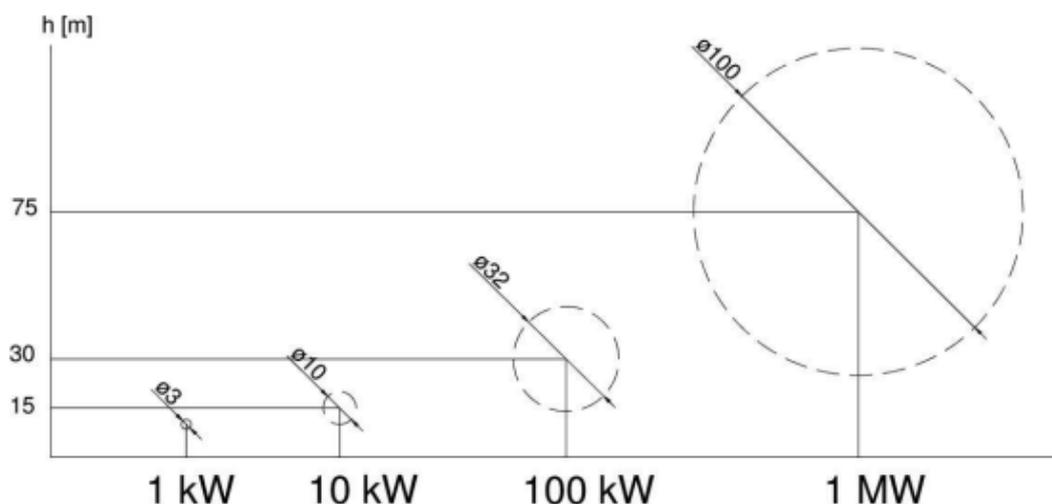


Figura 1.4: Relação entre o diâmetro de rotação das pás e a potência gerada. (Fonte: ROSATO (2018)).

ARAÚJO et al. (2021) analisaram o estado atual do mercado de turbinas de pequeno porte, destacando as características do setor, desafios e projeções. A conclusão é de que a aplicação de turbinas de pequeno porte no Brasil ainda dá os primeiros passos, em contraste ao substancial aumento no número de parques eólicos de grande porte. Os autores também enfatizam os potenciais impactos de um maior aproveitamento das turbinas de pequeno porte, desde a simples geração de energia elétrica até a cadeia de trabalho envolvida no processo, passando pelo maior potencial de desenvolvimento de regiões que outrora seriam deficientes do ponto de vista energético.

PEREIRA et al. (2015) destacam a reduzida quantidade de projetos com aerogeradores de pequeno porte em contrapartida ao crescente número de projetos de grande porte, indicando como causa a carência de dados, incentivos e pesquisa. Neste artigo, o objetivo dos autores foi avaliar a percepção de potenciais consumidores de projetos eólicos de pequeno porte, tendo como foco a identificação de fatores relevantes para o consumidor na aquisição do produto. Os autores concluem que o principal fator influenciador na aquisição de aerogeradores de pequeno porte, do ponto de vista do

consumidor, é a redução dos gastos com energia elétrica, sendo o viés econômico determinante para os investimentos no setor. A seguir, será apresentado um breve resumo de como a legislação brasileira evoluiu nos últimos anos em relação às políticas de investimento e precificação para a geração eólica de pequeno porte.

BARCELLOS (2014), SILVA FILHO et al. (2015), ARAÚJO (2016), MARAFFON (2018) e ALVES et al. (2020) concordam que o primeiro passo para um estímulo relevante para a geração de energia eólica de pequeno porte foi dado com a publicação da Resolução Normativa (REN) nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no ano de 2012 (ANEEL, 2012). Ela estabelece o sistema de compensação de energia elétrica (SCEE), criando as bases para a geração distribuída e definindo as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. PEREIRA et al. (2015) também destacam a importância da REN 482, que incentivou avanços no setor de geração distribuída, todavia ressaltam que ainda é imprescindível a implementação de alguns instrumentos de fomento a médio e longo prazo deste segmento de mercado, como abatimento do imposto de renda e desoneração tributária. BARCELLOS (2014) afirma que o SCEE simplifica a conexão das pequenas centrais com as redes de distribuição de energia elétrica. Este sistema permite o fornecimento de energia para a concessionária da região e gera um crédito de energia, que pode ser utilizado posteriormente para abater o consumo desta unidade produtora, eliminando assim a necessidade de se armazenar energia em baterias. No entanto, as resoluções propostas ainda não traziam segurança e estabilidade para o setor, desencorajando investimentos mais significativos.

Posteriormente, foram publicadas a REN 687 (ANEEL, 2015), propondo uma revisão das regras do SCEE, com novos modelos de negócio, que permitiram a expansão do mercado, e a PL 5829, que consistiu na apresentação do Projeto de Lei que se tornaria a Lei 14300/2022 (BRASIL, 2022). De acordo com a REN nº 482 e, posteriormente, as RENs nº 687 e nº 786 (ANEEL, 2017), a micro e a minigeração distribuída são definidas como centrais geradoras de energia elétrica a partir de fontes renováveis que estão conectadas à rede de distribuição. Para a microgeração, a potência instalada não deve ultrapassar os 100kW (valor atualizado para 75kW pela REN nº 687), enquanto que para a minigeração a potência instalada não deve ultrapassar 1MW (valor atualizado para 5MW pela REN nº 786). O sistema de compensação de energia elétrica, por sua vez, estabelece que a energia injetada na rede a partir de uma unidade de micro ou minigeração

seja cedida à distribuidora local e compensada por meio do consumo de energia da unidade.

ARAÚJO et al. (2021) ratificam que a participação reduzida da geração eólica de pequeno porte se deve à falta de incentivo econômico, legislação regulatória incipiente e carência de pesquisa científica. Segundo os autores, os desafios da transição energética passam também por organizar um ambiente favorável à utilização das novas fontes de energia, seja no âmbito técnico, seja no âmbito socioeconômico. De acordo com BARCELLOS (2014), a REN 482 contribuiu para unir consciência socioambiental, sustentabilidade e viabilidade econômica à geração de pequeno porte. À médio e longo prazo, a autora afirma que a comercialização do excedente de produção para a rede local de distribuição promoverá uma diversificação da matriz energética e uma maior independência das fontes de energia não-renováveis. ARAÚJO (2016) ressalta a importância da geração distribuída como um meio para a descentralização da produção de energia elétrica. A geração de pequeno porte é mais descentralizada e se aproxima mais do cotidiano, descartando grandes instalações e extensas linhas de transmissão. O autor concorda que a falta de incentivos públicos e financeiros, além da divulgação insuficiente, contribuem para que boa parte da população brasileira desconheça as vantagens da microgeração de energia elétrica estabelecidas pelas RENs 482 e 687. SILVA FILHO et al. (2015) afirmam que a regulamentação das leis necessárias para o desenvolvimento da microgeração de energia eólica será importante na maior utilização de turbinas eólicas de pequeno porte.

Finalmente, em janeiro de 2022, foi sancionada a Lei 14.300/2022, conhecida também como o “Marco Legal da Geração Distribuída” por introduzir diretrizes mais detalhadas e trazer maior segurança jurídica para o mercado de geração distribuída (BRASIL, 2022). Destaca-se a especificação de componentes tarifários e direito adquirido e de como estes elementos serão valorados pela ANEEL. Dentre os avanços obtidos na Lei 14.300/2022, vale destacar a criação do Programa de Energia Renovável Social, propondo investimentos na instalação de sistemas de fontes renováveis direcionados para consumidores de maior vulnerabilidade social, redução do acionamento de usinas termelétricas a partir da compra de excedente de produção dos micro e minigeradores por parte das concessionárias e a inserção das redes municipais de iluminação pública no SCEE, facilitando a comercialização do excedente de produção por parte do micro/miniprodutor.

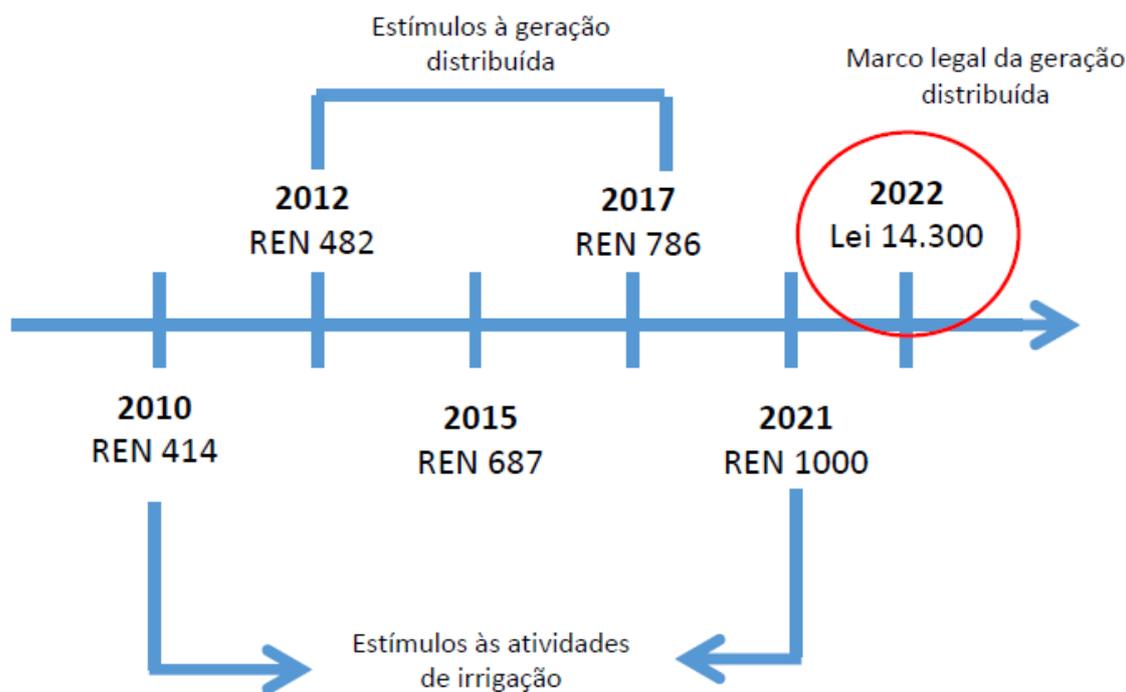


Figura 1.5: Linha do tempo com políticas públicas e precificação para irrigação e geração eólica de pequeno porte propostas pela legislação brasileira.

1.4. Relevância do Estudo

Visamos nesse estudo fomentar a inserção de inovações tecnológicas em regiões do Brasil que ainda dispõem de um planejamento energético deficitário, possibilitando a transformação do recurso eólico disponível em capital social, principalmente em localizações onde predominam as atividades agropecuárias de pequeno porte. De acordo com o Balanço Energético Nacional (EPE, 2022), Alagoas e Sergipe são os estados menos explorados do NEB no que se refere à produção de energia eólica (tabela 1.1). Em relação à capacidade instalada de Mini e Microgeração Distribuída (tabela 1.2), os resultados indicam o protagonismo do NEB na produção eólica, com 98,1% da produção nacional. Desta forma, o processo de escolha da região de estudo teve como critério o histórico déficit energético observado no NEB e seu enorme potencial eólico. Considerando os estados do NEB a reduzida produção eólica em Sergipe, somada a carência de trabalhos publicados sobre Meteorologia e estudo do regime de ventos na região, definiu-se, pois, o estado de Sergipe como região de estudo para esta Dissertação, com foco no Sertão de Sergipe, novamente levando em conta regiões de maior déficit energético.

O desenvolvimento desta Dissertação se sucedeu através de quatro principais questionamentos, que eventualmente foram respondidos pelos resultados obtidos:

- 1) É possível abater os altos custos com irrigação a partir da geração eólica de pequeno porte?
- 2) É possível gerar energia eólica a partir do SBM, beneficiando pequenos produtores locais?
- 3) Como o sistema de brisa marítima (SBM) influencia o regime de vento na região de estudo? A área de atuação do SBM se restringe ao litoral?
- 4) É possível desenvolver uma metodologia de modelagem numérica eficiente do potencial eólico da região de estudo?

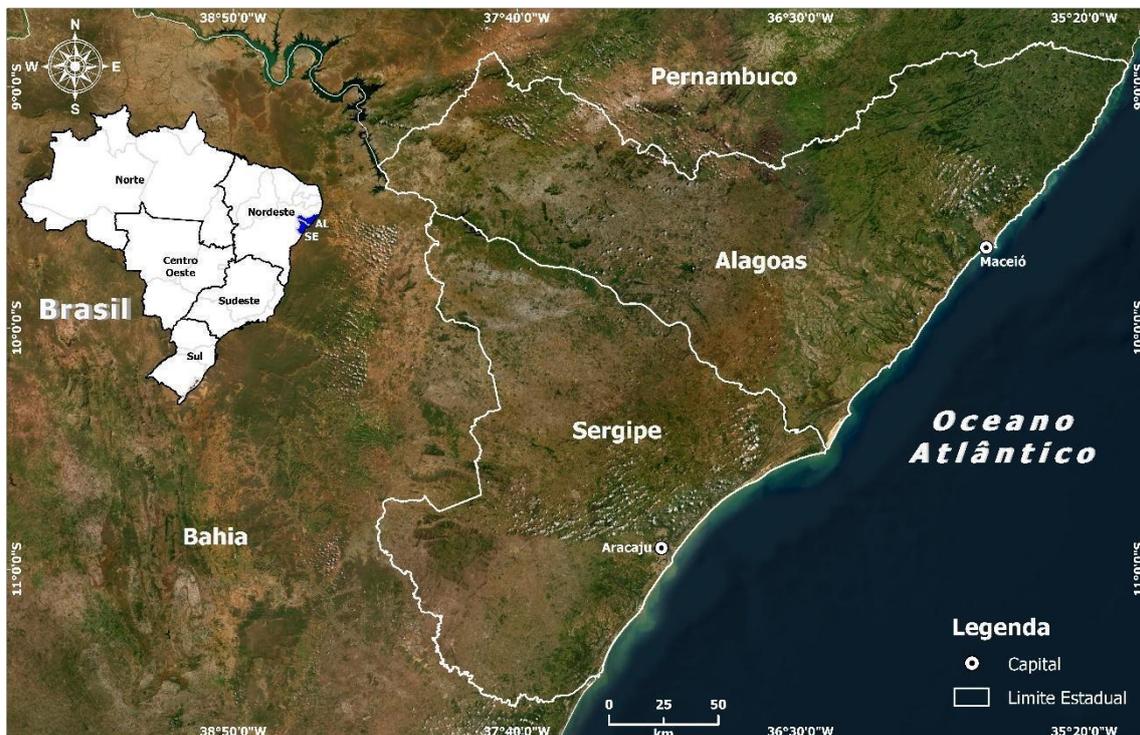


Figura 1.6: Região de estudo desta Dissertação (Próprio autor)

Considerando alguns aspectos de planejamento energético mencionados, como a necessidade de investimento em novas fontes de energia, a possibilidade de estratégias de complementação entre fontes hidrelétrica e eólica e o risco estratégico em depender apenas de geração de energia hidrelétrica, e considerando também os seguidos avanços

propostos na legislação, fornecendo instrumentos de fomento a médio e longo prazo para este mercado, este trabalho buscou avaliar a viabilidade econômica do uso de geração eólica como subsídio para técnicas de irrigação em propriedades de agricultura familiar do Sertão de Sergipe.

Tabela 1.1: Geração de eletricidade no Brasil, região Nordeste e nos estados do NEB, de acordo com a fonte utilizada. Valores em GWh. (Fonte: EPE (2022)).

	Geração Total	Hidro	Eólica	Solar	Nuclear	Termo	Bagaço de Cana	Lenha
Brasil	656.109	362.818	72.286	16.752	14.705	189.548	34.342	2.224
Nordeste	147.538	29.956	65.826	7.280	-	44.476	2.400	103
Maranhão	18.445	2.848	1.782	183	-	13.632	13	-
Piauí	11.499	565	8.904	1.975	-	55	54	-
Ceará	16.609	4	8.287	1.037	-	7.281	-	-
Rio G. Do Norte	24.104	14	22.099	474	-	1.517	184	-
Paraíba	3.434	3	892	477	-	2.062	263	-
Pernambuco	12.841	2.082	2.951	570	-	7.238	856	-
Alagoas	10.255	9.305	-	74	-	875	851	-
Sergipe	9.861	4.949	61	55	-	4.796	128	8
Bahia	40.490	10.186	20.850	2.435	-	7.019	50	95

Tabela 1.2: Capacidade instalada de Mini e Microgeração Distribuída no Brasil, de acordo com a fonte utilizada. Valores em GWh. (Fonte: EPE (2022)).

Região	Hidro	Termo	Eólica	Solar	Total
Total	100	100	100	100	100
Norte	11,1	1,9		6,1	6,1
Nordeste	0,4	8,6	98,1	19,6	19,5
Sudeste	74,9	43,9	0,8	35,6	35,9
Sul	9,8	21,2	1,1	22,6	22,4
Centro-Oeste	3,9	24,4		16,1	16

2. Objetivos

Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade econômica da geração de energia eólica de pequeno porte para atendimento aos pequenos produtores do estado de Sergipe, com principal foco para o plantio do milho na região do Sertão Sergipano.

Objetivos Específicos

- Compreender o acoplamento dos sistemas meteorológicos atuantes na região de estudo, sua influência no regime de vento e potencial eólico local;
- Identificar as subáreas da região de estudo que apresentem homogeneidade da intensidade do vento;
- Avaliar o desempenho do modelo atmosférico WRF na representação do regime de vento, com base na comparação com dados observados da rede de estações meteorológicas de superfície instaladas na região de estudo.

3. Fundamentação Teórica

3.1. Caracterização da Região de Estudo

Após enfatizar a relevância da geração de energia por fontes renováveis e compreender a importância estratégica da geração por fonte eólica para o NEB, faz-se necessário realizar uma caracterização da região de estudo deste trabalho. A região Nordeste do Brasil (NEB) se localiza entre as latitudes de 1°S e 18°S e entre as longitudes 34°O e 48°O, tendo o Oceano Atlântico à norte e à leste, a região Norte do Brasil à oeste e a região Sudeste do Brasil à sul. Seu relevo é caracterizado por planícies litorâneas, se estendendo por todo o litoral do NEB desde o Maranhão até a Bahia, e por presença de planaltos, chapadas e serras em seu interior, como o Planalto da Borborema e as Chapadas (REBOITA et al., 2016). O NEB pode ser dividido em três grandes biomas: caatinga, cerrado e mata atlântica. A caatinga é observada na região do Sertão Nordestino e composta por árvores baixas e arbustos característicos de regiões de baixa pluviosidade. Já o cerrado é observado nas porções oeste e sul do NEB, próximo aos limites com as regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste, sendo caracterizado por vegetação de savana, com árvores e arbustos esparsos e plantas baixas, como capim. Por fim, o bioma mata atlântica, localizado na região litorânea do NEB e bem característico de todo o litoral do Brasil, constitui a chamada Zona da Mata, com clima úmido e solo fértil.

De acordo com o último Censo Demográfico, realizado em 2010, o NEB possui 53 milhões de habitantes, dos quais 40% habitam a sub-região da Zona da Mata. Ao passo que as sub-regiões do Agreste e Zona da Mata abrigam as maiores cidades, concentrando população e recursos econômicos e tecnológicos, as sub-regiões do Meio-Norte e, principalmente, do Sertão tem baixa densidade demográfica e economia baseada no extrativismo, com reduzido emprego de tecnologia (CASTRO, 2012). Em relação ao uso do solo e sua antropização, observa-se a partir da figura 3.1 diferentes estágios de degradação, seja por conta da agricultura familiar (AF), de pequeno e médio porte, seja pela agricultura intensiva, de grande escala. Por consequência, já são observadas áreas suscetíveis à desertificação.

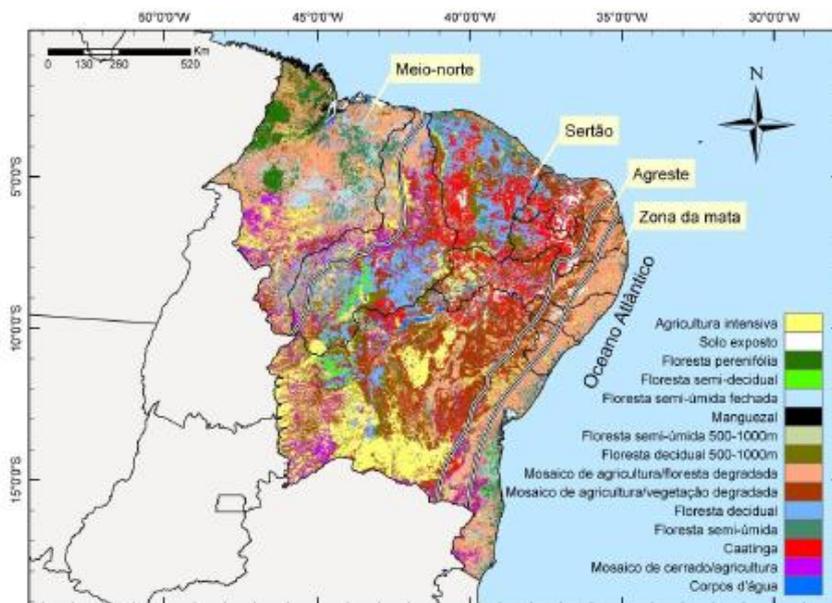


Figura 3.1: Uso do solo da região Nordeste do Brasil (Fonte: REBOITA et al. (2016)).

Segundo TEIXEIRA (2014), o NEB foi caracterizado como uma das cinco principais regiões do Brasil durante o Estado Novo de Vargas, decorrente de um esforço de construção e consolidação da identidade nacional. Assim como acontece atualmente, as preocupações e ações por parte dos órgãos governamentais eram a seca e medidas paliativas contra as consequências dos períodos de estiagem, ações essas que duravam apenas até o próximo evento de seca. Na época, tais medidas de resposta aos efeitos da seca recebiam o nome de “política hidráulica”. De acordo com CASTRO (2012), desmatamentos e queimadas visando o preparo da terra para atividades agrícolas são práticas recorrentes na região que, associadas aos episódios de seca, degradam o ambiente e aceleram os processos de desertificação, com deterioração do solo e dos corpos d’água e redução da biodiversidade.

Para CASTRO (2012) e DE ALCÂNTARA SILVA et al. (2013), as famílias rurais do Sertão são altamente vulneráveis aos riscos da seca, sendo necessário o enfrentamento por meio de políticas públicas baseadas no desenvolvimento sustentável da região. Estiagens prolongadas ainda são um dos grandes problemas do NEB, principalmente no semiárido, que engloba as sub-regiões do Sertão e do Agreste nordestinos, correspondendo a 57% da área total do NEB. CASTRO (2012) destaca a estiagem de 1993, considerada a pior dos últimos 50 anos. De acordo com DE ALCÂNTARA SILVA et al. (2013), os eventos de seca no NEB representam um desastre ambiental e social

documentado desde o século XVII. Entretanto, a região ainda apresenta alta vulnerabilidade e baixa resiliência energética em função da ausência de políticas públicas eficientes. Segundo DE ALCÂNTARA SILVA et al. (2013) apud VILLA (2000) a seca que atingiu o NEB entre os anos de 1877 e 1879 foi uma das mais relevantes, tendo vitimado 4% da população local.

ARAÚJO et al. (2021) afirmam que um maior acesso à eletricidade impacta diretamente em diversos problemas enfrentados pelas camadas mais vulneráveis da população, como educação, saúde e renda, acelerando seu desenvolvimento e inserção no mercado de trabalho. O NEB tem grande importância histórica e cultural para o Brasil, sendo o primeiro território ocupado no processo de colonização, muito devido ao cultivo da cana-de-açúcar, que era o petróleo do século XVII. Os trabalhos de CASTRO (2012), DE ALCÂNTARA SILVA et al. (2013) e TEIXEIRA (2014) evidenciam a histórica baixa resiliência do NEB perante os impactos de episódios de seca. As estratégias de desenvolvimento da região devem considerar o passado e presente de déficit energético, um obstáculo antigo ao desenvolvimento social e econômico da população local, e também as projeções de redução nos volumes de precipitação para as próximas décadas, destacados nos cenários de mudanças climáticas apresentados por MARENGO et al. (2016) e REGOTO (2020), que poderão impactar ainda mais a região no âmbito econômico e social. Portanto, a busca por alternativas energéticas deve ser encarada como um processo urgente e decisivo para o desenvolvimento futuro da região.

3.1.1 Atividade Rural e Irrigação

O objetivo principal deste trabalho é fomentar a inserção de inovações tecnológicas em regiões de nosso País que ainda dispõe de um planejamento energético deficitário, com foco em propriedades de AF do Sertão Sergipano. De acordo com ENGEL et al. (2017), a produção de alimentos oriunda de propriedades de agricultura familiar é responsável por 70% da produção nacional, ocupando um papel protagonista na base econômica de 90% dos municípios brasileiros e contribuindo com 35% do produto interno bruto nacional. Ainda de acordo com ENGEL et al. (2017), a AF no Brasil deixou de ser sinônimo de uma agricultura arcaica ou de subsistência, com pequena produção e reduzido uso de tecnologias, passando a atuar como um importante gerador de desenvolvimento econômico e social. Segundo VASCONCELOS (2013), a AF tem papel crucial na economia de pequenas cidades, sendo responsável por inúmeros

empregos diretamente nas plantações e indiretamente no comércio e outros serviços prestados.

O Relatório de Atividades da Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe (EMDAGRO, 2018) apresenta informações relevantes sobre a importância da AF: 89,8% dos estabelecimentos rurais do estado de Sergipe pertencem e são cultivados por agricultores familiares. Considerando lavouras permanentes, 88,6% pertencem a agricultores familiares e, para lavouras temporárias (policultura de milho, feijão, mandioca e hortaliças), a porcentagem vai a 91,4%. Por fim, a AF é responsável por 84,1% da ocupação em estabelecimentos rurais do estado. MENEZES et al. (2019) analisou a configuração espacial da produção de alimentos em Sergipe, destacando a onipresença da AF em meio à produção de grande porte. De acordo com os autores, a diversidade de alimentos cultivados em Sergipe está diretamente ligada às atividades de AF, destacando a produção de laranja no setor Centro-Sul do estado, abacaxi no Centro-Sul e Sertão, arroz e coco-da-baía no Leste e Baixo São Francisco, milho no Agreste e Sertão, mandioca no Centro-Sul e Agreste e a criação de gado para produção de leite, queijos e os suínos no Sertão Sergipano.

Atualmente, inovações tecnológicas são cada vez mais presentes em propriedades de AF. VASCONCELOS (2013) analisou a modernização da AF na região de Itabaiana, Sergipe, a partir da aplicação de métodos de irrigação como meio tecnológico na produção agrícola, gerando aumento na renda familiar. Em períodos de seca, a irrigação das plantações a partir de reservas de águas subterrâneas é o único recurso disponível. De acordo com o autor, inovações tecnológicas como a irrigação ampliam o mercado de trabalho e contribuem para manter na área rural uma população que eventualmente buscaria renda na área urbana-industrial.

EMBRAPA (2006) e OSTI et al. (2018) investigaram a influência da irrigação na cultura de feijão e milho. De acordo com EMBRAPA (2006), a cultura do milho é uma das mais eficientes, com elevada taxa de produção de matéria seca por unidade de água absorvida, apesar de demandar grande quantidade de água, de 400 a 700 mm ao longo de seu ciclo de desenvolvimento. OSTI et al. (2018) avaliaram a rentabilidade do milho e do feijão para diferentes quantidades de irrigação ao longo do processo de cultura destes grãos no estado do Mato Grosso do Sul. Considerando a região de estudo e a maior eficiência no uso da água, os autores concluíram que a lâmina de 190 mm, somada à

média anual de precipitação de 220mm de chuva, é ideal para a irrigação do milho. Por outro lado, a lâmina de 522mm, somada à precipitação de 220mm esperada para a região, é ideal para a irrigação do feijão. Portanto, o investimento em irrigação deve considerar o regime pluviométrico da região e as necessidades hídricas da cultura desejada. Outro fator decisivo é a produção na entressafra, levando a um uso intensivo do solo. Neste caso, deve se considerar também a disponibilidade de água da fonte e os riscos à qualidade do solo a médio e longo prazo.

OSTI et al. (2018) afirmam que é fundamental controlar e quantificar adequadamente as lâminas de irrigação das culturas, vislumbrando uma maior eficiência econômica, mas também considerando cenários de escassez de um recurso tão importante como a água. Os autores destacam que cada cultura terá suas exigências hídricas, bem como as necessidades de cada período de seu ciclo de desenvolvimento. Ademais, excesso de irrigação pode contribuir para erosão do solo e perda de minerais e nutrientes (lixiviação).

Considerando o protagonismo da AF no agronegócio brasileiro e na produção de alimentos essenciais para nossa população, ALBIERO et al. (2014) propôs uma metodologia de geração de energia eólica para pequenas propriedades no estado do Ceará localizadas em regiões com condição operacional de vento de baixa velocidade. Esta metodologia considerou a operacionalidade das turbinas, propondo adaptações às condições de intensidade de vento desfavorável, bem como sua maior viabilidade econômica, destacando que as inovações tecnológicas permitem a absorção dos custos de instalação e operação e superando os já elevados custos com energia que estes produtores enfrentam.

BARCELLOS (2014), SILVA FILHO (2015), ARAÚJO (2016), MARAFFON (2018) e ALVES et al. (2020) concordam que os altos custos com irrigação são parte importante do orçamento de um produtor rural, de forma que excessos de gasto com energia elétrica reduzem significativamente o lucro. Neste contexto, a REN n° 414, publicada em 2010 e atualizada pela REN n° 1000, publicada em dezembro de 2021, estabelecem algumas regras de prestação de serviço público sobre distribuição elétrica, dentre elas a adoção de um benefício tarifário de redução do valor do kWh destinado às atividades de irrigação, desde que sejam realizadas em um período diário contínuo de 8 horas e 30 minutos (ANEEL, 2021).

De acordo com o Artigo 184 da REN 1000, este benefício é válido para unidades consumidoras rurais onde seja desenvolvida atividade agropecuária, visando o fornecimento de energia elétrica para bombeamento de água destinada à atividade de irrigação. O artigo 186 estabelece que tais benefícios tarifários destinam-se apenas às atividades de irrigação, como o bombeamento para captação de água, aplicação da água no solo e iluminação dos locais de instalação do maquinário (ANEEL, 2021). Para estabelecimentos localizados na região Nordeste e municípios mineiros localizados no Polígono da Seca e Vale do Jequitinhonha, o chamado “desconto irrigante noturno” consiste em uma redução de 73% do valor final, cabendo a distribuidora local determinar o horário restrito à irrigação (ANEEL, 2021).

Dentre as investigações realizadas nesta Dissertação, destaca-se a possibilidade de se abater os altos custos com irrigação a partir da geração eólica de pequeno porte. Como descrito por EMDAGRO (2018) e MENEZES et al. (2019), o Estado de Sergipe apresenta alta concentração de estabelecimentos rurais cultivados por agricultores familiares, com destaque para a produção de milho no Sertão de Sergipe. Desta forma, este trabalho considerará os custos com energia elétrica para a região de estudo, fornecido pela concessionária Energisa (ENERGISA, 2022), sendo R\$ 0,60707 kWh para o consumidor do tipo “atividades rurais” e R\$ 0,16390 kWh para o consumidor do tipo “irrigante noturno”, como descrito na REN 1000.

3.2. Sistema de Informação Geográfica

Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são ferramentas computacionais de geoprocessamento que permitem a análise, integração e apresentação de informações georreferenciadas (SILVA, 2013). A partir de um extenso banco de dados geográficos, os SIGs facilitam a integração de dados de diversas origens e formatos, auxiliando na extração de informações relevantes. Ademais, esta ferramenta permite ao usuário a configuração e edição de mapas e representação gráfica destes dados.

As representações do mundo real fornecidas pelos SIGs são compostas por camadas de informação, considerando projeção cartográfica, sistema de coordenadas e sistema geodésico (SILVA, 2013). Desta forma, os SIGs demandam a definição de classes de informação, como localização, relevo e uso do solo, além dos elementos qualitativos fornecidos pelos dados utilizados, como informações socio-econômicas.

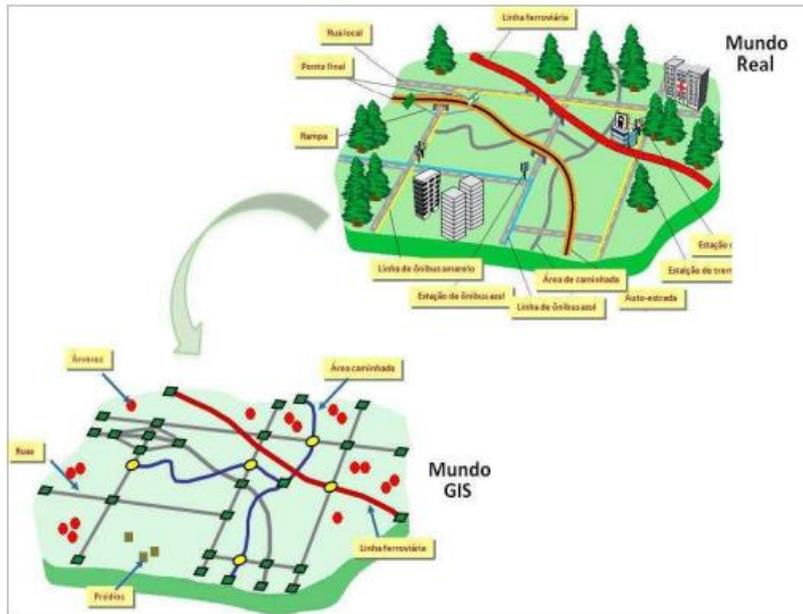


Figura 3.2: Representação do mundo real a partir do Sistema de Informação Geográfica (Fonte: SILVA (2013)).

Para realizar uma análise a partir de SIGs, faz-se necessário a definição de qual base de dados será utilizada, identificando a fonte destes dados, suas propriedades cartográficas e o modelo de representação. Em seguida, define-se o processo de tratamento dos dados e a produção de um modelo de análise. FRANCISCO et al. (2011) delimitaram as operações realizadas em um SIG em três grupos principais, a saber: gerenciamento do banco de dados geográficos, permitindo ao usuário manipular e agregar dados de diferentes origens e formatações; análises espaciais, permitindo ao usuário gerar novas informações a partir de combinações e espacializações deste banco de dados; e produção cartográfica, permitindo ao usuário a consolidação destas novas informações obtidas a partir de sua representação gráfica, na forma de mapas.

Dentre as aplicações destas novas informações obtidas por meio do SIG, destacam-se a definição das características de um projeto de irrigação, estudos de concentração de poluentes e mapas de risco relativos a estes poluentes e armazenamento de dados geográficos. SILVA (2013) utilizou a plataforma ArcGIS na integração de uma base de dados SIG, visando o desenvolvimento de uma ferramenta de suporte para a elaboração de um plano de emergência para o Complexo Nuclear de Angra dos Reis. O autor destaca que a contribuição do SIG na espacialização das informações e composição de um banco de dados foi decisiva para a elaboração do plano de emergência supracitado, servindo como base para estudos futuros. RODRIGUES et al. (2017) investigaram o

potencial de uso de energia eólica para irrigação de culturas de arroz e milho no Estado do Ceará, aplicando ferramentas de SIG. Combinando informações de velocidade do vento e produção destes grãos, foi possível identificar regiões potenciais para o uso de geração eólica.

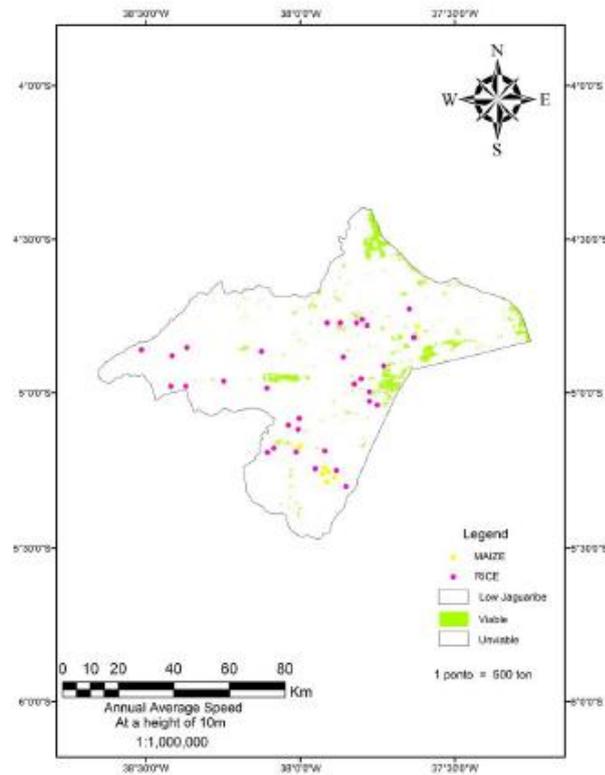


Figura 3.3: Resultados obtidos através do SIG por RODRIGUES et al. (2017).

3.3. Caracterização Meteorológica

Antes de implementar técnicas de modelagem do regime de ventos em uma região, é essencial conhecer as características do tempo e do clima locais. As etapas iniciais de qualquer estudo consistente sobre planejamento energético também necessitam de uma avaliação dos sistemas meteorológicos atuantes na região de estudo. Nesta Dissertação, na qual o foco é a geração eólica, não basta avaliar apenas como os sistemas atmosféricos influenciam os ventos no Sertão de Sergipe, mas também a precipitação e sua sazonalidade. O conceito de tempo se refere às condições meteorológicas que se alternam dia após dia, podendo variar com maior frequência. Por exemplo, um dia ensolarado, com poucas nuvens e sem precipitação, pode ser sucedido por um dia chuvoso, com queda na temperatura do ar e ventos mais intensos. Por outro lado, clima se refere ao conjunto de condições meteorológicas médias de uma região ao longo de no mínimo 30 anos, tendo assim uma pequena frequência de variabilidade temporal. Segundo a mais atual recomendação da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2017), as normais climatológicas de determinada região se referem a média dos últimos 30 anos de dados meteorológicos, considerando anos que terminam com zero (1990 a 2020 atualmente). Esta metodologia permite comparar, por exemplo, as normais climatológicas de vários períodos de 30 anos para regiões que disponham de muitos dados (1900-1930, 1930-1960, 1960-1990) e identificar padrões de variabilidade temporal destes parâmetros meteorológicos.

O clima do NEB é influenciado por sistemas meteorológicos de diferentes escalas espaciais e temporais. Meteorologistas ao redor do mundo estudam diversos tipos de fenômenos atmosféricos, com variadas escalas espaciais (área de atuação) e temporais (tempo de duração), desde pequenos vórtices até furacões e ondas planetárias. Com o intuito de organizar estes fenômenos de acordo com suas escalas espaciais e temporais, o argentino Isidoro Orlanski (1939-) publicou em 1975 uma classificação simplista dos fenômenos meteorológicos. Além de facilitar o estudo e monitoramento dos fenômenos, esta classificação é importante para indicar o tipo de impacto imposto por eles sobre suas regiões de atuação. Fenômenos de microescala afetam áreas mais restritas do que fenômenos de mesoescala, e em um espaço de tempo inferior, por exemplo. Seguindo a classificação em escalas proposta por Orlanski, podemos separar os sistemas meteorológicos que influenciam o tempo e o clima no NEB em dois grandes grupos: sistemas de grande escala (escala sinótica) e sistemas de mesoescala. Esta separação é

válida pois diferentes porções do NEB apresentam diferentes regimes de chuva, em função de diferentes sistemas meteorológicos atuantes.

T \ D		T					
		1 mês	1 dia	1 hora	1 minuto	1 segundo	
10.000 km		Ondas estacionárias	Ondas de maré				Macroescala α
		Ondas ultra longas					
2.000 km			Ondas baroclínicas				Macroescala β
200 km			Frentes e furacões				Mesoescala α
20 km			Jatos noturnos de baixos níveis Linhas de instabilidade Aglomerados de cumulonimbus Brisas vale-montanha terra-mar				Mesoescala β
2 km				Tempestades isoladas Ondas de gravidade interna Turbulência em céu claro Efeitos urbanos			Mesoescala
200 m				Tornados Convecção profunda Ondas de gravidade curtas			Microescala α
20 m				Redemoinhos de poeira Tornais Trocas de calor e umidade			Microescala β
						Plumas Rugosidade Turbulência	Microescala
		Escala Climatológica		Escala sinótica e planetária	Meso escala	Microescala	Definição Proposta

Figura 3.4: Escala de Orlanski (adaptado de ORLANSKI (1975)).

Tanto o tempo quanto o clima de um local são influenciados pelas características geográficas e pelos fenômenos meteorológicos observados nesta região. Dentre as características geográficas, temos a altitude, a latitude, a proximidade de mares e oceanos e a vegetação local (CAVALCANTI et al., 2009). Do ponto de vista meteorológico, destaca-se a atuação de massas de ar e a passagem de sistemas frontais como influenciadores do tempo e do clima, para citar alguns exemplos. Todos estes elementos geográficos e meteorológicos combinados contribuem para modular o tempo e o clima de uma região, afetando diretamente o ecossistema local e as atividades humanas. O clima do NEB pode ser dividido em três subclimas: clima litorâneo úmido, se estendendo ao longo do litoral leste do NEB, desde o Rio Grande do Norte até a Bahia; clima semiárido, observado no interior do NEB; e clima tropical, na porção oeste do NEB, englobando as regiões próximas da Floresta Amazônica (CAVALCANTI et al., 2009). A seguir será apresentada a caracterização meteorológica da região de estudo, contemplando os sistemas meteorológicos que influenciam o tempo e o clima no Leste do NEB (ENEB).

MOLION e BERNARDO (2002), ALVES et al. (2006) e SARMENTO (2009), entre outros, destacam cinco sistemas meteorológicos que influenciam substancialmente o tempo e clima no NEB, muitas vezes em conjunto: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs), Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs), instabilidades associadas às frentes frias que penetram no sul do NEB e o Sistema de Brisa Marítima (SBM). REBOITA et al. (2010) realizaram uma caracterização do regime de precipitação na América do Sul, destacando períodos de máximos e mínimos regionais e discutindo os sistemas meteorológicos relevantes para cada região. De acordo com a classificação aplicada, o NEB é dividido pelas regiões R6 e R7 (figura 3.5).

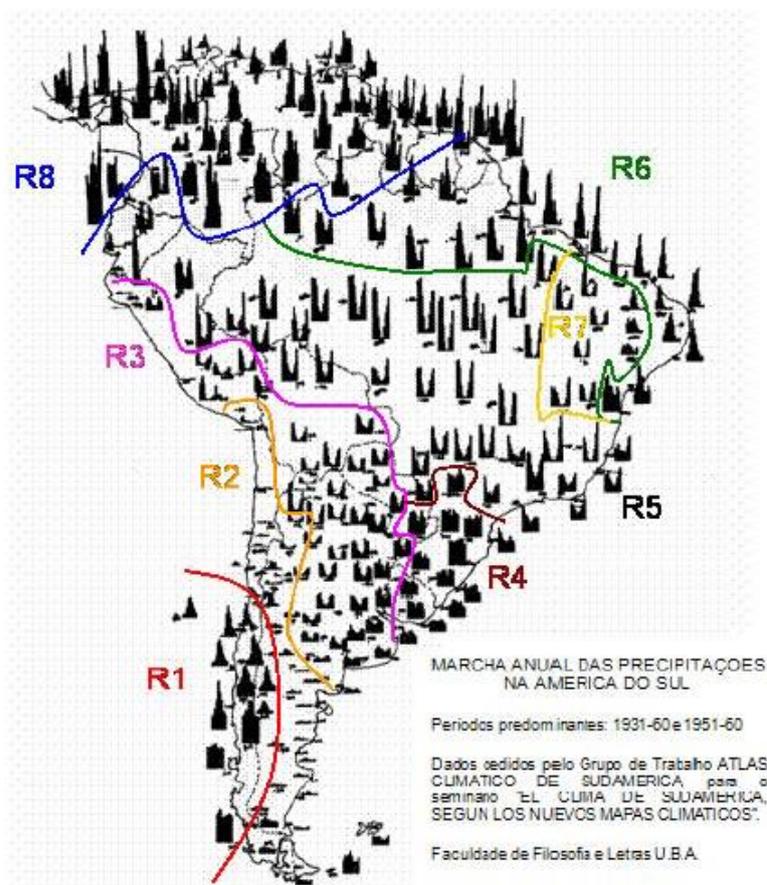


Figura 3.5: Classificação dos regimes de precipitação da América do Sul (Fonte: REBOITA et al. (2010)).

A região R7 corresponde ao Sertão Nordestino, região caracterizada por baixos totais pluviométricos anuais, apesar de se localizar na porção equatorial do planeta, apresentando valores máximos nos períodos de verão e outono e os mínimos no inverno. MOLION e BERNARDO (2002) e REBOITA et al. (2016) investigaram possíveis causas para estes baixos volumes de chuva, indicando que a região seja influenciada por movimentos subsidentes provenientes das células de circulação de Hadley e Walker. Estes movimentos subsidentes atuam inibindo a convecção em grande escala, dificultando a formação de nuvens de chuva. A região R6 corresponde à porção litorânea do NEB, diretamente influenciada pela variação intrassazonal da ZCIT e pela atuação de distúrbios ondulatórios de leste (DOLs), onde os máximos pluviométricos são observados no primeiro semestre do ano.

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o sistema meteorológico protagonista na região equatorial do planeta, sendo um importante gerador de

precipitação. Este sistema é definido a partir da observação de um conjunto de variáveis meteorológicas, como a presença do cavado equatorial, uma confluência dos ventos alísios, máxima temperatura da superfície do mar (TSM), máxima convergência de massa e máxima cobertura de nuvens convectivas, além de uma região com mínimos de radiação de onda longa (ROL) (HASTENRATH e HELLER, 1977; ALVES et al.; 2006; CAVALCANTI et al., 2009). Dentre os métodos de caracterização da ZCIT, destaca-se a identificação por meio de imagens de satélite, como uma banda de nuvens convectivas que se estende pela faixa equatorial da Terra, ou a partir de anomalias na ROL, ou seja, variações espaço-temporais da radiação de onda longa emitida pela superfície da Terra.

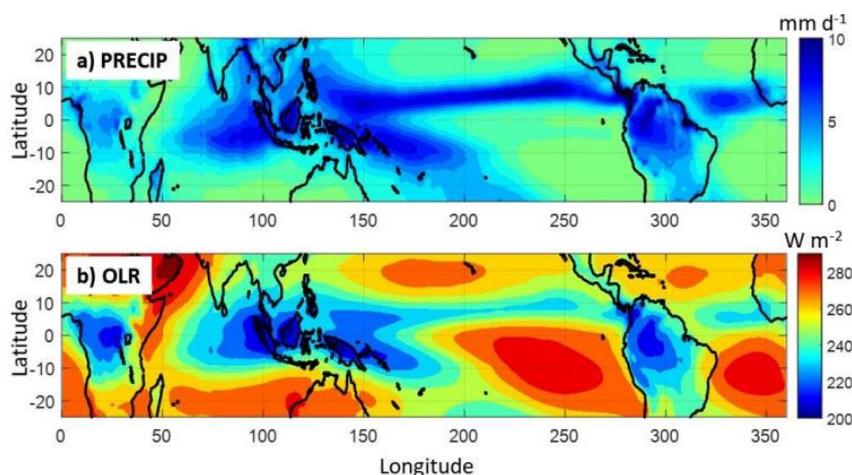


Figura 3.6: Climatologia da ZCIT a partir de médias de precipitação e ROL entre 1983 e 2005 (Fonte: MAMALAKIS et al. (2020)).

Um ponto importante do estudo dos impactos da atuação da ZCIT é a compreensão de seu ciclo anual, modulado pelo gradiente meridional inter-hemisférico da TSM do Oceano Atlântico e, por consequência, do posicionamento das Altas Subtropicais do Atlântico Norte (ASAN) e Sul (ASAS). No inverno e primavera do HS, a ZCIT ocupa sua posição mais setentrional, em torno de 14°N. Esse posicionamento, juntamente com o deslocamento da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), permite que frentes frias avancem para latitudes equatoriais, influenciando o regime de chuvas no sul do NEB. Por outro lado, a ZCIT atinge sua posição mais meridional entre os meses de março e abril, em torno de 2°S. Essa migração da ZCIT será determinada pelo gradiente meridional inter-hemisférico da TSM, já que o desenvolvimento da atividade convectiva tende a ocorrer sobre águas mais quentes (HASTENRATH e HELLER, 1977; ALVES et al. (2006); CAVALCANTI et al., 2009).

BONNET et al. (2018) afirmam que o período chuvoso no ENEB é influenciado pelo posicionamento da ASAS. De acordo com os autores, anomalias positivas de precipitação no leste do NEB estão associadas à ASAS deslocada para sudeste de sua posição climatológica, induzindo ventos mais intensos e perpendiculares à costa oriundos da porção norte do giro anticiclônico da ASAS, contribuindo assim para aumentar o transporte de umidade do oceano para o continente. Será discutido posteriormente a incidência dos alísios/componente norte da ASAS na região de estudo, além da interação entre essa forçante sinótica e o SBM.

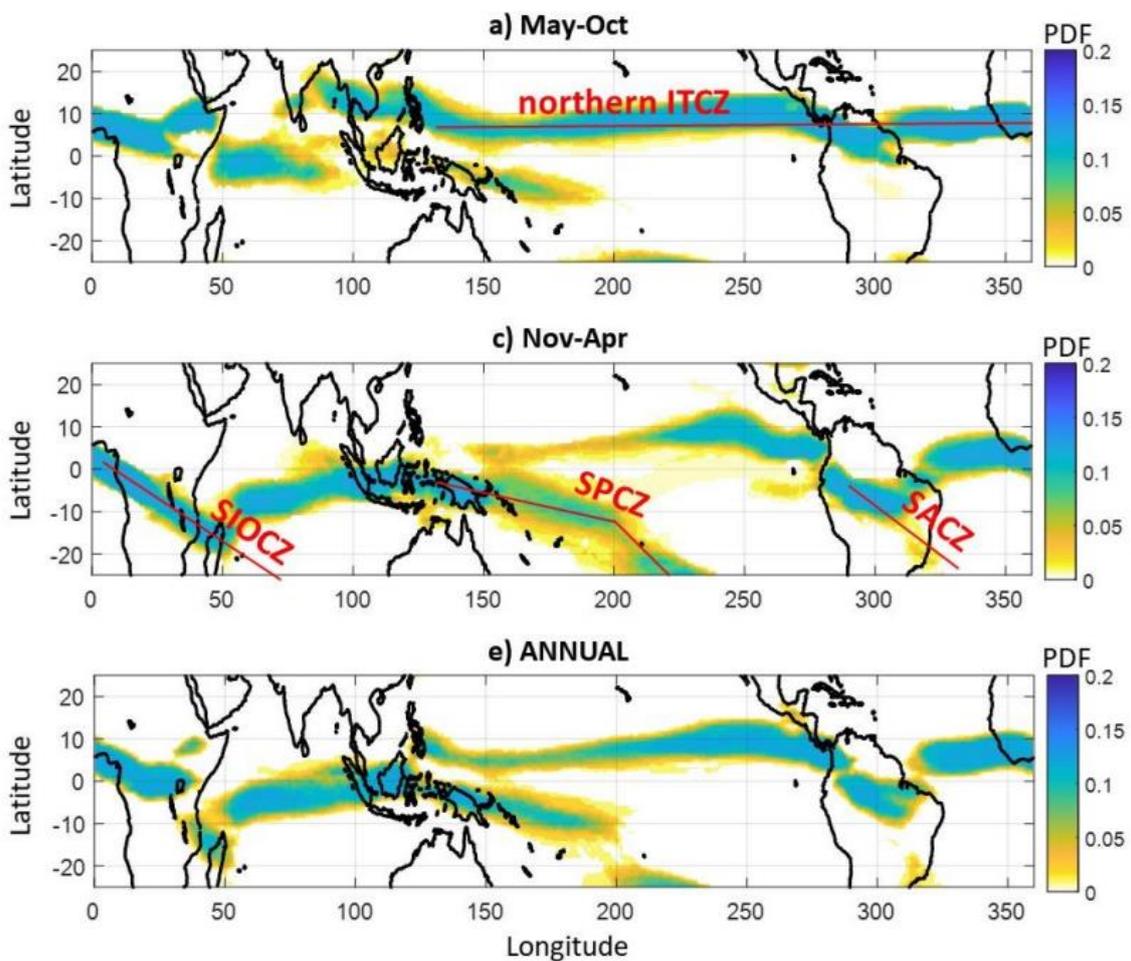


Figura 3.7: Distribuição da função densidade de probabilidade da localização da ZCIT entre Maio e Outubro (a), entre Novembro e Abril (b) e anual (c) a partir de médias de precipitação e ROL entre 1983 e 2005 (Fonte: MAMALAKIS et al. (2020)).

Além da interação entre ASAS-ASAN-ZCIT, outro importante modulador do clima do NEB são os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs). Os VCANs são centros de baixa pressão atmosférica observados na alta troposfera e que tem papel

determinante nas condições de tempo em superfície (KOUSKY e GAN, 1981; CAVALCANTI et al., 2009). Os VCANs são caracterizados por forte movimento vertical subsidente em seu interior, impedindo assim a formação de nuvens de chuva e garantindo condições de tempo estável, enquanto que em sua borda se observam movimentos verticais ascendentes e maior condição para ocorrência de chuva. De acordo com KOUSKY e GAN (1981), esta circulação ciclônica em 200mb está associada ao desenvolvimento de um anticiclone na troposfera superior sobre o continente (Alta da Bolívia) e à passagem de um cavado transiente.

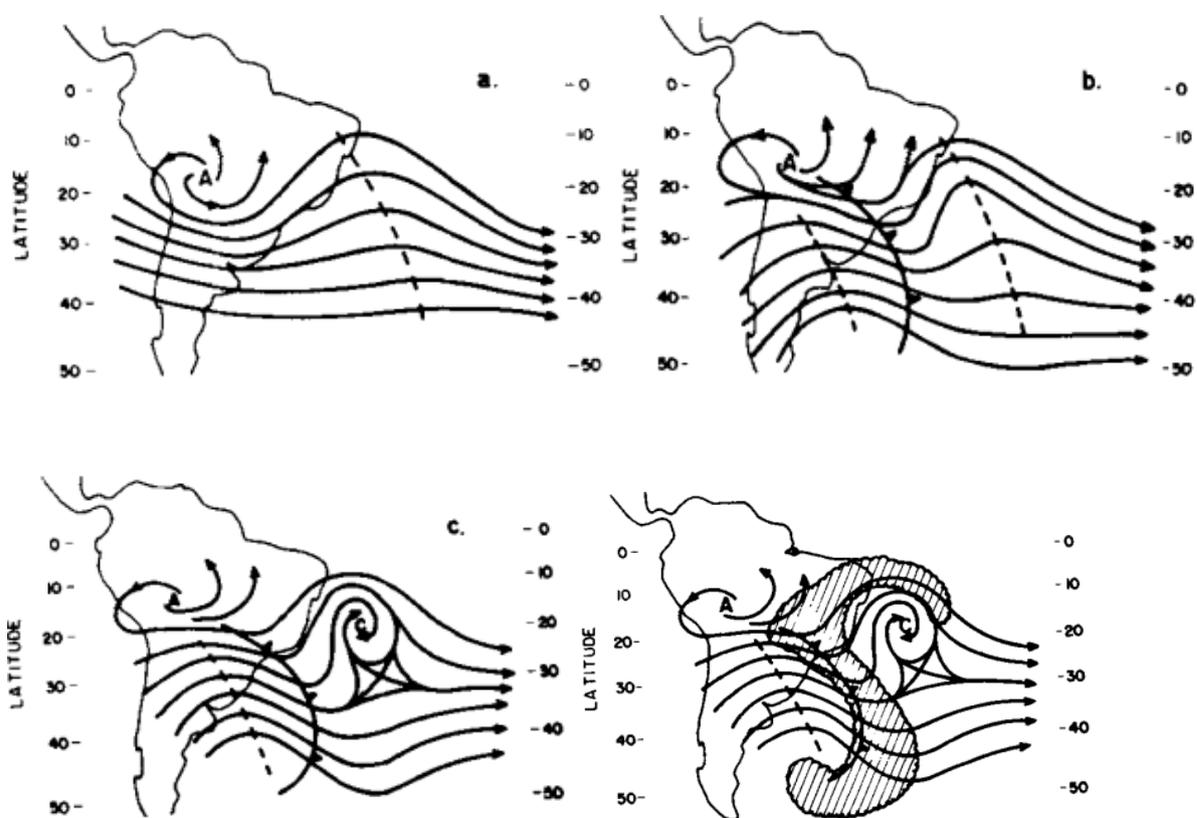


Figura 3.8: Modelo conceitual de formação do VCAN e nebulosidade associada (Fonte: KOUSKY e GAN, 1981).

Além de influenciar o tempo na região abaixo, os VCANs também exercem papel importante no tempo em outras regiões do Brasil a partir da interação com a Alta da Bolívia e com a formação das Zonas de Convergência do Atlântico Sul. Assim, para o NEB, determinar o posicionamento do VCAN e o seu tempo de atuação torna-se importante para afirmar se sua região de interesse terá subsidência de ar frio e seco ou ascensão de ar quente e úmido (KOUSKY e GAN, 1981; CAVALCANTI et al., 2009). Na figura 3.7, referente aos meses de novembro a abril, é possível observar uma banda

de nebulosidade curvada, associada diretamente ao posicionamento do VCAN e aos movimentos ascendentes característicos da borda deste sistema, além de indicar sua interação com a ZCAS.

Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs), ou Ondas de Leste, são perturbações atmosféricas nos níveis de 700 e 850 hPa que se propagam do Oceano Atlântico para a costa leste do NEB, induzindo convecção e ocasionando eventos de chuva no litoral do ENEB. Estas perturbações no campo de pressão atmosférica se formam sobre a porção equatorial do Oceano Atlântico e do litoral da África, se deslocando zonalmente de leste para oeste (YAMAZAKI e RAO, 1977; CAVALCANTI et al., 2009). A ocorrência dos DOLs é mais um fator determinante para o período chuvoso da região de estudo, contribuindo também para redução do gradiente térmico entre continente e mar e da intensidade média do SBM. MOLION e BERNARDO (2002), ALVES et al. (2006) e SARMENTO (2009) concordam que o período chuvoso no ENEB ocorre entre maio e julho, por conta da atuação dos DOLs e devido às instabilidades associadas à passagem de frentes frias sobre o sul do NEB.

MOLION e BERNARDO (2002) examinaram os mecanismos dinâmicos que influenciam o regime de chuva no ENEB, propondo a formação de uma zona de convergência (ZCEN) sobre a costa do ENEB nos meses de abril a julho (de fato, os quatro meses mais chuvosos nesta região). De acordo com os autores, a ZCEN é caracterizada por uma estrutura rasa (até 700hPa), podendo ser intensificada por um cavado em médios níveis sobre a região costeira. Ademais, anomalias positivas da TSM favorecem um maior transporte de umidade do Oceano Atlântico para a costa do ENEB, aumentando os níveis pluviométricos da região. De acordo com os autores, a estação chuvosa do ENEB é reforçada por instabilidades associadas à passagem de frentes frias que conseguem atingir o sul do ENEB (entre 5°S e 18°S).

SARMENTO (2009) realizou uma investigação sobre eventos significativos de precipitação sobre o Leste do NEB (ENEb) entre 2000 e 2009 e configurações atmosféricas características, por meio de dados observacionais e modelagem numérica. De acordo com o autor, os mecanismos atmosféricos responsáveis por gerar precipitação sobre o ENEB (Alagoas, Bahia, Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Sergipe) são pouco estudados pois são resultantes da atuação de sistemas meteorológicos de escalas menores que a escala sinótica, como o SBM e os DOLs. A tabela 3.1 apresenta

alguns dos eventos significativos de precipitação sobre o ENEB avaliados pelo autor e os sistemas meteorológicos atuantes.

Tabela 3.1: Eventos significativos de precipitação sobre o ENEB avaliados por Sarmento (2009).

Período do Evento	Índice de Precipitação	Sistema Meteorológico
29/07 a 01/08 de 2000	Porto de Pedras (AL) - 188,9 mm, Recife (Curado - PE) - 185,9 mm, Maceió (AL) - 141,5 mm, São José da Laje (AL)(31/07) - 135,0 mm	Frente Fria+POA
02/01 de 2002	Itaberaba (BA) - 142,8 mm, São Gonçalo (PB) - 94,0 mm, Guaratinga (BA) - 63,2 mm, Senador Rui Palmeira (AL) - 113,1 mm	Frente Fria+VCAN
07 a 08/06 de 2002	Maceió (AL) - 80,0 mm, Recife (Curado - PE) - 141,1 mm	DOL
15 a 16/06 de 2003	João Pessoa (PB) - 103,4 mm, Maceió (AL) - 65,0 mm	Frente Fria+VCAN
15 a 18/01 de 2004	Salvador (BA) - 90,0 mm, Bacabal (MA) - 117,4 mm, Bom Jesus da Lapa (BA) - 101,4 mm, Serrinha (BA) - 100,0 mm, Maceió (AL) - 100,9 mm	Frente Fria+VCAN + ZCIT
01/06 de 2004	Maceió(AL) - 180,7 mm, Porto de Pedras(AL) - 109,8 mm	Frente Fria+DOL
03/05 de 2005	Maceió(AL) - 111,8mm, Usina Paísa(AL) - 280mm Coruripe(AL) - 110mm, União dos Palmares(AL) - 134,0mm	VCAN e DOL
04/05 de 2005	Coruripe(AL) - 126,4mm, Propriá (SE) - 113,4mm	VCAN e DOL
01 - 07/06 de 2005	Salvador(BA) - 300mm, Maceió(AL) - 114mm Natal(RN) - (03/06) 118,3 mm	Frente Fria+VCAN + DOL
15/05 de 2006	Maceió(AL) - 144,0mm	Frente Fria+ZCIT
16/05 de 2006	Maceió(AL) - 140,0mm	Frente Fria+ZCIT
10/01 de 2007	Maceió(AL) - 108mm Porto de Pedras(AL) - 106,1mm	Frente Fria+DOL
12 e 13/05 de 2007	Usina Paísa(AL)(12/05) - 128mm Coruripe(AL)(12/05) - 159,4mm Junqueiro(AL)(13/05) - 168,6mm Campo Alegre(AL)(13/05) - 184mm	DOL

17/05 de 2007	S. M. dos Campos(AL) – 158,6mm	DOL
26/03 de 2008	Maceió(AL) - 115mm	ZCIT
09/05 de 2008	S. M. dos Campos (AL) - 129,3 mm, Coruripe (AL) - 113,6 mm, Marechal Deodoro (AL) - 115,4 mm, Teotônio Vilela (AL) - 139,0 mm, Patos(PB) - 107,6 mm	ZCIT + DOL
26/05 de 2008	Limoeiro de Anadia(AL) - 209,0 mm	DOL

3.3.1. Sistema de Brisa Marítima

O sistema de brisas marítima e terrestre constitui um dos principais agentes climatológicos de regiões litorâneas ao redor do Mundo. Apesar da pequena escala espacial, sua dinâmica de circulação bem definida influencia diretamente no clima litorâneo e nas atividades humanas, produzindo chuvas locais com horários bem definidos e contribuindo, por exemplo, em atividades pesqueiras. Segundo a sabedoria popular dos pescadores, os barcos costumam sair para pescar em alto-mar com a brisa continental do final da madrugada e retornam para casa no período da tarde com a brisa marítima. ABBS e PHYSICK (1992) narram a história de Reg Clarke, meteorologista da década de 1940, que trabalhava em Canberra, Austrália, e notava certo escoamento de leste no final da tarde. Apesar de estar 112 km afastado da costa, Reg passou a creditar este escoamento vespertino à brisa marítima, no entanto precisava de evidências para suas proposições. Usando o próprio carro e instrumentos disponíveis, Reg e seu irmão detectaram penetrações da brisa de até 345 km. Os autores também destacam os trabalhos de Dampier no final do século 17, que já apresentavam um modelo teórico sofisticado do SBM, mas que foram ignorados por quase 200 anos.

A seguir serão discutidos alguns aspectos do sistema de brisa marítima (SBM), destacando os seus elementos característicos, ciclo de vida, duração e penetração ao longo da área continental. Em linhas gerais, o SBM é um sistema de circulação de mesoescala caracterizado pela propagação de ar marítimo em direção ao continente, decorrente da formação de um gradiente de pressão em superfície (MILLER et al., 2003). Esse gradiente de pressão tem caráter local e curta duração, da ordem de 2 a 2000 km de extensão, sendo formado pelas diferenças de aquecimento entre a superfície do mar e do continente. O SBM é observado em regiões costeiras por todo o planeta, desde regiões equatoriais e até

mesmo nos pólos. Os principais impactos do SBM são observados na modulação do clima na região litorânea, com temperaturas mais amenas do que no interior do continente. Além disso, é possível detectar o desenvolvimento de células convectivas, desencadeadas pelas correntes ascendentes na frente de brisa marítima (FBM) e mudanças na qualidade do ar, por meio da entrada de ar marítimo relativamente menos poluído. O estudo completo do SBM deve considerar as forçantes do sistema, sua estrutura, ciclo de vida, previsão de duração e penetração do ar marítimo no interior do continente e impactos na qualidade do ar (MILLER et al., 2003).

As condições ideais para o desenvolvimento de um SBM são encontradas em dias de céu claro, proporcionando um aquecimento diferencial das superfícies continental e marítima. O contraste térmico, mais destacado em dias de céu claro, cria um gradiente local de pressão entre mar e continente e uma forçante direcionada do mar para o continente. Essa forçante, por sua vez, desloca ar marítimo para o continente. Dias nublados reduzem o aquecimento da superfície, atenuando o gradiente térmico entre mar e continente e, por consequência, a intensidade do SBM (MILLER et al., 2003).

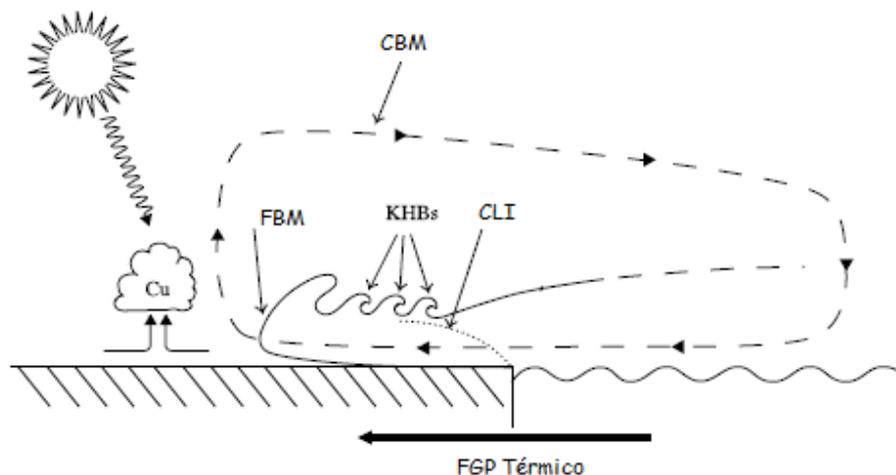


Figura 3.9: Estrutura e elementos do Sistema de Brisa Marítima (Fonte: MILLER et al., 2003).

A circulação do SBM (CBM) é definida como uma célula de mesoescala caracterizada por correntes ascendentes na FBM e por um escoamento de retorno em torno de 900 hPa induzido por conservação de massa. Este escoamento de retorno acaba criando uma zona de forte cisalhamento vertical do vento, com escoamento mar-terra em superfície e terra-mar em torno de 900 hPa (MILLER et al., 2003). Por sua vez, a FBM é

definida como o limite entre a massa de ar continental (quente e seca) e a camada de ar marítimo (fria e úmida), sendo assim detectada claramente através de variações súbitas nos campos de temperatura e umidade relativa do ar e direção e intensidade do vento, além de alguns poluentes também. Por conta dos movimentos verticais observados, a FBM é caracterizada também pela presença de núvens cúmulos, como destacado por DUBREUIL et al. (2004).

Em termos dinâmicos, o escoamento de ar marítimo sobre o continente é definido como uma onda de gravidade, ou onda de gravidade da brisa marítima (OBM). Ondas de gravidade são escoamentos horizontais gerados por variações na densidade de um fluido. TIJM e VAN DELDEN (1999) realizaram simulações em um modelo não-hidrostático e destacaram a formação de ondas de compressão durante o aquecimento diabático da superfície continental, estabelecendo assim uma queda local na pressão atmosférica e, conseqüentemente, um gradiente de pressão de mesoescala em superfície entre mar e continente. Esta queda local na pressão atmosférica já é um prenúncio da formação do SBM, sendo notável em estações de superfície litorâneas e, posteriormente, no interior do continente, à medida que a onda latitudinal se propaga.

De acordo com MILLER et al. (2003) e DUBREUIL et al. (2004), a forçante sinótica atuante sobre a região de formação do SBM definirá sua intensidade e seu ciclo de vida. Uma forçante sinótica leve, preferencialmente no sentido terra-mar, é ideal para a observação do ciclo de vida do SBM, principalmente quando associada a condições de céu claro. MILLER et al. (2003) apresentam três formas de interação entre o SBM e o vento dominante de uma região. O primeiro tipo (“puro”) é observado sobre condições de vento sinótico fraco perpendicular à costa (figuras 3.6a até 3.6c). Observa-se que o escoamento dominante em superfície (seta vermelha mais fina) é gradualmente substituído pela brisa marítima (seta azul), sendo deslocado verticalmente (~ 950 hPa) e atuando como um escoamento de retorno, no sentido contrário à brisa. Os outros tipos são observados quando o escoamento dominante é paralelo à costa (figuras 3.6d até 3.6i). A partir do desenvolvimento da brisa marítima, observa-se um giro do vento com a altura, desintensificando a célula do SBM. Posteriormente, será discutida a interação entre a forçante sinótica observada na região de estudo desta Dissertação e o SBM.

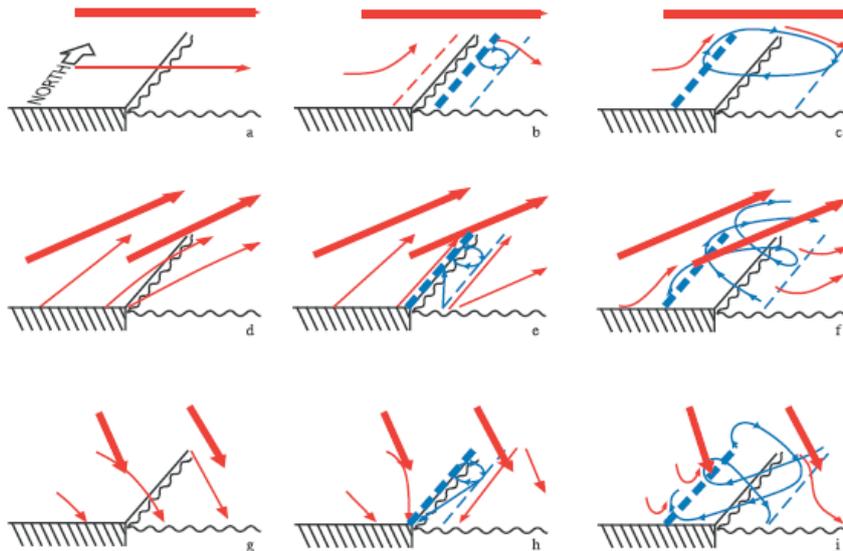


Figura 3.10: Modelos conceituais da interação entre o SBM e o vento dominante de uma região (Fonte: MILLER et al., 2003).

A figura abaixo apresenta o modelo conceitual do vento na região de estudo, destacando as forçantes sinóticas e de mesoescala. As setas pretas indicam o vento sinótico predominante, resultado da atuação dos alísios/componente norte da ASAS, enquanto que a seta vermelha indica o SBM (mesoescala), que atua de forma perpendicular ao litoral.

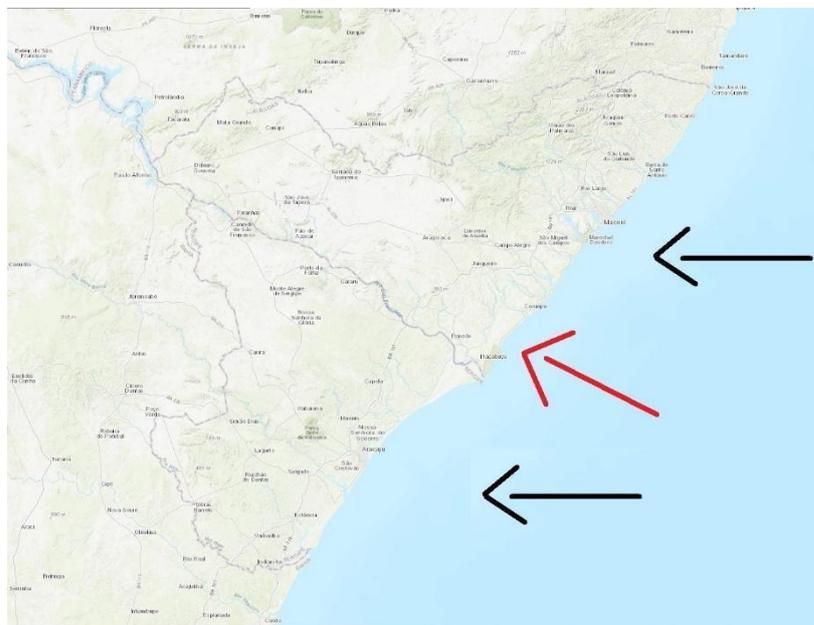


Figura 3.11: Modelo conceitual da interação entre os ventos alísios/componente norte da ASAS (setas pretas) e o SBM (setas vermelhas) (Próprio autor).

3.3.2. El Niño-Oscilação Sul (ENOS)

Além do gradiente meridional inter-hemisférico da TSM do Oceano Atlântico, outro fundamental influenciador da variabilidade interanual do clima no NEB é o fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) (GRIMM, 2003; CAVALCANTI et al., 2009; ARAÚJO et al., 2013; MARENGO et al., 2016). O ENOS representa um conjunto de variações anômalas observadas na temperatura da superfície do mar (TSM) em setores do Oceano Pacífico Equatorial (OPE) e em todo o sistema de interação oceano-atmosfera do Oceano Pacífico Tropical (OPT), que por sua vez influenciam o tempo e o clima em diversas regiões por todo o planeta (GRIMM, 2003; CAVALCANTI et al., 2009; ARAÚJO et al., 2013; MARENGO et al., 2016; SENTELHAS et al., 2019). Uma das faces deste fenômeno é o El Niño, caracterizado por um aquecimento anômalo da TSM do OPE e um enfraquecimento dos alísios na região equatorial. Estas variações no vento e na temperatura provocam alterações nos padrões de transporte de umidade, que por sua vez influenciarão a distribuição da precipitação. A outra face do ENOS é o fenômeno La Niña, no qual se observa um fortalecimento dos alísios na região equatorial. A persistência de ventos mais intensos sobre o OPE provocará um empilhamento de águas mais quentes sobre sua porção oeste, enquanto que sua porção leste, próximo à costa do Peru, estará mais suscetível à ascensão de águas mais frias, fenômeno conhecido como ressurgência. Novamente, anomalias na TSM e nos ventos provocarão alterações nos padrões de transporte de umidade, influenciando por sua vez a circulação atmosférica e o regime de chuva em todo o planeta.

Apesar de influenciar o tempo e o clima em diversas partes do mundo, os impactos do ENOS variam localmente. No NEB, por exemplo, anos de El Niño apresentam redução nos totais pluviométricos, potencializando os episódios de seca tão comuns na região. Por sua vez, anos de La Niña apresentam anomalias positivas de precipitação no NEB, ocasionando melhora na vazão dos rios (GRIMM, 2003; ARAÚJO et al., 2013; MARENGO et al., 2016; SENTELHAS et al., 2019). Não está no escopo deste trabalho compreender como o ENOS influencia a chuva e o vento na região de estudo, no entanto é provável que anos mais secos contribuam para ventos mais intensos, enquanto que anos mais chuvosos contribuam para ventos menos intensos, de acordo com a variação do gradiente térmico entre continente e mar, conforme constatado por FRANCHITO et al. (1998), MILLER et al. (2003) e DUBREUIL et al. 2004. Em anos de El Niño, estes episódios de estiagem atacam diretamente a alta vulnerabilidade e a baixa resiliência

energética da região, gerando prejuízos no setor agropecuário e na disponibilidade de energia elétrica, além é claro do abastecimento de água (GRIMM, 2003; CAVALCANTI et al., 2009; MARENGO et al., 2016).

DE CARVALHO et al. (2013) estudaram o regime de chuvas do município de Rio Largo, Alagoas, buscando identificar as características da estação chuvosa, como o tempo médio de duração e sua relação com o cultivo de algumas culturas agrícolas. De acordo com os autores, a caracterização temporal da precipitação é fundamental para a estimativa de rendimento de uma cultura agrícola, de forma que as variabilidades interanuais provocadas pelo ENOS influenciam diretamente no quantitativo final. A partir de 35 anos de dados pluviométricos, os autores concluíram que o ENOS influencia a estação chuvosa da região de estudo. Em anos de El Niño, observou-se que a estação chuvosa se iniciou mais tardiamente, enquanto que em anos de La Niña a chuva antecipou, resultando em um maior total pluviométrico acumulado.

SENTELHAS et al. (2019) examinaram 30 anos de dados para avaliar a relação entre volumes de precipitação, ENOS e plantação de cana-de-açúcar, tendo como local de estudo 4 pontos distintos, espalhados pelas regiões centro-oeste, nordeste, sudeste e sul do Brasil. De acordo com os autores, a principal causa dos prejuízos na produção agrícola é função de um déficit de água, ocasionado por uma estação chuvosa fraca (El Niño), ou até mesmo por excesso de precipitação (La Niña). Os resultados mostram que anos neutros apresentam maior eficiência na produção de cana-de-açúcar.

3.4. Análise do Potencial Eólico

Transições energéticas são processos complexos, demandando mudanças não apenas no método de geração de energia, mas também em toda a rede de infraestrutura, políticas de investimento e precificação, aceitação da população, entre outros (EPE, 2022). Não se trata, portanto, de um processo de ruptura com os padrões de produção antigos, mas de coexistência entre o novo e as fontes de energia que são progressivamente substituídas.

A estimativa de parâmetros meteorológicos voltada para a geração de energia eólica exige um elevado grau de confiabilidade, por conta de questões de logística e viabilidade econômica. De acordo com a OMM (WMO, 2021), as observações de direção e intensidade do vento são necessárias para: monitoramento e previsão do tempo,

construção de uma série histórica de climatologia de ventos, estimativa de danos causados por ventos extremos, estimativa de recurso eólico e estimativas de fluxos de superfície, como evapotranspiração e dispersão de poluentes.

WMO (2021) afirma que a etapa mais laboriosa da medição do vento é estabelecer o nível de exposição do anemômetro em relação ao escoamento local, considerando a dificuldade que é encontrar um ponto para instalação do instrumento de medição que seja representativo para uma grande área e que entregue uma representação mais fidedigna do escoamento. LIMA et al. (2017) reafirmam a importância de uma estimativa adequada do regime de ventos para a geração de energia eólica e os benefícios deste tipo de energia: a energia gerada é proporcional à terceira potência da intensidade do vento, logo pequenas correções na estimativa do escoamento significam melhorias ainda maiores na eficiência da turbina de geração de energia. CARVALHO et al. (2012) destacam que as simulações de mesoescala do regime de ventos podem ser aproveitadas de três diferentes formas: para longo prazo, determinando uma climatologia local e eventuais padrões de variabilidade; para curto prazo, onde as simulações são acompanhadas de modelos estatísticos ou modelos de maior resolução espacial, podendo conter mais detalhes sobre o relevo local; e por fim para gerar mapas de vento médio sobre áreas mais extensas, como um estado ou país.

No caso das previsões de longo prazo, a logística para instalação de uma torre eólica e os custos envolvidos demandam que o investimento seja confiável. Logo, para instalar uma torre eólica em determinado local é necessário ter certeza de que o vento será intenso e contínuo o suficiente para alcançar os padrões de geração de energia esperados por algumas décadas. Também seria interessante estimar padrões de variabilidade interanual e outros modos de variabilidade climática de menor frequência temporal. No caso das previsões de curto prazo, muito comum em um ambiente operacional (PESSANHA e JUSTINO, 2013), é necessário planejar o quanto de produção é esperado para as próximas horas ou dias, por exemplo. Assim, será possível identificar períodos em que a geração de energia será maior ou menor do que o usual, indicando a necessidade de requisitar energia de outras fontes, por exemplo, ou até mesmo a possibilidade de vender o excesso do que não foi consumido. Por fim, gerar mapas de vento é interessante pois pode indicar regiões próximas onde também seria viável, ou não, instalar novas torres eólicas.

RAMOS et al. (2018) destacam que a pequena quantidade de dados observados de vento, seja em termos de uma série temporal extensa ou em relação à distribuição espacial das estações, é um grande obstáculo para uma maior eficiência do planejamento da instalação das torres eólicas. Segundo RAMOS et al. (2018), muitas vezes a instalação de torres eólicas é planejada com uma quantidade maior de resultados de modelagem numérica do que dados observados de fato, induzindo a falhas no planejamento energético. Para realizar este planejamento de forma adequada, faz-se necessário que as características do regime de ventos local sejam bem conhecidas, tendo como base informações meteorológicas de qualidade que garantirão os processos logísticos e operacionais mais eficientes.

VINHOZA (2019) identificou os Potenciais *offshore* Teórico, Técnico e Ambiental/Social ao longo da costa brasileira, destacando as restrições necessárias para cada nível de potencial. O primeiro nível é o Potencial Teórico, ou bruto, que consiste no total de energia que poderia ser gerada em determinada região, considerando que toda a área disponível fosse ocupada por turbina eólicas, descartando limitações tecnológicas, geográficas, ambientais e sociais (figura 3.10). Em seguida, deve ser avaliado o Potencial Técnico, nível no qual algumas limitações já são levadas em conta, como por exemplo um limite mínimo para a velocidade do vento que permita a geração de energia, de acordo com as especificações técnicas da turbina. Outras limitações se originam de questões ambientais, geográficas e sociais (figura 3.10), como por exemplo a presença de áreas de proteção ambiental, onde não seja permitida a instalação de torres eólicas, regiões turísticas, nas quais a presença de torres eólicas ocasionaria uma "perda visual" ou regiões de relevo acentuado, que dificultariam a instalação das torres.

Para o Potencial Teórico, VINHOZA (2019) considerou toda a área marítima sob jurisdição brasileira. Em seguida, foram considerados aspectos tecnológicos, descartando áreas *offshore* onde não é possível instalar torres eólicas por conta da elevada profundidade do mar, além de definir um limiar mínimo para a velocidade do vento para que a operação seja economicamente viável. Por fim, a autora definiu o Potencial Ambiental e Social a partir da exclusão de áreas que impactariam em atividades humanas no meio marítimo e áreas de preservação ambiental. Uma das limitações desta Dissertação é que será realizada apenas a estimativa do Potencial Técnico para a região de estudo, estando além do escopo deste trabalho os outros níveis descritos acima.



Figura 3.12: Níveis de Potencial Eólico (Fonte: VINHOZA (2019)).

DE ASSIS TAVARES et al. (2020), seguindo as orientações de MUSIAL et al. (2016), também considera a profundidade como limitação para a instalação de turbinas eólicas *offshore*. O objetivo dos autores foi determinar o potencial técnico de geração eólica *offshore* ao longo da costa das regiões Sul e Sudeste do Brasil, detalhando o processo de análise do potencial eólico da região de estudo. Este processo consiste em considerar critérios de restrição à produção eólica, como distância da costa de até 18 km, velocidade do vento acima de 7 m/s, profundidade de até 1000 m para instalação da torre e o descarte de áreas de proteção ambiental, determinando assim áreas excluídas do cálculo final.

O cálculo do potencial eólico considera a densidade de energia disponível no escoamento na altura da turbina, representando o fluxo de energia cinética do vento por unidade de área. A densidade de potência do vento P (equação 1), calculada a partir da velocidade do vento na altura da turbina da torre eólica, é dada pela equação abaixo, onde ρ é a densidade do ar e v é a velocidade do vento (DE ASSIS TAVARES et al., 2020):

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (1)$$

Por sua vez, o coeficiente de potência C (equação 2) calcula a razão entre a potência do vento P e a potência nominal da turbina P_n , ou seja, o máximo de energia que poderia ser produzida pela turbina, sendo este dependente do modelo de turbina utilizada. Este valor indica a eficiência da turbina em transformar a energia cinética do vento em energia elétrica.

$$C = \frac{P}{P_n} \quad (2)$$

De acordo com ACUNHA JÚNIOR (2006), LÍVIA e PEREIRA (2018) e VINHOZA (2019), o valor máximo teórico possível é dado pelo coeficiente de Betz 59,3%. Ou seja, apenas uma parte da energia cinética disponível em um escoamento pode ser convertida em energia mecânica por uma turbina, e uma turbina "perfeita" teria potência nominal de 59,3%. Assim, é possível calcular também a curva de potências de um determinado aerogerador (figura 3.11), permitindo assim estimar o desempenho da turbina para cada intervalo de velocidade do vento, de forma que a potência nominal de uma turbina é atingida quando o escoamento apresenta a velocidade nominal da turbina. Esse conhecimento é primordial para o planejamento energético, já que cada turbina terá um desempenho e um custo de operação de acordo com as características do vento na região de interesse.



Figura 3.13: Curva de Potência de uma Turbina (Fonte: LÍVIA e PEREIRA (2018)).

Outros elementos importantes de uma curva de potências são as velocidades de cut-in e cut-out. A velocidade de cut-in caracteriza a menor velocidade do vento suficiente para produzir energia, enquanto que a velocidade de cut-out corresponde ao máximo de velocidade no qual a turbina pode operar, sendo desligada caso o vento ultrapasse esta

velocidade. De acordo com VINHOZA (2019), o valor de cut-in de turbinas de grande porte está entre 3,0 e 5,0m/s, enquanto que o cut-out pode alcançar 25m/s. Por fim, o fator de capacidade da turbina é dado pela razão entre a produção real de energia e a sua produção nominal, ou seja, a quantidade de energia que seria gerada caso a turbina operasse sempre em sua velocidade nominal. Desta forma, quanto maior for o fator de capacidade de uma turbina, maior será sua eficiência.

3.4.1 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull consiste em uma distribuição de probabilidade de ocorrência de uma variável aleatória e contínua dentro de determinado intervalo de valores (OLIVEIRA FILHO et al., 2018; DE ASSIS TAVARES et al., 2020), sendo amplamente utilizada na análise da distribuição da velocidade do vento. Assim, para uma variável aleatória e contínua X, sua função densidade de probabilidade é dada por:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1, P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx \quad (3)$$

A figura abaixo ilustra a probabilidade de ocorrência de uma variável aleatória no intervalo de valores entre a e b:

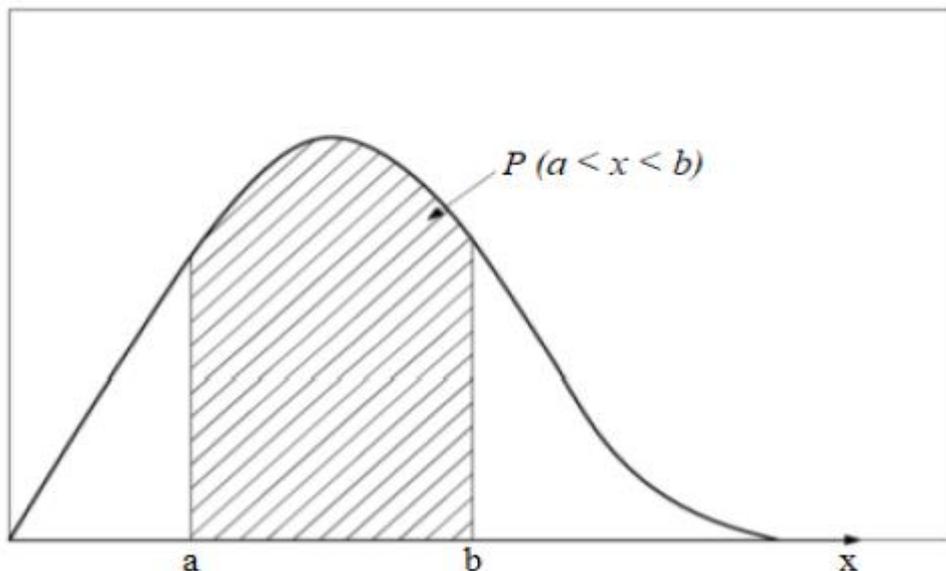


Figura 3.14: Representação Gráfica de uma Função Densidade de Probabilidade (OLIVEIRA FILHO et al. (2018)).

A distribuição de Weibull se baseia nos parâmetros c e k , na qual o parâmetro k é função dos valores de desvio padrão e definirá a forma da distribuição de Weibull. O parâmetro c , por sua vez, é função dos valores médios da distribuição. Maiores valores de k indicam maior quantidade de dados próximos à média da série de dados, indicando uma distribuição mais consistente (OLIVEIRA FILHO et al., 2018). Por outro lado, maiores valores de c indicam uma maior dispersão dos dados em relação à média da série de dados. Isto posto, uma série de dados interessante para aplicação em geração eólica seria uma distribuição mais consistente, com k alto e c baixo, indicando ventos mais constantes. A função cumulativa de Weibull $F(V)$ define a probabilidade de ocorrência de valores menores ou iguais a certa velocidade V :

$$F(V) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k \right] \quad (4)$$

$$k = \left(\frac{\sigma_V}{V_m}\right)^{-1.086} \quad (5)$$

$$c = \frac{V_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (6)$$

3.5 Avaliação Econômica: *Payback*

Diversas ferramentas matemáticas podem ser usadas na avaliação econômica de um projeto. No âmbito da microgeração distribuída, um dos indicadores mais comuns é o *payback*, que representa o tempo de retorno do investimento realizado (ARAÚJO, 2016; SCHINCARIOL NETTO, 2017; CORSO, 2019). O *payback*, assim como outros métodos financeiros como o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR), são aplicados nas mais diversas áreas, servindo como instrumento de tomada de decisão sobre investimentos de médio e longo prazo. Nesta Dissertação, por exemplo, será aplicado o método do *payback* simples sobre a aquisição de um aerogerador com custo em torno de R\$ 41.000 e vida útil de 20 anos. Logo, o tempo de *payback* simples representará o tempo necessário para recuperar este valor investido e o investimento será considerado vantajoso se o tempo de *payback* for menor do que 20 anos.

ARAÚJO (2016) e CORSO (2019) aplicaram os métodos de *payback*, VPL e TIR na análise da viabilidade econômica de seus projetos. Segundo CORSO (2019), o VPL determina o valor presente de pagamentos futuros, considerando uma estimativa de taxa de juros para os anos subsequentes, enquanto que a TIR é a taxa de desconto que associa o valor investido no início do projeto com o valor recuperado posteriormente. SCHINCARIOL NETTO (2017) calculou o tempo de *payback* em seu projeto de instalação de um aerogerador de pequeno porte para uso agrícola, avaliando diversos modelos de aerogerador. O autor propôs uma metodologia que considera uma estimativa de reajuste anual da tarifa da energia elétrica ao longo do período de avaliação.

$$\text{Tempo de Payback} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Retorno}} \quad (7)$$

3.6. Análise de Agrupamento

Em 1922, Lewis Fry Richardson (RICHARDSON, 1922) propôs uma solução pouco ortodoxa para o problema da modelagem numérica, que encontrava obstáculos por conta da capacidade insuficiente de realizar os cálculos necessários em tempo hábil. Assim, Richardson sugeriu que, como parte de um esforço mundial para obter uma previsão do tempo global, 64.000 pessoas se reunissem em um estádio e realizassem cálculos. 100 anos depois, novamente a Meteorologia explora os limites tecnológicos da humanidade, neste caso através de métodos computacionais que tornem mais eficientes o tratamento e análise de uma grande quantidade de dados. Dados observados *in situ*, assimilação de dados de sensoriamento remoto de satélites e radares, dados de reanálises, entre outros, são aplicados diariamente na tentativa de se aprimorar a modelagem da atmosfera em tempo hábil, assim como Richardson vislumbrava. Neste contexto, buscam-se técnicas eficientes que permitam a extração de informações úteis de uma grande quantidade de dados em um intervalo de tempo satisfatório, para uma rápida e confiável tomada de decisões (METZ e MONARD, 2005; TORRACA, 2012). Tais técnicas se baseiam no Aprendizado de Máquina (Machine Learning), algoritmos utilizados na automação de processos de análise multivariada de dados e extração de informações úteis ao processo de tomada de decisão.

Alguns algoritmos de Aprendizado de Máquina realizam estas análises multivariadas a partir do agrupamento de dados, identificando padrões ou grupos de

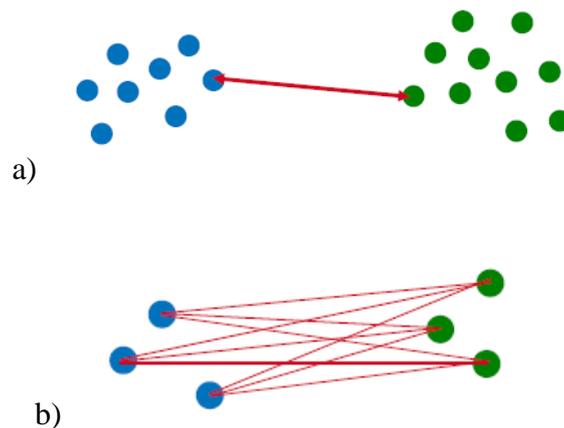
dados semelhantes de acordo com o banco de dados analisado e de acordo com critérios estabelecidos a priori no algoritmo (METZ e MONARD, 2005). De acordo com WARD (1963), estes dados podem ser objetos, símbolos ou até mesmo pessoas, que serão separados em grupos homogêneos e que sejam heterogêneos entre si. A partir deste agrupamento é possível identificar e compreender relações existentes entre os elementos de cada grupo e propor teorias sobre os dados avaliados.

Assim, as técnicas de agrupamento buscam criar grupos de dados (clusters) a partir de relações de similaridade observadas entre os dados disponíveis, permitindo ao usuário reduzir a quantidade de dados que precisam ser analisados sem que ocorra perda de informação. Esta similaridade entre os objetos é modelada por métricas estatísticas, como por exemplo a Distância Euclidiana ou a Correlação de Pearson. O propósito das técnicas de agrupamento é separar objetos em grupos de acordo com as características destes objetos, criando grupos nos quais os objetos sejam similares e separando objetos que não sejam similares em grupos diferentes (ROCHA et al., 2012). Assim, a formação dos clusters prioriza maximizar a similaridade intra-grupo e minimizar a similaridade inter-grupos. Por exemplo, a partir de um conjunto de dados de uma rede de estações meteorológicas, separar regiões onde as temperaturas máximas não passam dos 32°C de regiões onde as máximas podem atingir 40°C. Outros exemplos práticos são os algoritmos utilizados em redes sociais, que buscam criar bolhas que reúnem pessoas que possuem algum grau de afinidade, como o interesse por pets ou por culinária. Em suma, o algoritmo necessitará de uma direção para realizar a formação dos clusters, dependendo do escopo da análise multivariada realizada.

Nos métodos de agrupamento hierárquico, o processo de construção da superfície de decisão utiliza-se de árvores de decisão, que determinarão a direção que o algoritmo deve seguir considerando as métricas definidas pelo usuário (METZ e MONARD, 2005; TORRACA, 2012; ROCHA et al. 2012). Neste caso, a decomposição hierárquica dos dados em grupos será definida por dois tipos de estratégia: juntar grupos (agrupamento aglomerativo) ou separar grupos (agrupamento divisivo). No agrupamento hierárquico aglomerativo, cada elemento do conjunto de dados é alocado em um cluster próprio. Em seguida, o algoritmo realiza a aglomeração, ou junção, destes clusters, formando clusters cada vez maiores. Essa aglomeração de clusters é definida por condições específicas, assim como o nível de aglomeração dos clusters. Por outro lado, o método hierárquico divisivo atua repartindo os dados analisados. Todos os elementos do conjunto de dados

são alocados inicialmente em um único cluster e, em seguida, o algoritmo executa divisões deste cluster inicial em clusters menores, de acordo com as condições impostas. Estas condições também definirão o término da divisão, assim como no método aglomerativo.

A separação dos clusters será definida por regras de aglomeração, definidas novamente pelo usuário do algoritmo e que levam em conta critérios de similaridade. O critério de ligação simples entre dois clusters considera a distância entre os elementos mais próximos de dois grupos diferentes, enquanto que o critério de ligação completa considera a distância entre os elementos mais distantes destes grupos (PIMENTEL, 2014). O critério de ligação média, por sua vez, calcula a média das distâncias entre os elementos dos clusters. Por fim, vale destacar também a ligação de Ward, que mensura a distância de cada elemento de um cluster até o “centro” do cluster (mínimo desvio padrão entre os dados de cada grupo) e compara com a distância de cada elemento de um novo cluster formado pela aglomeração de dois destes clusters. Desta forma, a distância de Ward se torna uma medida de dissimilaridade (WARD, 1963). SOARES DA SILVA (2019) destaca que os critérios de ligação completa e média são pouco sensíveis a ruídos, principalmente a ligação média, enquanto que a ligação de Ward busca encontrar a menor dissimilaridade entre os elementos de um grupo e seu valor médio.



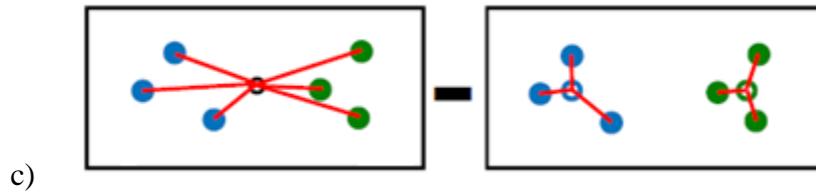


Figura 3.15: Representação dos Critérios de Ligação a) Simples, b) Média e c) Ward.

Segundo SOKAL e ROHLF (1962), dendogramas, ou diagramas de relações, são representações gráficas que permitem a identificação da similaridade entre grupos de dados. Os autores destacam que estas relações referem-se à similaridade entre seus elementos, não necessariamente uma relação direta entre os grupos. Ademais, o critério para definir a similaridade avaliada dependerá da métrica estatística aplicada (Distância Euclidiana, Correlação de Pearson, erro médio quadrático, entre outros). A representação dos grupos de dados em dendogramas permite ao usuário visualizar as hierarquias impostas pelo algoritmo, ou seja, como ele separou cada grupo. Os dendogramas apresentam os dados em formato de árvore, na qual o nível de similaridade entre os elementos de um conjunto de dados é exposto no eixo vertical, enquanto que o eixo horizontal apresenta as variáveis de acordo com os agrupamentos realizados pelo algoritmo. Desta forma, a similaridade entre as variáveis do eixo horizontal será maior à medida que o “galho” da árvore estiver mais próximo da raiz TORRACA (2012).

No exemplo abaixo, o dendograma representa a similaridade de dados de velocidade do vento em 10 m oriundos de diversas estações meteorológicas de superfície. O eixo horizontal, por sua vez, apresenta as estações utilizadas nesta análise de agrupamento, fornecendo assim informações sobre quais estações possuem dados mais similares. SOARES DA SILVA (2019) destaca que a representação dos dados em dendogramas permite a identificação de todos os grupos possíveis, até mesmo os grupos compostos por um único elemento.

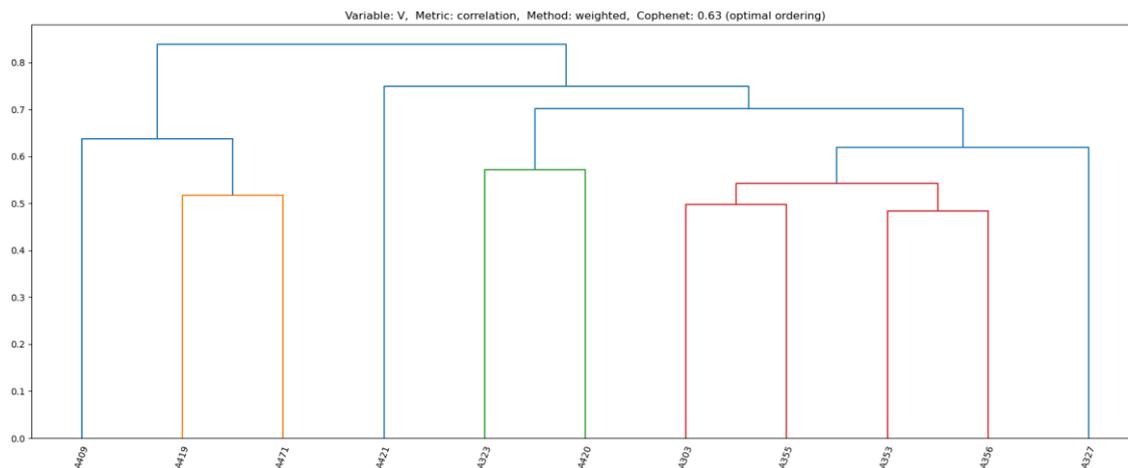


Figura 3.16: Exemplo de dendrograma (Próprio autor).

As análises multivariadas de dados, como a análise de agrupamento e os dendogramas, são ferramentas estatísticas valiosíssimas para extração de informação de um conjunto de dados qualquer. No entanto, METZ e MONARD (2005), TORRACA (2012) e PIMENTEL (2014) destacam que a extração de informação necessita também da contribuição de um especialista no domínio da aplicação sobre os dados analisados, visto que o algoritmo atua na redução de esforço de compreensão e extração de informação, sendo função do especialista atribuir significado aos resultados do agrupamento.

3.7. Modelagem Computacional da Atmosfera: *Weather Research and Forecasting Pre-Processing System (WRF)*

Técnicas de modelagem numérica permitem realizar projeções de curto, médio e longo prazo do potencial eólico de uma região, além de possibilitar a estimativa de variáveis meteorológicas em setores carentes de instrumentos de medição, dependendo é claro de uma validação adequada dos resultados das simulações. Como mencionado anteriormente, CARVALHO et al. (2012) e RAMOS et al. (2018) destacam que as simulações de mesoescala do vento podem ser aproveitadas para se determinar uma climatologia local, principalmente em regiões que carecem de uma série temporal extensa de dados observados, bem como para previsões de curto prazo, acompanhadas de modelos estatísticos ou modelos de maior resolução espacial. A seguir será descrito o modelo numérico de previsão do tempo utilizado neste trabalho.

3.7.1 Descrição do modelo Weather Research and Forecast (WRF)

O Weather Research and Forecast (WRF) é um modelo atmosférico de mesoescala concebido para aplicações operacionais e de pesquisa. Seu desenvolvimento é resultado de um esforço conjunto de diversos membros da comunidade científica para fornecer um modelo de previsão do tempo eficiente e de aplicação operacional simplificada, possibilitando também o aprimoramento das técnicas de assimilação de dados e parametrizações físicas. Desenvolvido e aperfeiçoado por diversas instituições de âmbito operacional e pesquisa, a estrutura do modelo é otimizada também pela sua comunidade de usuários, espalhada por 162 países e com diferentes interesses e aplicações, desde modelos hidrológicos até à propagação de incêndios florestais (POWERS et al., 2017).

O modelo WRF resolve as equações de Navier-Stokes, a equação termodinâmica e a equação de transferência radiativa considerando uma atmosfera não-hidrostatica, permitindo ao usuário modificações no espaçamento das coordenadas verticais, nas projeções geográficas da superfície, nos esquemas de parametrização física e no aninhamento e decaimento das grades da malha de simulação (SKAMAROCK et al., 2019). A estrutura do WRF é apresentada abaixo, destacando três etapas principais do processo de operação: a seleção dos dados de entrada do modelo numérico, utilizados como condição inicial e de contorno da simulação; a etapa de pré-processamento, onde a malha de simulação é configurada e os dados de entrada são preparados para alimentar o modelo numérico; e a realização das simulações através do núcleo dinâmico *Advanced Research Weather Research and Forecasting* (ARW), que resolve as equações de acordo com as parametrizações físicas selecionadas pelo usuário.

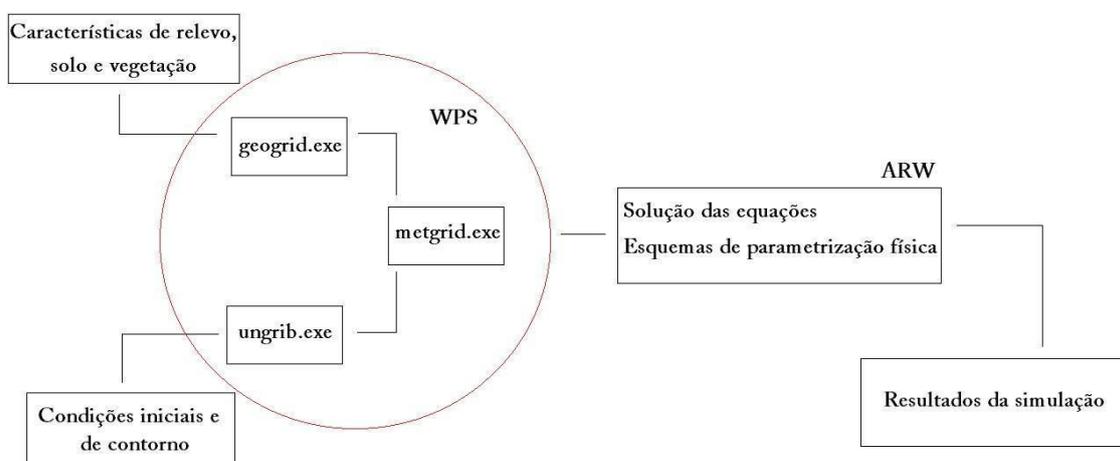


Figura 3.17: Estrutura do WRF (adaptado de SKAMAROCK et al., 2019).

A etapa de seleção dos dados de entrada envolve a escolha por uma base de dados que servirá como condição inicial e de contorno para as rodadas do modelo. CARVALHO et al. (2014a) compararam 8 bases de dados diferentes e concluíram que a escolha de uma base de dados de condição inicial e de contorno adequada para a região de interesse é imprescindível para um melhor desempenho dos modelos de previsão. A etapa de pré-processamento envolve a definição dos domínios de simulação e a interpolação de dados geográficos, como projeção cartográfica, relevo e tipos de solo para esses os domínios de simulação definidos pelo usuário, juntamente com os dados meteorológicos e as opções de aninhamento de grade.

Neste trabalho, utilizou-se a base de dados de análise NCEP-FNL como condição inicial e de contorno das simulações, que apresentou melhores resultados na avaliação realizada por CARVALHO et al. (2014a) e também utilizado por STORM e BASU (2010), CARVALHO et al. (2012), GIANNAKOPOULOU e NHILI (2014) e SILVA JÚNIOR et al. (2016). Ademais, a base de dados utilizada neste trabalho apresenta uma versão atualizada em relação ao que foi utilizado nos artigos supracitados, com aumento na resolução dos dados de 1° para $0,25^\circ$. Esta versão da análise FNL é preparada a cada 6 horas e recebe operacionalmente dados coletados globalmente pelo sistema de assimilação de dados *Global Data Assimilation System* (GDAS), recebendo a denominação FNL-GDAS. A grande vantagem dos dados FNL-GDAS se encontra neste aporte de dados assimilados pelo GDAS, como sondagens e dados obtidos via sensoriamento remoto por satélites, contando com mais informações do que a rodada inicial do modelo GFS (NWS, 2015).

HEIKENFELD et al. (2019) e KAZEMIRAD e MILLER (2020) utilizaram a base de dados FNL-GDAS ($0,25^\circ$) em estudos sobre identificação e monitoramento de nuvens convectivas e formação de nuvens no interior da camada limite marítima, respectivamente, enquanto que TASZAREK et al. (2019) utilizaram a base de dados FNL-GDAS ($0,25^\circ$) em uma análise de eventos de tempo severo na Polônia. A atualização na resolução dos dados permitiu a implementação de aninhamento de grades mais refinadas com menor gasto computacional, já que o modelo recebe condições de contorno da ordem de 27 km de resolução. HEIKENFELD et al. (2019) utilizaram um aninhamento de grade de 4,5 km x 1,5 km x 0,5 km, KAZEMIRAD e MILLER (2020) implementaram um aninhamento de grades de 4050 m x 1350 m e, por fim, TASZAREK et al. (2019) utilizaram um aninhamento de grades de 3,6 km x 1,2 km.

3.7.2 Sistema de Pré-Processamento do WRF (WPS)

O sistema de pré-processamento do WRF (*Weather Research and Forecasting Pre-Processing System*) é formado por três programas que atuam no tratamento dos dados de entrada que serão utilizados nas simulações do modelo WRF. Cada um destes programas executa uma etapa da preparação: o programa *geogrid* define os domínios do modelo e interpola dados geográficos estáticos às grades; o programa *ungrib* extrai campos meteorológicos dos arquivos *grib*; o programa *metgrid* interpola horizontalmente os campos meteorológicos extraídos pelo *ungrib* para os modelos de grade definidos pelo *geogrid*.

A função do programa *geogrid* é definir as configurações do domínio da simulação. Neste programa serão determinadas as características geográficas das grades do modelo, como escala de latitude, longitude e projeção cartográfica. Também é possível determinar como os dados disponíveis serão interpolados na grade do modelo, como tipo de solo, uso do solo, relevo e declividade, temperatura média do solo, fração de vegetação e albedo. O programa *ungrib*, por sua vez, transforma os dados meteorológicos utilizados no pré-processamento em dados intermediários, que serão posteriormente interpolados de acordo com as configurações de grade desejadas. Ou seja, ele opera independente das informações determinadas no *geogrid*, como domínio utilizado e tipo de aninhamento aplicado. Por fim, como ilustrado pela figura 3.15, o programa *metgrid* concatena os esforços do *geogrid* e do *ungrib*, ou seja, interpola os dados meteorológicos detalhados pelo *ungrib* em um aninhamento de grades descrito pelo *geogrid*. O *metgrid* será executado a cada nova rodada de simulações, preparando o dado que será processado pelo núcleo dinâmico ARW.

3.7.3 Núcleo Dinâmico ARW

Como citado anteriormente, o WRF é um modelo numérico de previsão do tempo com aplicações no âmbito operacional e da pesquisa, com uma estrutura simplificada que permite ao usuário realizar simulações de acordo com seu interesse, alterando configurações físicas, resoluções de grade e condições iniciais, além de permitir a assimilação de dados observados aos resultados das simulações. Todas essas manipulações são realizadas pelo núcleo dinâmico ARW, que resolve as equações a partir das configurações previamente definidas pelo usuário e se utilizando de uma solução não-hidrostática, dispondo também de uma opção de solução hidrostática (SKAMAROCK et

al., 2019). Em relação à discretização vertical da atmosfera, o ARW utiliza o sistema de coordenadas vertical Eta.

Alguns destes elementos do núcleo dinâmico ARW têm sido avaliados por testes de sensibilidade nos últimos anos, em especial no que se refere às configurações físicas utilizadas pelo modelo para simular as condições atmosféricas. Segundo SKAMAROCK et al. (2019), esses esquemas de parametrização física podem ser separados em 5 grupos principais: parametrização de cúmulus, microfísica das nuvens, camada limite atmosférica, transferência radiativa e interação solo-superfície. A figura 3.16 ilustra as interações entre os esquemas de parametrização utilizados no núcleo ARW.

Um dos objetivos deste trabalho é desenvolver uma metodologia de modelagem numérica eficiente do potencial eólico da região de estudo. Logo, faz-se necessário entender como o núcleo ARW reproduz as interações e fluxos de calor, momento e umidade observados entre superfície, CLS e CLA, que influenciarão diretamente na direção e intensidade do vento na altura das torres eólicas. Os esquemas de CLA são responsáveis por simular a altura e estabilidade da CLA, além de outros processos como o entranhamento de ar superior (SKAMAROCK et al., 2019). Já na CLS observam-se os fluxos turbulentos de troca de calor e mistura entre a superfície e as camadas atmosféricas adjacentes, caracterizados pela Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov (MOST). A CLS é definida como a porção inferior da CLA (STULL, 1988; ARYA, 2001), correspondendo a 10% de sua extensão vertical.

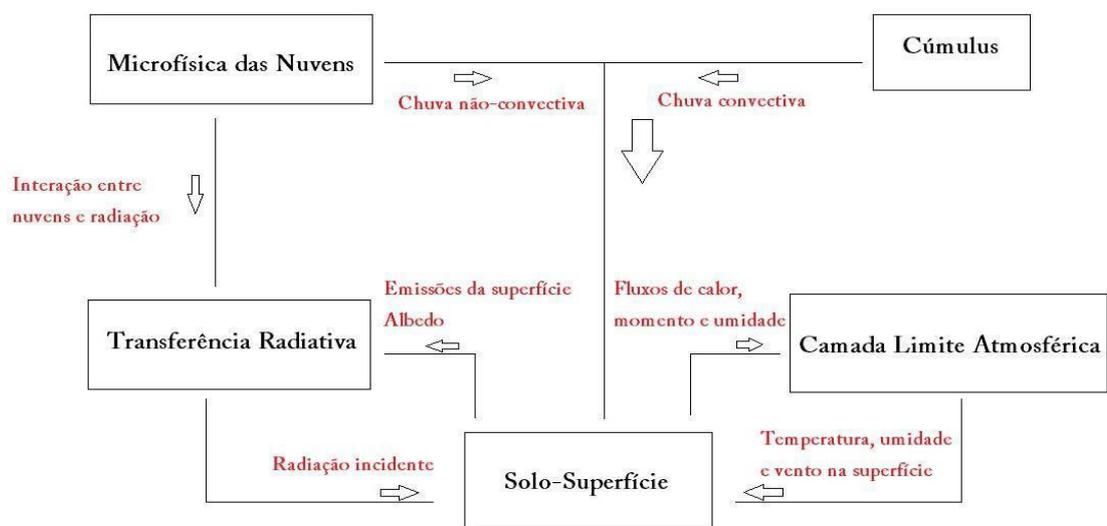


Figura 3.18: Interações entre os esquemas de parametrização no núcleo ARW. (adaptado de SKAMAROCK et al., 2019).

Por fim, os esquemas de interação solo-superfície (SS) são responsáveis por fornecer informações sobre os fluxos de calor sensível e latente e mistura entre a superfície e as camadas atmosféricas adjacentes que compõem a CLS. A principal característica deste esquema é o seu caráter vertical, de forma a não ocorrer interações horizontais entre os pontos de grade. Desta forma, as simulações se referem a uma coluna vertical acima de cada ponto de grade, na qual informações sobre quantidade de radiação, nebulosidade e precipitação são recebidas em troca de informações sobre os fluxos de calor e mistura, que caracterizarão as condições de movimento vertical ao longo da CLA. Dentre as características do solo presentes no modelo, vale destacar taxa de evapotranspiração, drenagem e permeabilidade do solo, categorias de vegetação, rugosidade do solo e runoff.

Neste contexto, os esquemas de parametrização física da CLA, CS e da interação solo-superfície contidos no ARW são o objeto de estudo de algumas dezenas de pesquisadores pelo mundo afora, com motivações diversas. O consenso é de que a estratégia mais eficiente para minimizar os erros na simulação do regime de ventos de uma região é encontrar as configurações físicas e numéricas mais adequadas. Como citado anteriormente, a comunidade mundial de usuários do WRF propõe rotineiramente melhorias nas funcionalidades do modelo, variando de acordo com as suas diversas aplicações. Dentre essas melhorias propostas pela comunidade de usuários do WRF está a adição de novos esquemas de parametrização física ao código do modelo e a implementação de suítes físicas, que são grupos de esquemas de parametrização física que apresentam bons resultados quando aplicados em conjunto.

De acordo com POWERS et al. (2017), a motivação para a criação destas suítes vem da necessidade de um melhor entendimento do comportamento destas parametrizações físicas quando utilizadas em conjunto, objetivando um melhor desempenho. Desta forma, é possível propor suítes mais assertivas para determinadas aplicações, resoluções de grade e condições atmosféricas. Estas vantagens vêm de encontro com os desafios da modelagem numérica já citados neste trabalho, relativos à busca por uma melhor compreensão do comportamento dos modelos atmosféricos em diferentes locais e condições atmosféricas.

Os esquemas de parametrização da CLA são responsáveis por calcular os fluxos verticais de subgrade, recebendo informações dos processos turbulentos fornecidos pelos

esquemas de CLS e SS. O produto destes esquemas são as tendências de temperatura, mistura e momento ao longo da coluna atmosférica. A suíte CONUS utiliza o esquema de CLA MYJ, que emprega as técnicas de fechamento de ordem 2.5 da equação da TKE propostos por MELLOR e YAMADA (1982) e atualizadas por JANJIC (1990, 1996, 2002). Segundo JANJIC (1996), buscou-se identificar as condições mínimas que permitam um desempenho satisfatório para uma gama de diferentes condições atmosféricas, além de estabelecer uma metodologia robusta e eficiente, permitindo a sua aplicação em modelos de mesoescala.

Para tanto, foi imposto um limite superior para a escala de comprimento proporcional ao valor da TKE e que seja função das forçantes de fluatibilidade e cisalhamento do escoamento (forçantes térmica e mecânica). Em situações instáveis, essa função exige que o termo de produção de TKE obedeça à condição de não-singularidade da equação da TKE em relação ao aumento da turbulência. Já em situações estáveis, essa função depende de que a razão entre o termo de movimento vertical e a TKE não seja menor em relação à redução da turbulência. Desta forma, a escala de comprimento será calculada por métodos diferentes no interior da CLA e acima desta.

Em conjunto com o esquema MYJ para a CLA, o núcleo ARW calcula o esquema ETA para a CLS, baseado na Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov. Os esquemas de parametrização da CLS são responsáveis por fornecer os valores de velocidade de fricção e coeficientes de troca aos esquemas de CLA e SS, que por sua vez calculam os fluxos de calor e mistura. Em geral, estes esquemas aplicam a Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov, no entanto variam no método de cálculo das funções de estabilidade e dos comprimentos de rugosidade. O esquema ETA, definido por JANJIC (1990, 1996, 2002), apresenta parametrizações da subcamada viscosa, que simulam os fenômenos de subgrade comentados anteriormente.

4. Revisão Bibliográfica

4.1. Sistema de Brisa Marítima

ESTOQUE (1962) avaliou a influência do "vento zero" (forçante sinótica) na formação e desenvolvimento da brisa marítima, impactando também na intensidade da brisa e em seu grau de penetração. ROTUNNO (1983) determinou um limiar em 30° de latitude, destacando que na região equatorial (desvio de Coriolis desprezado), a brisa marítima é limitada apenas por fricção. O artigo apresenta o teorema de circulação de Bjerknes, que desconsidera o atrito da superfície ao longo do escoamento e a geometria da costa, superestimando a intensidade da brisa de uma forma geral. DALU e PIELKE (1989) prolongaram os resultados de ROTUNNO (1983), confirmando que o grau de penetração da brisa marítima é função da latitude, associado ao desvio de Coriolis, e considerando também os mecanismos de fricção, como solo, relevo e vegetação. Destaca-se que esses dois fatores atuam apenas após a formação da brisa, reduzindo sua velocidade e, assim, a região de atuação do escoamento. Considerando que a intensidade do desvio de Coriolis é função da latitude, os mecanismos de fricção tornam-se protagonistas no freio da brisa marítima em regiões equatoriais (abaixo de 30° de latitude).

ABBS e PHYSICK (1992) discutiram a estrutura do SBM e seu impacto na dispersão de poluentes. Os autores avaliaram a formação da CLA marítima e dos consequentes processos de dispersão ou acúmulo de poluentes atmosféricos, destacando a ocorrência de fumigação e o quanto a penetração da brisa ao longo do dia pode transportar esses poluentes para regiões que não produziram tal poluente. A fumigação consiste no movimento subsidente de uma pluma em um CLA convectiva. Os autores também destacaram a dificuldade em identificar o escoamento de retorno da brisa, que muitas vezes é mascarado pela forçante sinótica atuante.

DUBREUIL et al. (2004) avaliaram a penetração da brisa marítima através da observação do deslocamento de linhas de nuvens cúmulos, associadas à FBM, por meio de imagens de satélite. Uma conclusão importantíssima dos autores, que já é utilizada nas técnicas de complementação energética, é de que a estação seca (déficit hídrico) aumenta o gradiente térmico terra-mar, potencializando a brisa marítima e favorecendo um maior potencial eólico observado no período. Os autores estimaram a posição do FBM, evidenciada por um contraste termodinâmico entre o ar marinho, mais denso e estável, e o ar continental, mais aquecido e instável, forçando movimentos convectivos na região.

É justamente essa região convectiva que facilita a identificação da FBM por imagens de satélite, em geral na forma de uma linha de nuvens cúmulus no interior do continente, enquanto que litoral e orla apresentam tempo estável. Os resultados indicam uma posição média da banda de nebulosidade entre 40 e 100 km afastado do litoral, facilitando a identificação da área influenciada pelo SBM na região investigada.

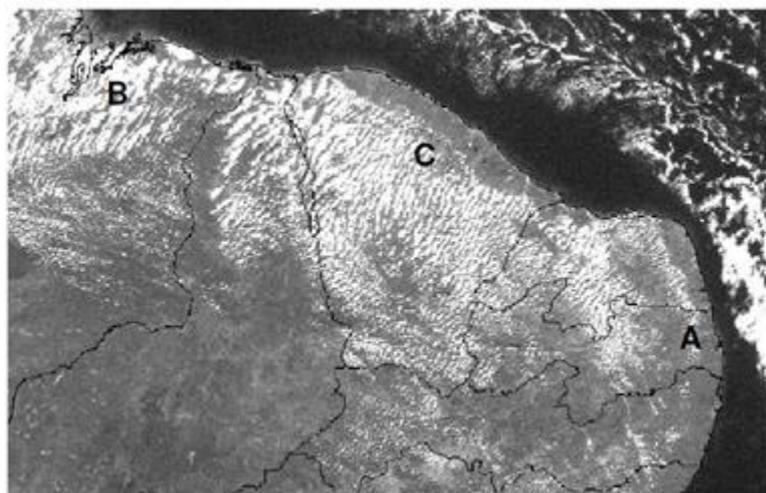


Figura 4.1: Imagem de satélite indicando a presença da frente de brisa marítima
(Fonte: DUBREUIL et al., 2004).

Os autores também destacam alguns aspectos locais do litoral da região, como o traçado retilíneo da costa do Estado do Ceará, favorecendo uma banda de nebulosidade mais uniforme, e a direção do vento sinótico dominante, intensificando assim o SBM. Como citado por MILLER et al. (2003), DUBREUIL et al. (2004) afirmam que um vento sinótico dominante fraco e oposto ao escoamento da brisa marítima favorece o desenvolvimento do SBM, ao passo que este mesmo vento posicionado na direção do escoamento da brisa marítima favorece uma maior penetração do ar marinho. Esta sobreposição entre vento sinótico dominante e SBM foi detectado na região de estudo e será detalhada no capítulo de Resultados.

TEIXEIRA (2008) avaliou a influência da brisa terrestre na precipitação do Ceará, destacando a ocorrência de maiores volumes de chuva entre a madrugada e o início da manhã, a partir da convergência com os ventos alísios. Já a brisa marítima (período diurno) não favorece a ocorrência de chuva na região. O autor destaca que as brisas são mais importantes nas regiões tropicais do planeta, visto que o desvio de Coriolis é reduzido e não influencia tanto na penetração do escoamento. Os resultados indicam

valores máximos de precipitação na madrugada e início da manhã entre 150 e 300 km no interior do continente, indicando a penetração do ar marinho na região através do avanço do SBM horas antes, no período da tarde. A figura 4.2 mostra a transição da brisa terrestre para a brisa marítima. De acordo com os autores, a convergência entre alísios (escala sinótica) e brisa terrestre (mesoescala) é responsável por estes acumulados de chuva, que podem ser ainda maiores com a presença da ZCIT.

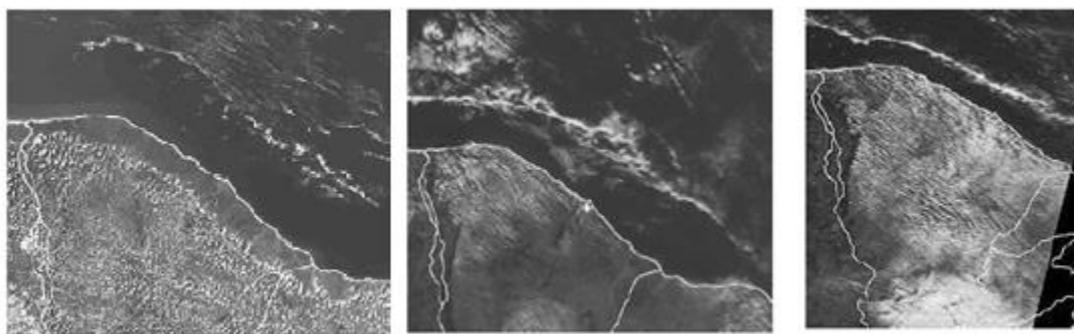


Figura 4.2: Imagens de satélite indicando a presença da frente de brisa marítima e a interação com os ventos alísios (Fonte: TEIXEIRA, 2008).

SALVADOR (2014) avaliou os impactos do SBM no desenvolvimento de uma CLA marítima a partir de dados de LIDAR e SODAR obtidos em Vitória, Espírito Santos, e em Dunkirk, Reino Unido, além de rodadas do modelo WRF. Os principais objetivos desta Tese de Doutorado foram: identificar e caracterizar o ciclo diário da CLI; avaliar o impacto do SBM nestes processos; e avaliar a habilidade do WRF em reproduzir estes processos. A autora destaca que a região de Vitória apresenta relevo complexo, enquanto que a região de Dunkirk se caracteriza como uma região de pouco relevo, com altitudes abaixo dos 150m. Em relação ao WRF, foram testadas duas parametrizações de fechamento não-local (YSU e ACM2) e uma de fechamento local (MYJ), além de dois esquemas de solo (RUC e Noah). As simulações foram realizadas em um aninhamento de grade 27 km x 9 km x 3 km. Assim como será mencionado em outros trabalhos desta Revisão Bibliográfica, a autora destaca que o refinamento da grade ocasiona um aumento no gasto computacional que não é compensado por melhorias nos dados de saída da simulação. Outra conclusão análoga a outros trabalhos semelhantes é de que o melhor conjunto de parametrizações varia de acordo com a região avaliada, principalmente se for levado em conta as características de relevo. Para a região de Vitória, a configuração YSU+Noah (fechamento não-local) se aproxima mais dos dados *in situ*, enquanto que para a região de Dunkirk a melhor configuração é a MYJ+Noah (fechamento local). A

autora ainda destaca que, em Dunkirk, os esquemas de fechamento não-local atrasam a entrada da brisa em até 3 horas.

JORGETTI et al. (2002) investigou os valores mensais do horário de entrada da brisa na capital paulista. O critério de detecção da brisa marítima foi a mudança na direção do vento e a queda da temperatura do ponto de orvalho. FRANCHITO et al. (1998) destacaram a importância da ressurgência na redução da TSM próxima à costa e, conseqüentemente, no aumento do gradiente terra-mar, intensificando assim o SBM. Da mesma forma, OHASHI e KIDA (2002) mostraram que a presença de uma Ilha de Calor Urbana (ICU) também eleva o gradiente térmico terra-mar, também podendo intensificar o SBM.

NAKANE e SASANO (1986) utilizaram dados de LIDAR para avaliar a brisa marítima na região de Kanto, Japão, principalmente a posição e deslocamento da frente de brisa. Os dados coletados evidenciam variações na temperatura e umidade relativa do ar associadas às variações na direção e velocidade do vento. Os autores propõem a presença de uma onda de gravidade se deslocando do mar para o continente, trazendo consigo ar mais frio e úmido. As observações com o LIDAR permitem identificar também variações nas concentrações de aerossóis, associadas à presença do SBM. Neste trabalho, a frente de brisa foi definida pela posição do gradiente de concentração de aerossóis. OLIVEIRA JÚNIOR et al. (2005) avaliaram dados de um radar Doppler (banda L) obtidos na Indonésia para identificar a influência do sistema de brisa no comportamento da CLA ao longo de um dia de céu claro. A partir das observações, os autores destacam a alteração imposta pela brisa na estrutura da CLA.

4.2. Análise de Agrupamento

LOPES DE LIMA et al. (2010) aplicaram a metodologia de Análise de Agrupamento aos dados de velocidade do vento coletados em 4 estados do NEB. De acordo com os autores, as técnicas de análises multivariadas são bastante úteis no tratamento e análise de grandes quantidades de dados, pois permitem uma investigação mais eficiente do comportamento espaço-temporal das variáveis de interesse, identificando variáveis que se comportam de forma similar (homogênea), reduzindo assim a quantidade de dados que precisam ser avaliados sem que haja perda de informação. Ao discriminar os elementos do conjunto de dados de acordo com suas similaridades e dividi-los em grupos homogêneos, a Análise de Agrupamento reduz a

subjetividade do conjunto de dados a partir da quantificação de suas similaridades. Aplicando a Análise de Agrupamento através da ligação de Ward, os autores agruparam as estações em 6 grupos homogêneos, permitindo a identificação de regiões com maior potencial eólico, destacando as regiões litorâneas e serranas.

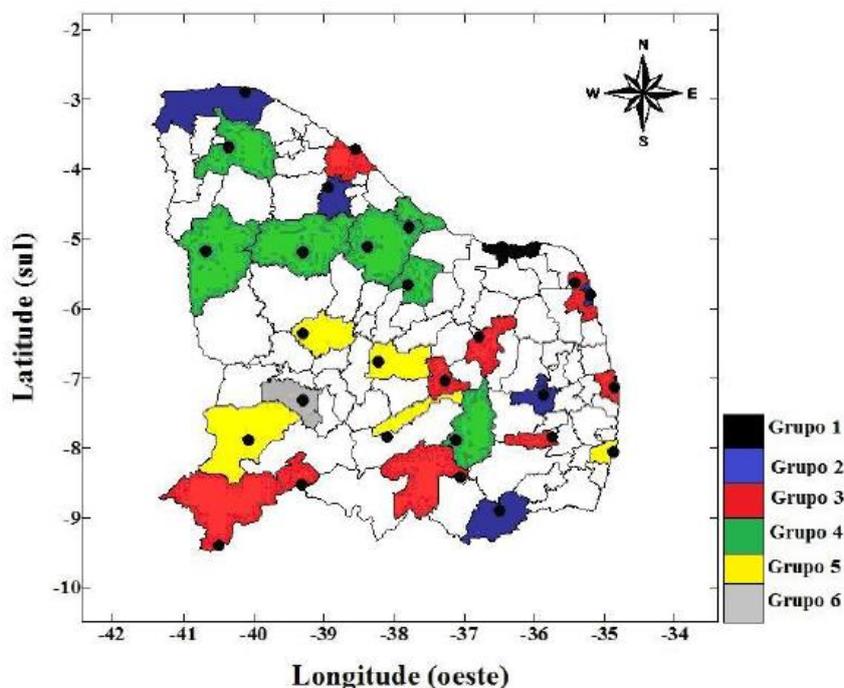


Figura 4.3: Resultados obtidos por LOPES DE LIMA et al. (2010) a partir de Análise de Agrupamento no estado do Rio Grande do Norte.

4.3. Estudos de Caso de Geração Eólica de Pequeno Porte

FEITOSA et al. (2014a) realizaram estimativas do potencial eólico através de 11 anos de dados de uma estação meteorológica no Estado do Ceará, tendo como objetivo a aplicação desta estimativa do potencial eólico na geração de energia para irrigação. Os autores realizaram a extrapolação do vento para 20m e simularam o gasto energético para bombear água para uma propriedade rural de 8ha. No estudo, considerou-se um aerogerador de 10kW e uma bomba d'água com capacidade para bombear 180 L/min. Estima-se que o gasto necessário seja de 7,8kWh por dia, durante 4 horas de irrigação, totalizando 2,2MWh durante o ciclo da banana no local avaliado. Os resultados indicam a geração de 9,85 MWh durante o ciclo da banana a partir das configurações apresentadas, permitindo a comercialização do excedente de produção, conforme a legislação vigente.

FEITOSA et al. (2014b) repetiram a metodologia de FEITOSA et al. (2014a), desta vez considerando 1 ano de dados. No estudo, considerou-se um aerogerador de 850W e uma bomba d'água com capacidade para bombear 267 L/min. Estima-se que o gasto necessário para a cultura desejada seja de 1,8kWh por dia, durante 3 horas de irrigação. Os resultados indicam a geração de 1,06 MWh durante um ano a partir das configurações apresentadas. Considerando uma meta de geração de 0,64MWh/ano, é possível vislumbrar a comercialização do excedente de produção, conforme a legislação vigente. FEITOSA et al. (2014c) compararam a viabilidade econômica de fontes hidrelétricas, termoelétricas e eólica. Os autores realizaram a extrapolação do vento para 50m e simularam o gasto energético para bombear água para uma propriedade rural de 8ha. No estudo, considerou-se um aerogerador de 30kW e uma bomba d'água com capacidade para bombear 20m³/h. FEITOSA et al. (2017) realizaram simulações do recurso eólico através de 2 meses de dados de uma estação no Ceará. Os autores realizaram a extrapolação do vento para 50m, considerando um aerogerador de 1kW.

SOBRAL e FACCIOLI (2009) avaliaram o potencial eólico da região de N. Sra. da Glória-SE a partir de dados da estação do INMET entre 2005 e 2007 e estimaram a energia gerada a partir de aerogeradores de uso rural, utilizadas no bombeamento de água para uso agrícola. Destaca-se que os autores desconsideraram os dados do período noturno na avaliação dos resultados, justamente o período no qual os ventos são menos intensos na região. No estudo, considerou-se um aerogerador de 400W e uma bomba de água de 500W, com capacidade de bombear 2300 l/h. Os resultados indicam que a região apresenta potencial eólico para aproveitamento em pequena escala, com capacidade de geração de 1,089MWh/ano a partir do aerogerador escolhido, correspondente à energia necessária para o bombeamento de 2 bilhões de litros de água/ano.

CORSO (2019) quantificou as vantagens da inserção de microgeração eólica em propriedades rurais, focando nas melhorias para sua produção diária. Para isso, aplicou uma metodologia qualitativa na avaliação das vantagens e desvantagens do processo. A autora realizou a extrapolação do vento para 20m e estimou o gasto energético de uma residência com consumo de 340 kW/mês. No estudo, considerou-se um aerogerador de 2 kW, concluindo-se que o tempo de *payback* foi de 8 anos, para uma vida útil de 25 anos. SCHINCARIOL NETTO (2017) investigou a viabilidade técnica, econômica e geográfica de instalação de um aerogerador de pequeno porte para uso agrícola, buscando propor uma metodologia de análise para casos similares. No estudo, foram considerados

diversos modelos de aerogerador, sendo concluído que o modelo Verne 555 (6kW) apresentou os melhores resultados, com tempo de *payback* de 6 anos.

ARAÚJO (2016) avaliou a viabilidade econômica para implantação de um sistema de microgeração distribuída baseado em energia elétrica produzida a partir de um sistema eólico. A análise da viabilidade econômica foi realizada através dos métodos de Valor Presente Líquido (VPL), de Taxa Interna de Retorno (TIR) e de *payback* simples. Considerando uma residência comum com consumo mensal médio de 100 kW e um aerogerador de 1kW (Gerar246), ARAÚJO (2016) conclui que o investimento não se mostrou economicamente atrativo, visto que o tempo de retorno do investimento (19 anos) é próximo ao tempo de vida útil dos equipamentos utilizados (20 anos de garantia), além de valor presente líquido negativo e taxa interna de retorno menor que a taxa mínima de atratividade. De acordo com ARAÚJO (2016), estes resultados se devem ao custo de produção, que ainda é elevado no Brasil, e à ausência de estímulo/financiamentos para a realização de projetos do tipo. O autor destaca que o investimento torna-se mais atrativo para residências com consumo acima de 100kWh/mês, permitindo um melhor aproveitamento do crédito de energia excedente.

BARCELLOS (2014) realizou um estudo de viabilidade de projetos de microgeração eólica baseando-se em dados de estações meteorológicas e gastos com as turbinas. Os autores realizaram a extrapolação do vento para 20m e consideraram diversos modelos de aerogerador. Novamente o modelo Verne 555 (6kW) apresentou os melhores resultados, com tempo de *payback* de 14 anos, considerando pagamento à vista. MARAFFON (2018) avaliou um projeto de sistema eólico de pequeno porte com potência nominal de 6kW. O autor destaca que a geração eólica de pequeno porte é pouco explorada e que esse nicho de mercado possibilita não apenas um complemento à matriz energética nacional, como também se mostra um gerador de investimentos e empregos. Ao contrário da geração de grande porte, que concentra os investimentos em poucos projetos, a geração de pequeno porte atua em uma maior distribuição da renda. ALBIERO et al. (2017) e ARRUDA et al. (2015) investigaram a viabilidade econômica de uma usina de geração elétrica híbrida, considerando apenas energias renováveis, como eólica, hidrelétrica e por biogás. ALBIERO et al. (2017) se basearam na turbina desenvolvida em ALBIERO et al. (2014).

4.4. Testes de Sensibilidade do WRF

A seguir serão apresentados alguns trabalhos realizados em diversas regiões do mundo que buscaram avaliar o desempenho do modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) em simular o recurso eólico e testar a sua sensibilidade em relação a diferentes aspectos do processo de modelagem numérica: configuração dos esquemas de parametrização física do modelo, base de dados utilizados como condição inicial e de contorno das simulações e resolução da malha de simulação. Ao comparar estes resultados com dados observados em estações meteorológicas e parques eólicos, o objetivo destes trabalhos foi encontrar a configuração do modelo que melhor reproduz os dados observados em sua região de estudo. Ter em mãos a combinação mais eficiente entre dado observado e modelagem numérica possibilita ao usuário estabelecer configurações que atendam especificamente seus interesses e até mesmo proponha a implementação de alterações nas equações paramétricas utilizadas nas simulações.

CARVALHO et al. (2012) testaram diferentes esquemas de parametrização de camada limite atmosférica, camada superficial e interação solo-superfície, comparando os resultados com dados de direção e intensidade do vento provenientes de torres eólicas instaladas em Portugal. Avaliou-se também a sensibilidade do modelo em relação à resolução da malha de simulação. Em relação à resolução da malha de simulação, testou-se em um primeiro momento um aninhamento de grade de 90 km x 18 km x 3,6 km e, na sequência do trabalho, testou-se uma grade mais refinada, com 1,2 km de resolução. No que se refere à base de dados de entrada do modelo, os autores utilizaram os dados da análise *Final Operational Global Analysis* (FNL) do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP). Em relação aos esquemas de parametrização física da CLA, os autores testaram um esquema de fechamento local, *Mellor-Yamada-Janjic* (MYJ), e dois esquemas de fechamento não-local: *Asymmetrical Convective Model*, versão 2 (ACM2) e *Yonsei University* (YSU). Para os esquemas de parametrização da camada superficial (CLS), os autores testaram os esquemas Eta, *Pennsylvania State/NCAR Mesoscale Model*, Versão 5 (MM5) e *Pleim-Xiu* (PX), enquanto que, para a interação solo-superfície (ISS), foram testados os esquemas *Noah* e PX. Vale destacar que os esquemas de CLA, CLS e ISS devem ser configurados em conjunto. Por exemplo, o esquema de CLA ACM2 só funciona com os esquemas de CLS e ISS PX, ao passo que os esquemas de CLS MM5 e Eta devem ser configurados em conjunto, respectivamente, com YSU e MYJ e com a ISS *Noah*.

As outras parametrizações físicas não foram alteradas durante os testes, com *Kain-Fritsch* para cúmulus, *Weather Research and Forecasting Single-Moment 6-Class* (WSM6) para microfísica de nuvens e *Rapid Radiative Transfer Model* (RRTM)-Dudhia para transferência radiativa. Estas simulações foram comparadas com dados obtidos por torres instaladas na região. Os autores escolheram os meses de janeiro e junho como representativos das condições de inverno e verão, de forma a identificar influências da sazonalidade nos resultados das parametrizações. Os resultados indicam que, na média dos pontos avaliados, o modelo subestimou os dados das torres eólicas para todos os esquemas testados. Apesar de ser levemente superado pelo conjunto ACM2-PX-PX no mês de junho, o conjunto YSU-MM5-*Noah* apresenta melhores resultados na média dos dois períodos avaliados neste trabalho. Segundo os autores, a técnica de fechamento não-local do conjunto ACM2-PX-PX parece ser mais favorável à simulação da atmosfera em períodos mais quentes, como é o caso do mês de junho na região de estudo. Destacam também que, em períodos frios, essa configuração tende a superestimar a cobertura de nuvens, influenciando na simulação do vento nas camadas inferiores da atmosfera. Outro ponto de discussão é o fraco desempenho da configuração MYJ-MM5-*Noah* nos dois períodos avaliados. Segundo os autores, o gradiente vertical de temperatura baseado na teoria da Similaridade subestima os valores observados na região, impactando na habilidade do modelo em simular os fluxos de calor entre a superfície e a CLS e em toda a extensão da CLA.

Do ponto de vista sazonal, o mês de junho apresenta melhores resultados na simulação da direção do vento e piores resultados na intensidade do vento para todos os esquemas testados. De acordo com os autores, a estação quente observada no mês de junho favorece a atuação de processos de subescala que não são resolvidos pelo modelo, prejudicando a simulação da intensidade do vento. Ademais, os autores realçam que esse desempenho superior na simulação da direção pode estar relacionado à característica desta estação na região de estudo, com menor variação na direção predominante do vento observado no local. Por fim, os resultados do teste de sensibilidade em relação à resolução da malha mostram um melhor desempenho da grade mais refinada. Entretanto, como também será destacado nos artigos subsequentes, esse ganho mostra-se insuficiente comparado ao elevado gasto computacional necessário para a realização desse refinamento.

CARVALHO et al. (2014b) reproduziram a metodologia aplicada em CARVALHO et al. (2012). Neste caso, a área de interesse foi a região continental e *offshore* da Península Ibérica. Os resultados indicam que o modelo novamente subestima a intensidade do vento e que a configuração ideal para a modelagem do vento na área *offshore* é com os esquemas de CLA e CLS *Quasi-Normal Scale Elimination* (QNSE), ao passo que, para a região continental, o conjunto de esquemas ACM2-PX apresentam desempenho superior. Os autores destacam também que todos os esquemas de parametrização testados apresentaram resultados piores nos meses de inverno e outono.

DRAXL et al. (2010) testaram sete diferentes esquemas de parametrização da CLA e avaliaram os melhores desempenhos na previsão da intensidade e cisalhamento do vento. Os autores destacam que uma simulação adequada do comportamento das camadas inferiores da atmosfera é de grande importância para a estimativa do regime de ventos na altura das torres eólicas, fazendo-se necessário testar a sensibilidade dos esquemas de parametrização física da CLA disponíveis no WRF. Neste teste de sensibilidade dos esquemas de CLA, foi utilizado um aninhamento de grade de 18 km x 6 km x 2 km, com os dados de entrada da análise do NCEP. Os autores testaram quatro esquemas de fechamento local: MYJ, *Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino Level 2.5* (MYNN2), *Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino Level 3* (MYNN3) e QNSE; além de três esquemas de fechamento não-local: ACM2, *Medium Range Forecast Model* (MRF), e YSU. As outras parametrizações físicas não foram alteradas durante os testes, com *Kain-Fritsch* para cúmulus e *Thompson* para microfísica de nuvens.

Os resultados mostraram que o esquema YSU (fechamento não-local) não reproduziu satisfatoriamente o vento para uma atmosfera instável, gerando cisalhamento vertical do vento semelhante às situações de regime neutro. Este esquema também não apresentou desempenho satisfatório na estimativa do ciclo diário do vento e da temperatura. Por outro lado, os esquemas de parametrização da CLA de fechamento local (MYNN2, MYNN3 e QNSE) apresentaram resultados mais satisfatórios. Em geral, os esquemas testados subestimam o vento durante a noite e superestimam durante o dia. Ademais, os autores concluíram que as situações de maior instabilidade não foram reproduzidas pelas simulações, destacando que o uso de esquemas de CLA adequados é imprescindível para uma simulação adequada do vento, pois reproduzem melhor a estrutura do vento nas camadas mais próximas à superfície. Estes autores sugerem

umentar o período de avaliação, de forma a identificar alguma tendência de sazonalidade.

GIANNAKOPOULOU e NHILI (2014) buscaram determinar uma metodologia adequada para a simulação do regime de ventos no Mar do Norte, de forma a reproduzir o vento *offshore* e as condições de estabilidade atmosférica na região de interesse com mais confiabilidade. Os autores afirmam que o grande desafio na modelagem atmosférica é encontrar os esquemas de parametrização mais adequados ao local de interesse e às variáveis que se deseja simular, além de definir uma base de dados iniciais e de contorno que entregue melhores resultados. Destacam também que a modelagem atmosférica em regiões *offshore* é fortemente afetada pela carência de dados observados, valorizando ainda mais a busca por simulações mais confiáveis. Neste trabalho foram realizados testes de sensibilidade de diversos aspectos do WRF. Em relação à resolução da malha de simulação, testou-se em um primeiro momento um aninhamento de grade de 27 km x 9 km x 3 km e, na sequência do trabalho, testou-se uma grade mais refinada, com 1 km de resolução. No que se refere à base de dados de entrada do modelo, os autores utilizaram os dados da análise NCEP-FNL e da reanálise *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis* (ERA-Interim). Para a parametrização da CLA, os autores testaram dois esquemas de fechamento local (MYJ e MYNN2) e dois esquemas de fechamento não-local (ACM2 e YSU), enquanto que as outras parametrizações físicas não foram alteradas durante os testes, com *Grell* para cúmulus, *Thompson* para microfísica de nuvens, RRTM-Dudhia para transferência radiativa e *Noah* para ISS. Estas simulações foram comparadas com dados oriundos de torres instaladas na região.

Inicialmente, nos testes relativos à resolução da malha, os autores não variaram os dados de entrada e a parametrização da CLA, mantendo ERA-Interim e YSU nas simulações com aninhamentos 27-9-3 km e 27-9-3-1 km. Os resultados destes testes indicam que, de fato, a grade mais refinada apresentou melhores resultados. Entretanto, os autores destacam que esta melhora nos resultados em relação a malha 27-9-3 km também não foi suficiente para compensar o aumento no custo computacional necessário para simular a grade mais refinada, em consonância com CARVALHO et al. (2012), visto que a região de estudo apresenta uma superfície mais homogênea. Desta forma, os autores concluem que, para superfícies mais homogêneas, como o Mar do Norte, o refinamento da malha pode não ser vantajoso do ponto de vista do custo computacional. Para realizar os testes relativos aos dados de entrada, os autores não variaram o aninhamento e a

parametrização da CLA, mantendo a grade 27-9-3 km e o esquema YSU nas simulações com dados da análise NCEP-FNL e da reanálise ERA-Interim. Estes testes indicam resultados mais próximos dos dados observados nas simulações que utilizaram os dados da reanálise ERA-Interim. No entanto os autores destacam que as duas bases apresentam superestimação do vento abaixo de 40m e subestimação acima deste nível, de forma que os erros aumentam com a altura, sendo mais acentuados na reanálise ERA-Interim. Assim, os autores indicam que testar a sensibilidade dos esquemas físicos, como a parametrização da CLA, seja mais profícuo para o escopo do trabalho.

Por fim, o teste de sensibilidade dos esquemas de CLA foi realizado com os dados de entrada do ERA-Interim e a malha 27-9-3 km. Os resultados mostram que as simulações são mais sensíveis às variações nos esquemas de CLA do que às variações na base de dados e na malha de simulação. O esquema YSU (não-local) apresentou melhores resultados abaixo de 70m, no entanto os erros aumentam consideravelmente a partir deste nível. Por outro lado, o esquema MYNN (local) apresentou resultados superiores em todos os níveis avaliados, apesar de indicar uma tendência de subestimação da intensidade do vento. A partir destes resultados os autores concluem que estudar outros aspectos da CLA, como o comportamento e evolução da CLA marítima, bem como suas condições de estabilidade, é de extrema importância para que as simulações sejam mais realistas e que, assim, os projetos de energia eólica *offshore* sejam mais lucrativos. Assim como DRAXL et al. (2010), os autores pretendem aumentar o período avaliado em trabalhos futuros, já que neste artigo se resumiu a um mês de dados.

STORM e BASU (2010) conduziram um teste de sensibilidade para avaliar a habilidade do modelo WRF em reproduzir o cisalhamento do vento em alturas compatíveis com uma turbina eólica. No ano anterior, STORM et al. (2009) realizaram um estudo preliminar testando apenas os esquemas MYJ e YSU e concluíram que, para a região de estudo, nenhuma configuração de CLA se mostrou superior, de forma que os resultados das rodadas com YSU acertam mais a direção do vento e as rodadas com MYJ acertam mais a intensidade do vento. Os autores realizaram, em um primeiro momento, simulações com a seguinte configuração: *Kain-Fritsch* para cúmulus, *Weather Research and Forecasting Single-Moment 3-Class* (WSM3) para microfísica de nuvens, *RRTM-Dudhia* para transferência radiativa, *Noah* para ISS e YSU para CLA. Em um segundo passo, os autores testaram quatro esquemas de CLA (ACM2, MYJ, QNSE e YSU) e quatro bases de dado de entrada: *North American Regional Reanalysis* (NARR), *National*

Center for Environmental Prediction Reanalysis Project (NNRP), NCEP-FNL e *North American Mesoscale Model NAM*, com um aninhamento de grade de 27 km x 9 km.

Os resultados indicam que tanto os modelos de fechamento local MYJ e QNSE quanto o modelo de fechamento não-local ACM2 superestimam o cisalhamento do vento no período noturno, enquanto que o modelo não-local YSU subestima os valores observados. Além disso, as simulações com os esquemas ACM2, MYJ e QNSE favorecem maiores variações na direção do vento no período noturno do que aquelas com o esquema YSU. De fato, nota-se uma tendência do esquema YSU em tornar a atmosfera mais neutra, o que também foi observada por DRAXL et al. (2010). Os resultados do teste de sensibilidade demonstraram a dependência das simulações de cisalhamento do vento em relação aos esquemas de parametrização física da CLA testados, ao passo que a influência das condições de contorno nos resultados das simulações não se mostrou tão crucial. Os resultados indicam que o modelo superestima o cisalhamento do vento durante o dia e subestima durante a noite, também em concordância com os resultados de DRAXL et al. (2010). Os autores propõem uma solução para aumentar a confiabilidade das estimativas de cisalhamento do vento: a elaboração de um modelo de ensemble que considere os diversos esquemas de parametrização testados.

CARVALHO et al. (2014a) testaram a sensibilidade do modelo WRF em relação aos dados utilizados como condição inicial e de contorno, comparando os resultados das simulações com dados obtidos *in situ*. Neste trabalho os autores testaram duas bases de dados de análise (NCEP-FNL e NCEP-GFS) além de quatro bases de dados de reanálises: NCEP-2, NCEP-CFSR, ERA-Interim e a *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications (NASA-MERRA)*, com a finalidade de determinar qual se adequa melhor como condição inicial e de contorno para o modelo WRF para a sua região de estudo. Neste estudo de caso, os melhores resultados foram obtidos com a reanálise ERA-Interim e com as análises NCEP-GFS e NCEP-FNL. Os resultados apontam que, considerando as reanálises, as versões mais recentes (ERA-Interim e NCEP-CFSR) apresentaram desempenho superior à versão antiga NCEP 2, sendo a reanálise ERA-Interim a que apresentou os melhores resultados, apresentando os menores erros estatísticos para direção e intensidade do vento. Outro importante resultado desta avaliação de bases de dados de entrada do modelo é que, para todas as 6 simulações, observou-se um viés positivo, ou seja, as simulações superestimam a intensidade do vento. Os autores concluem que a escolha de uma base de dados de condição inicial e de

contorno adequada para a região de interesse é imprescindível para um melhor desempenho dos modelos de previsão.

4.4.1. Estudos realizados com o WRF no Estado de Alagoas

Nesta seção serão apresentados trabalhos que avaliaram o desempenho do WRF em simular o regime de ventos e o potencial eólico no estado de Alagoas. Destaca-se que estes trabalhos não se preocuparam em avaliar preferências entre esquemas de parametrização física, focando apenas em comparar os resultados da simulação com os dados observados no local. Vale destacar também que não foram encontrados artigos científicos produzidos sobre a modelagem numérica do regime de vento no estado de Sergipe, logo esta Dissertação terá grande importância para o estudo e caracterização meteorológica de Sergipe, servindo para preencher uma lacuna importante na literatura do estudo do regime de ventos no estado.

RAMOS et al. (2013) avaliaram a habilidade do modelo WRF em simular o regime de ventos no estado de Alagoas para as três mesoregiões do estado (Sertão, Agreste e litoral) e de acordo com a sazonalidade (período seco e chuvoso). Os autores destacam que variações locais na direção do vento são decorrentes de fatores locais de topografia e vegetação, além de sistemas de brisa de vale-montanha e canalização do vento nas proximidades do Rio São Francisco. As simulações foram realizadas com a seguinte configuração: ACM2 para CLA, MOST para CLS, *Grell-Devenyi* para cúmulus, *Purdue-Lin* para microfísica de nuvens, RRTM para transferência radiativa e *Noah* para ISS. Os resultados indicam que o modelo WRF apresenta desempenho satisfatório, com resultados mais significativos para a estação seca e no interior do estado.

RAMOS et al. (2018) avaliaram um conjunto de dados anemométricos coletados no município de Girau do Ponciano, Alagoas, buscando novamente identificar padrões sazonais do regime de vento de acordo com a estação seca (outubro a janeiro) e a estação chuvosa (maio a agosto) do estado. Os autores destacam o predomínio de ventos de quadrante leste característicos dos ventos alísios e a canalização do vento observada nas proximidades do Rio São Francisco. Os resultados indicam que a estação seca apresenta um regime de vento mais favorável à instalação de torres eólicas.

GERMANO et al. (2016) avaliaram as simulações de intensidade do vento do modelo WRF com a finalidade de identificar regiões favoráveis à instalação de torres

eólicas no estado de Alagoas. Neste trabalho, o WRF foi configurado com um decaimento de grade de 25 km para 5 km e executado para um período de um ano, visando a observação de padrões sazonais. Os autores destacam a influência da ZCIT e dos alísios de sudeste no regime de ventos da região. A partir dos resultados de direção e velocidade do vento e potência média transportada pelo vento, comparados com dados observados, os autores concluem que o WRF é uma ferramenta válida na identificação de regiões com potencial eólico, destacando alguns municípios do Agreste Alagoano (Estrela de Alagoas e Palmeira dos Índios, no norte de Alagoas e Traipu, município banhado pelo Rio São Francisco) e do Sertão (Olho d'água do Casado, localizado no extremo oeste de Alagoas), como as regiões com maiores valores de intensidade do vento. Os resultados também indicam valores maiores durante o verão e, no geral, uma tendência de subestimação das simulações em relação aos dados observados.

LYRA et al. (2016), OLIVEIRA et al. (2016) e SANTOS DA SILVA et al. (2018) utilizaram dados meteorológicos oriundos de um sítio experimental instalado no município de Craíbas, Alagoas. O sítio experimental fez parte de um projeto que buscou desenvolver uma metodologia de previsão de curto e médio prazo do potencial eólico para a região de estudo. LYRA et al. (2016) compararam as saídas do modelo WRF com dados de velocidade do vento, velocidade de fricção e fluxos turbulentos de calor latente. Os autores afirmam que os resultados do WRF representaram satisfatoriamente as quatro variáveis avaliadas, apresentando superestimativa da velocidade do vento. OLIVEIRA et al. (2016) aplicaram os dados de direção e intensidade do vento no modelo de rugosidade *Wind Atlas Analyses and Application Program* (WAsP), estimando os parâmetros da distribuição de probabilidade de Weibull para três alturas de aerogerador. Os autores concluíram que a altura de torre com maior potencial eólico é em torno de 100m. SANTOS DA SILVA et al. (2018) compararam dados de velocidade do vento medidos ao longo do ano de 2014 com as saídas do modelo WRF. Os resultados indicam que o modelo erra mais nos meses mais secos do que durante a estação chuvosa. Os autores afirmam que os resultados do WRF representaram satisfatoriamente a distribuição espaço-temporal do vento na região de interesse ao longo do período avaliado e destacam que o Agreste Alagoano é a região do estado com maior potencial eólico.

SILVA JÚNIOR et al. (2016) aplicaram atualizações nos esquemas de parametrização de topografia e uso do solo, buscando obter melhores simulações da direção e intensidade do vento. Para melhor reproduzir a topografia, os autores utilizaram

dados oriundos da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) com resolução espacial de 90 metros, enquanto que, em relação ao uso do solo, dados com resolução horizontal de 1 km foram substituídos por dados com 0,25 km de resolução. No que se refere à base de dados de entrada do modelo, os autores utilizaram os dados da análise NCEP-FNL. As simulações realizadas na região de Maragogi, no litoral de Alagoas, de fato apresentaram melhores resultados após as atualizações nos dados de topografia e uso do solo, principalmente na intensidade do vento, indicando que avanços na representação do terreno podem aproximar mais ainda as variáveis simuladas dos valores observados na região.

5. Estratégia Metodológica

Este trabalho pretende trazer contribuições para a comunidade científica a partir de uma metodologia que indique a aplicação ideal do recurso eólico na região de estudo, promovendo práticas de desenvolvimento sustentável que tragam retorno econômico e social para a população local. Neste contexto, no estudo buscou-se avaliar a viabilidade econômica do uso de energia eólica como subsídio para irrigação em propriedades de AF do Sertão de Sergipe. Por se tratar de um trabalho multidisciplinar, iniciando-se com conceitos de Meteorologia e Interação Oceano-Atmosfera, passando por métodos de Análise de Agrupamento e Planejamento Energético e finalizando com a aplicação desta teoria discutida na produção de grãos de milho, faz-se necessário organizar as etapas da estratégia metodológica desta Dissertação, destacando objetivos principais e secundários de cada etapa. As etapas serão organizadas de acordo com as indagações propostas no capítulo de Objetivos.

O processo de escolha da região de estudo teve como critério o histórico déficit energético observado no NEB e seu enorme potencial eólico. Considerando os estados do NEB, identificou-se uma menor produção eólica em Alagoas e Sergipe. Somada a carência de trabalhos publicados sobre Meteorologia e estudo do regime de ventos em Sergipe, definiu-se, pois, o estado de Sergipe como região de estudo para esta Dissertação, com foco no Sertão de Sergipe, novamente levando em conta regiões de maior déficit energético.

A etapa de coleta e tratamento de dados avaliou inicialmente o vento nos estados de Alagoas e Sergipe, identificando alguns padrões atmosféricos, com destaque para o sistema de brisa marítima (SBM). A caracterização do regime de vento foi realizada a partir de dados de 14 estações meteorológicas automáticas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas nestes estados. Segundo a classificação do IBGE (IBGE, 1990), as estações Coruripe, Maceió e São Luiz do Quitunde localizam-se no Leste Alagoano, enquanto que Aracaju, Brejo Grande e Itabaianinha localizam-se no Leste Sergipano; Arapiraca e Palmeira dos Índios localizam-se no Agreste Alagoano, enquanto que Itabaiana e Poço Verde localizam-se no Agreste Sergipano; Pão de Açúcar e Piranhas localizam-se no Sertão Alagoano, enquanto que Carira e Nossa Senhora da Glória localizam-se no Sertão Sergipano.

Tabela 5.1: Período de dados disponíveis para cada estação utilizada nesta Dissertação.

	Estação	Período Disponível
1	Aracaju	2003 a 2021
2	Brejo Grande	2008 a 2020
3	Coruripe	2008 a 2020
4	Maceió	2003 a 2021
5	São Luís do Quitunde	2008 a 2021
6	Arapiraca	2008 a 2021
7	Palmeira dos Índios	2007 a 2021
8	Carira	2008 a 2021
9	Itabaiana	2017 a 2020
10	Itabaianinha	2007 a 2021
11	Nossa Senhora da Glória	2017 a 2021
12	Poço Verde	2008 a 2021
13	Pão de Açúcar	2007 a 2020
14	Piranhas	2017 a 2021

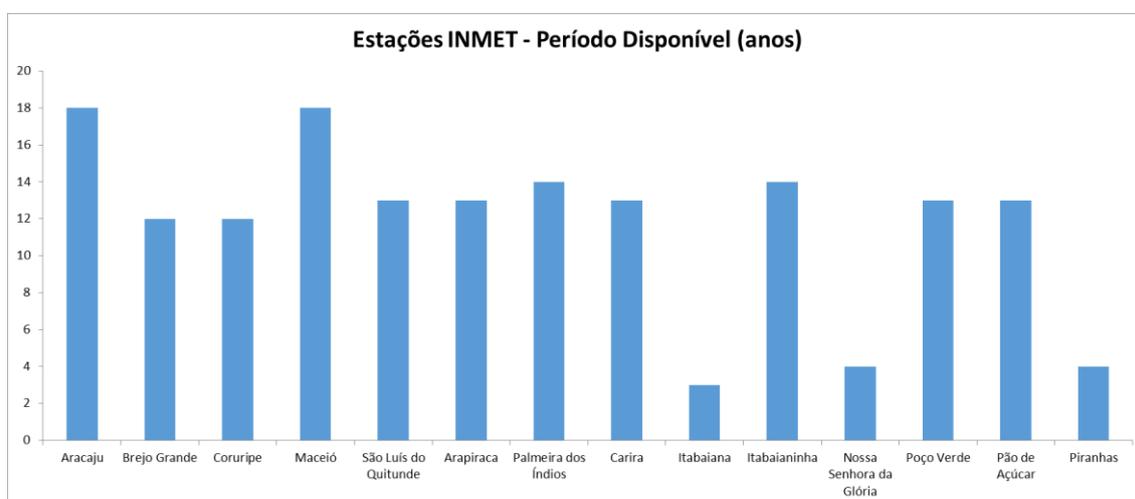


Figura 5.1: Período de dados disponíveis para cada estação utilizada nesta Dissertação.

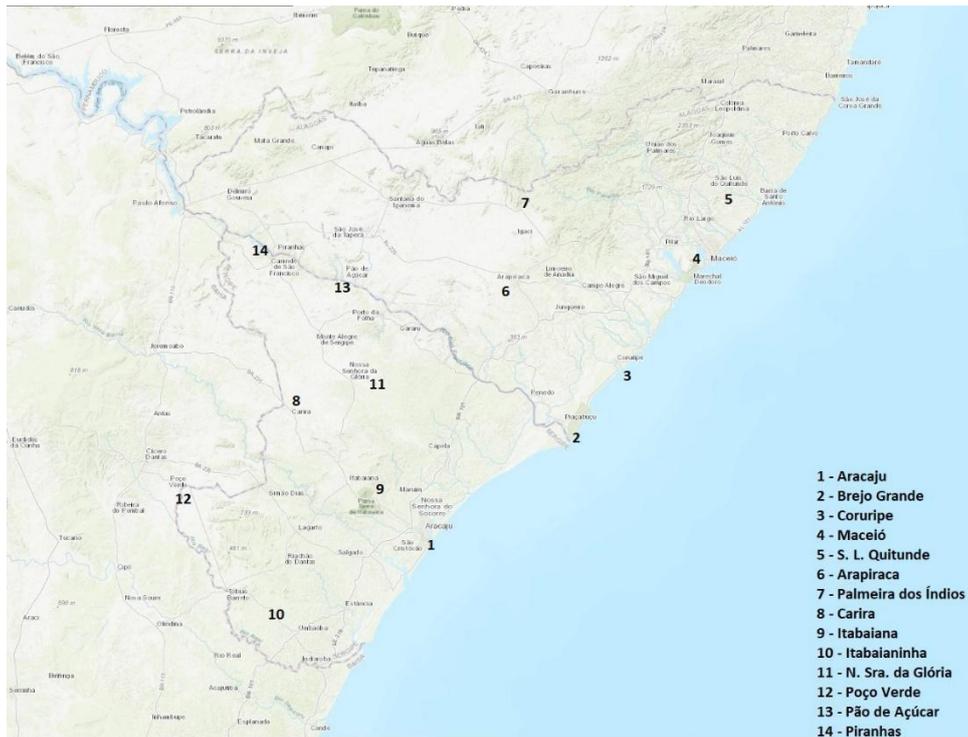


Figura 5.2: Localização das estações meteorológicas automáticas de superfície.

Inicialmente, a análise multivariada dos dados englobaria as 14 estações disponíveis (tabela 5.1 e figuras 5.1 e 5.2), no entanto as estações Itabaiana, N. Sra. da Glória e Piranhas dispõem de reduzida quantidade de dados em comparação com as outras. Considerando que estas 11 estações restantes dispõem de mais de 10 anos de dados horários de direção e intensidade do vento, propôs-se uma simplificação deste processo a partir de uma Análise de Agrupamento destes dados, tendo em vista a possibilidade de acelerar o processo de análise a partir do descarte de informações redundantes, sem que ocorra perda de informações significativas. Desta forma, a Análise de Agrupamento contemplou os dados de 11 estações automáticas de superfície espalhadas pelos estados de Alagoas e Sergipe, e os resultados foram organizados em dendogramas e mapas de similaridade, permitindo a identificação de regiões homogêneas quanto à intensidade do vento.

Finalizadas as Análises de Agrupamento das estações localizadas nos Estados de Alagoas e Sergipe e a identificação de regiões homogêneas quanto à direção e intensidade do vento, foi possível identificar estações que representassem o Sertão de Sergipe. Carira e N. Sra da Glória seriam aplicáveis, no entanto Carira possui mais dados disponíveis, sendo assim escolhida para as análises mais detalhadas realizadas na sequência do estudo. Assim, o próximo passo foi realizar uma comparação entre os dados de direção e

intensidade do vento das estações Aracaju (cluster unitário no litoral de Sergipe) e Carira (cluster do interior de Sergipe), tendo em vista verificar a influência da penetração do SBM e a aplicação destes resultados no estudo de caso proposto para o Sertão de Sergipe.

Para esta análise do cluster de Carira, os dados foram separados em períodos de acordo com o ciclo diário do SBM: entre 10h e 19h local, quando predominam os ventos de leste da brisa marítima, e entre 20h e 09h local, quando é possível observar o enfraquecimento da brisa marítima no período da noite, seguido pela formação de ventos costeiros de oeste característicos da brisa continental e por fim o início da brisa marítima do dia seguinte. A análise dos dados foi realizada a partir de rosas-dos-ventos geradas pelo *software* WRPlot, permitindo a análise dos padrões de direção e intensidade do vento para cada estação e períodos específicos do dia. Desta forma, será possível caracterizar o vento na região, destacando aspectos citados por outros autores, como a presença deste mecanismo de brisa e a influência dos alísios na predominância de ventos de quadrante leste. Estes resultados também contribuirão para comparação com as simulações realizadas pelo WRF. Outro aspecto analisado foi a taxa de calmaria da região, informação importante na tomada de decisões do planejamento energético e, neste caso, na escolha do horário de operação de uma torre eólica de pequeno porte. Os resultados apresentarão a porcentagem de dados inferiores a 0,5 m/s.

Definiu-se o plantio de milho como objeto de estudo, a partir dos dados obtidos pelo SIG, informações de EMDAGRO (2018) e MENEZES et al. (2019), sobre a distribuição das lavouras de milho no Sertão de Sergipe cultivados por agricultores familiares, e de EMBRAPA (2006) e OSTI et al. (2018), sobre as características da cultura do milho, como ciclo de desenvolvimento e quantidade de água necessária para irrigação. Seguindo a metodologia proposta por trabalhos semelhantes, foi proposto no estudo de caso a utilização de um aerogerador de 6kW (BARCELLOS, 2014; SCHINCARIOL NETTO, 2017) para geração de energia para irrigação de milho, de acordo com o modelo de bomba de irrigação utilizado por FEITOSA et al. (2014b) e a quantidade de água necessária estimada por EMBRAPA (2006) e OSTI et al. (2018).

Para avaliar a viabilidade econômica do investimento neste aerogerador, será calculado o tempo de *payback* simples, considerando dois valores de bandeira tarifária para atividades rurais fornecidos pela concessionária Energisa (ENERGISA, 2022) de acordo com as proposições da REN 1000 (ANEEL, 2021): para o consumidor do tipo

“irrigante noturno”, no valor de R\$ 0,16390 kWh, e para o consumidor do tipo “não irrigante noturno”, no valor de R\$ 0,60707 kWh.

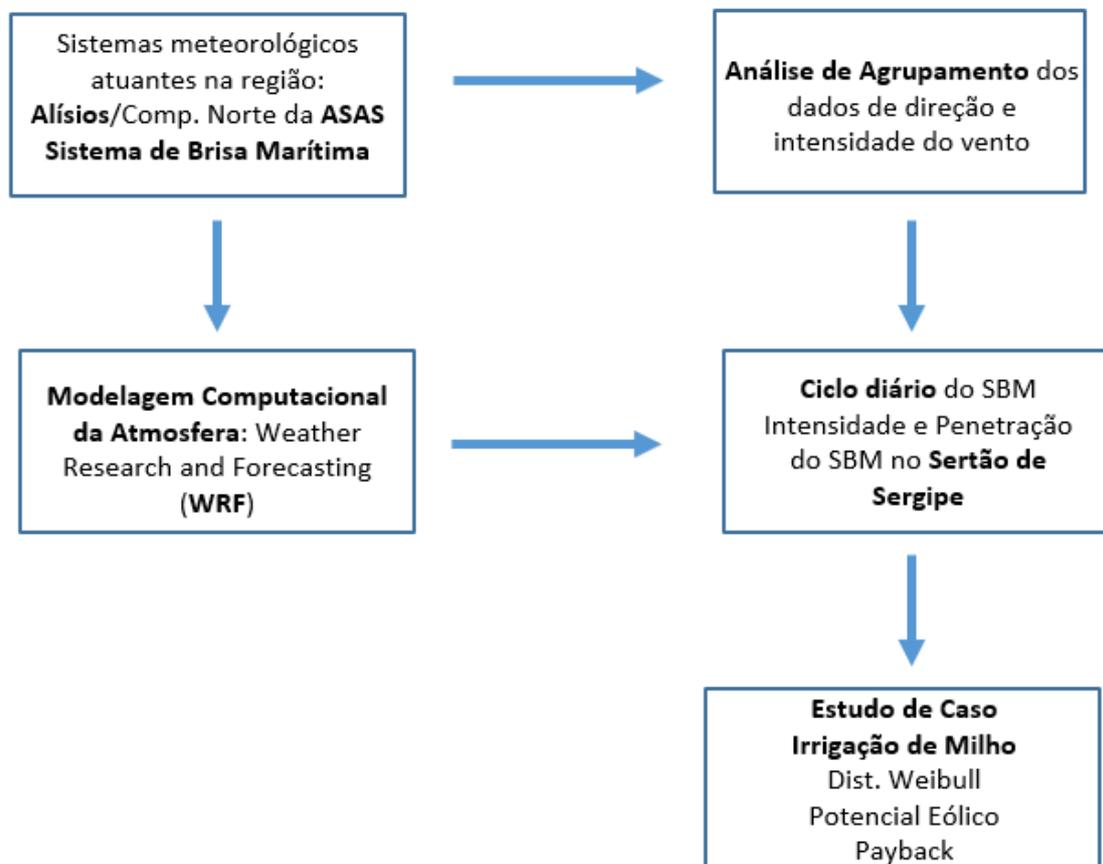


Figura 5.3: Fluxograma da estratégia metodológica aplicada nesta Dissertação.

Em complemento à metodologia de geração de eólica de pequeno porte proposta, foram realizadas simulações com o modelo WRF para a região de estudo. Técnicas de modelagem numérica permitem realizar projeções de curto, médio e longo prazo do potencial eólico de uma região, além de possibilitar a estimativa de variáveis meteorológicas em setores carentes de instrumentos de medição, dependendo é claro de uma validação adequada dos resultados das simulações.

As simulações foram realizadas considerando um aninhamento de grade de 9 km x 3 km x 1 km, no qual o WRF foi configurado a partir da suíte CONUS. A CONUS foi desenvolvida pelo NCAR (NCAR, 2016) e implementada no modelo *Rapid Refresh* (RAP), um modelo de previsão do tempo e rápida assimilação de dados, sendo composta pelo esquema de Microfísica Thompson (Thompson et al., 2008; Thompson e Eidhammer, 2014), pelo esquema de Cumulus Tiedke (Tiedtke, 1989), esquema RRTMG para radiação (Iacono et al., 2008), esquema Mellor-Yamada-Janjic para CLA (Mellor e

Yamada, 1982; Janjic, 1990, 1996, 2002) e esquema Noah para interação solo-superfície (Chen e Dudhia, 2001). A avaliação dos resultados das simulações será realizada a partir dos dados disponíveis das estações meteorológicas automáticas de superfície.

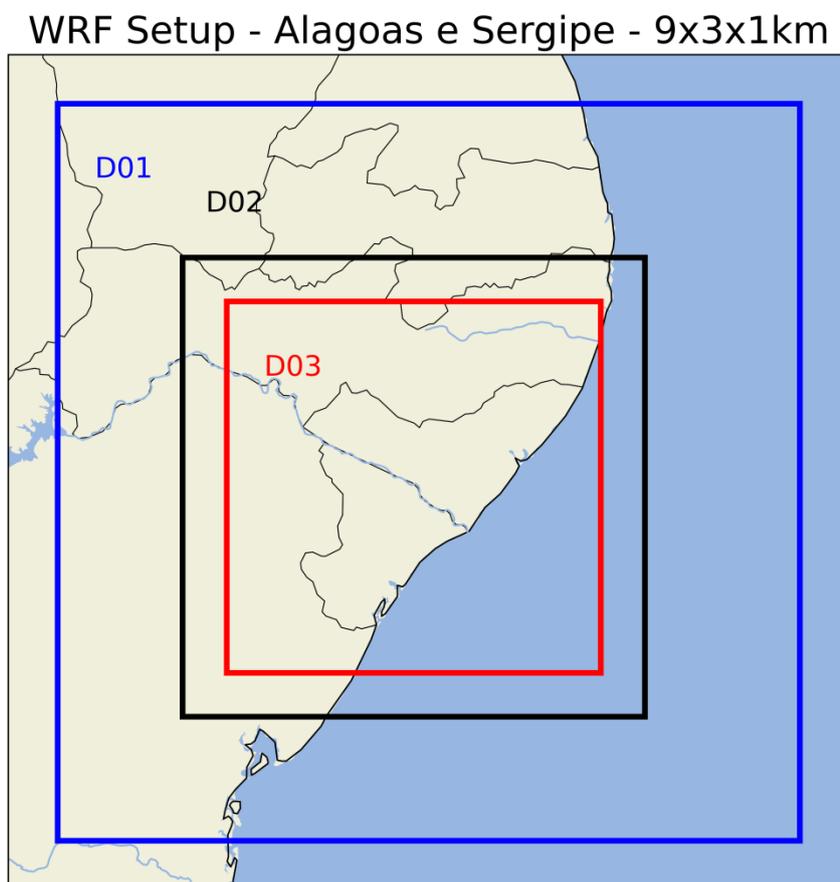


Figura 5.4: Configuração do aninhamento de grade das simulações

Nestas simulações, utilizou-se a versão atualizada da base de dados de análise NCEP-FNL como condição inicial e de contorno das simulações, que apresentou melhores resultados na avaliação realizada por CARVALHO et al. (2014a) e também utilizado por CARVALHO et al. (2012), GIANNAKOPOULOU e NHILI (2014), STORM e BASU (2010) e SILVA JÚNIOR et al. (2016). A grande vantagem dos dados FNL-GDAS se encontra neste aporte de dados assimilados pelo GDAS, como sondagens e dados obtidos via sensoriamento remoto por satélites, contando com mais informações do que a rodada inicial do modelo GFS (NWS, 2015). A tabela abaixo apresenta as configurações utilizadas nas simulações realizadas nesta etapa:

Tabela 5.2: Configurações de modelo e domínio utilizadas nas simulações realizadas neste trabalho.

Modelo e Domínio	
Versão do Modelo	ARW versão 4.0, não-hidrostático
Domínio	Estados de Alagoas e Sergipe
Projeção	Mercator
Pontos de Grade	101 x 101; 187 x 187; 451 x 451
Espaçamento de Grade	9km x 3km x 1km
Níveis verticais	35
Topografia	3,7 km
Condições de Contorno	FNL-GDAS (0,25° x 0,25°)
Passo de Tempo	50s
Opções Físicas	
Radiação	RRTMG (Iacono et al., 2008)
Interação Solo-Superfície	Noah (Chen e Dudhia, 2001)
Uso do Solo	MODIS 20 categorias
Camada Limite Atmosférica e Superficial	MYJ (Mellor e Yamada, 1982; Janjic, 1990, 1996, 2002)
Microfísica	Thompson (Thompson et al., 2008; Thompson e Eidhammer, 2014)

6. Resultados e Discussão

A seguir serão apresentados os resultados obtidos no estudo. A primeira parte do capítulo de resultados apresenta os resultados da Análise de Agrupamento (AA) dos dados de 11 estações meteorológicas automáticas espalhadas pelos estados de Alagoas e Sergipe. Os resultados foram organizados em dendogramas e mapas de similaridade, permitindo a identificação de regiões homogêneas nos estados de Alagoas e Sergipe quanto à intensidade do vento (grupos de estações que apresentam comportamento similar). Considerando a carência de trabalhos publicados anteriormente para esta região, esta análise multivariada por si só já justifica o pioneirismo deste trabalho, possibilitando investigar os fenômenos meteorológicos atuantes na região, principalmente a presença da brisa marítima e sua penetração no interior dos estados de Alagoas e Sergipe.

Em seguida, o foco da análise se direcionou para o Estado de Sergipe, principalmente para o Sertão, visando uma avaliação mais aprofundada do vento local e do comportamento do SBM ao longo do Estado de Sergipe. Para isso, analisou-se detalhadamente apenas as estações Aracaju (litoral) e Carira (cluster do interior), separando os dados de acordo com o ciclo diário do SBM e tendo como objetivo a aplicação destes resultados na identificação do potencial eólico. Os resultados indicam fortes indícios de que a brisa marítima atua como um agente climatológico sobre o Estado de Sergipe, influenciando diretamente o tempo e o clima ao longo da área avaliada. Estes resultados mostram como a brisa interage com o vento dominante da região (alísios/componente norte da ASAS), ou seja, como fenômenos de escalas diferentes interagem, indicando a sobreposição entre os fenômenos de escala sinótica e mesoescala. Outro ponto importante é a observação de que a ausência de relevo significativo facilita a atuação da composição “alísios+SBM”, permitindo que ela penetre em regiões afastadas do litoral sem reduções significativas na intensidade do vento, como descrito a priori na literatura.

A terceira parte do capítulo de Resultados apresentará um estudo de caso sobre a aplicação de geração eólica de pequeno porte na irrigação de uma plantação de milho. Considerando os resultados obtidos nos itens anteriores, será proposto que a utilização do aerogerador de 6kW esteja restrita aos horários de maior intensidade do vento, entre 09h e 21h local.

Por fim, serão apresentados os resultados das saídas do modelo WRF, em complemento à metodologia de geração de eólica de pequeno porte proposta. Para explorar a habilidade do modelo em reproduzir o SBM, serão apresentados os campos de direção e intensidade do vento em 10m, combinados com os campos de temperatura do ar em 2m e água precipitável, permitindo assim avaliar não apenas o comportamento do vento, mas também os processos advectivos de calor sensível e umidade. A avaliação das simulações contemplará os dados disponíveis das estações automáticas de superfície utilizados nesta Dissertação.

6.1. Análise de Agrupamento

A seguir são apresentados os resultados da Análise de Agrupamento, realizada a partir de dados de 11 estações automáticas de superfície espalhadas pelos estados de Alagoas e Sergipe. Os resultados da Análise de Agrupamento estão organizados em dendogramas e mapas de similaridade, referentes aos seguintes dados: velocidade do vento em 10 m (V); componente zonal da velocidade do vento em 10 m (V_x) e componente meridional da velocidade do vento em 10 m (V_y). Os dendogramas e mapas de similaridade foram construídos a partir das ligações Completa, Média e Ward, considerando a distância Euclidiana entre os dados. Preliminarmente, destaca-se que os dendogramas de V e V_x (componente zonal) apresentam comportamento parecido, ratificando o protagonismo do vento zonal pelos (alísios e SBM) na composição de V e indicando sua importância nas análises do potencial eólico da região. Por sua vez, as variações observadas nos dendogramas da componente meridional V_y indicam a atuação de forçantes locais, como o relevo, e variações sazonais, como a passagem de frentes frias que conseguem atingir o sul do NEB.

6.1.1 Velocidade do Vento a 10m (V)

- Ligação “Completa”

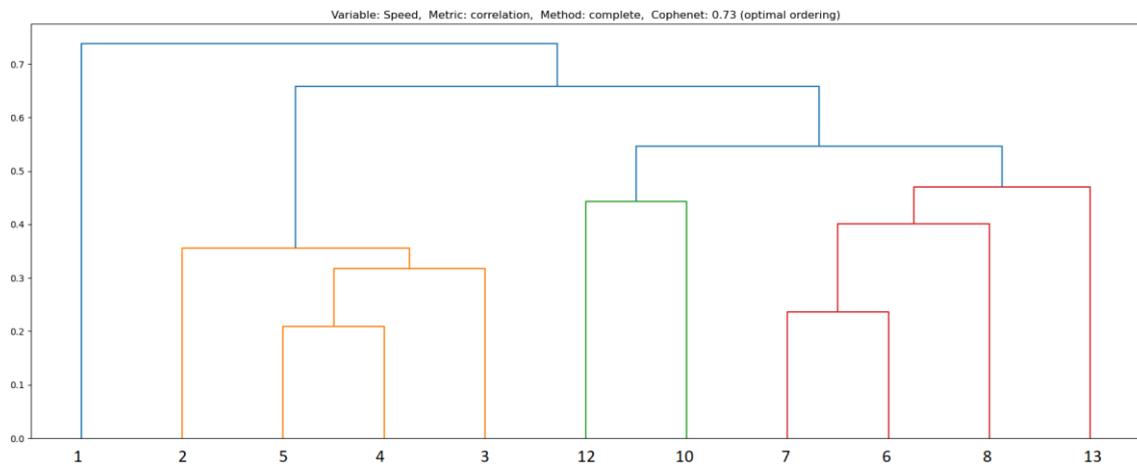


Figura 6.1: Dendrograma da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação completa.

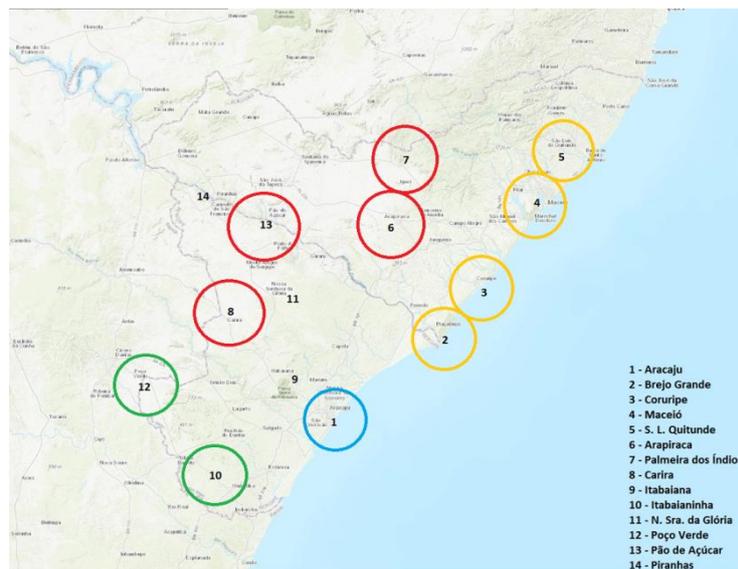


Figura 6.2: Mapa de Similaridade da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Completa.

- Ligação “Média”

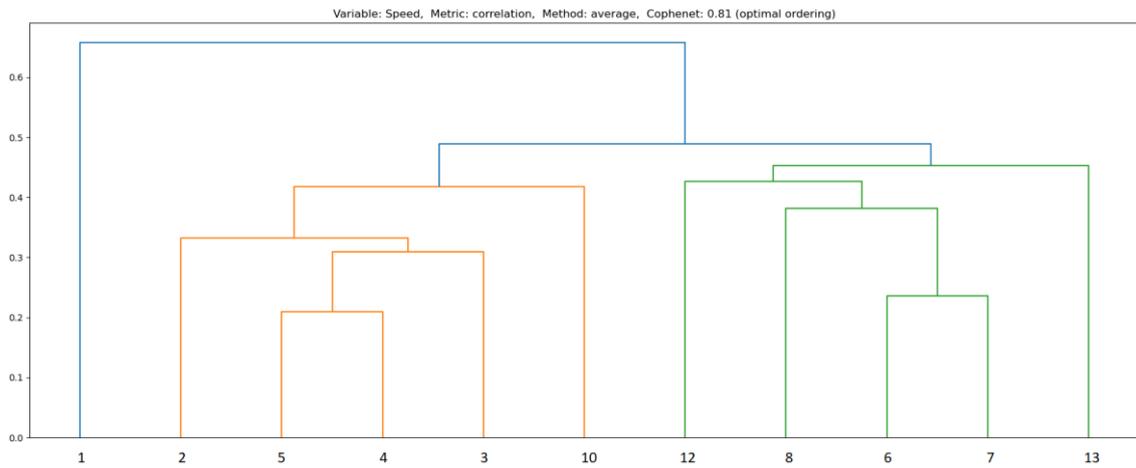


Figura 6.3: Dendrograma da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Média.

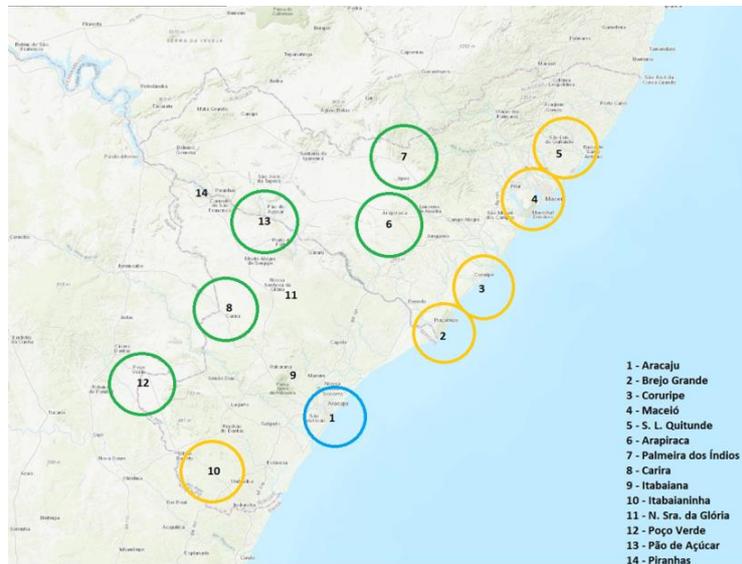


Figura 6.4: Mapa de Similaridade da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Média.

- Ligação “Ward”

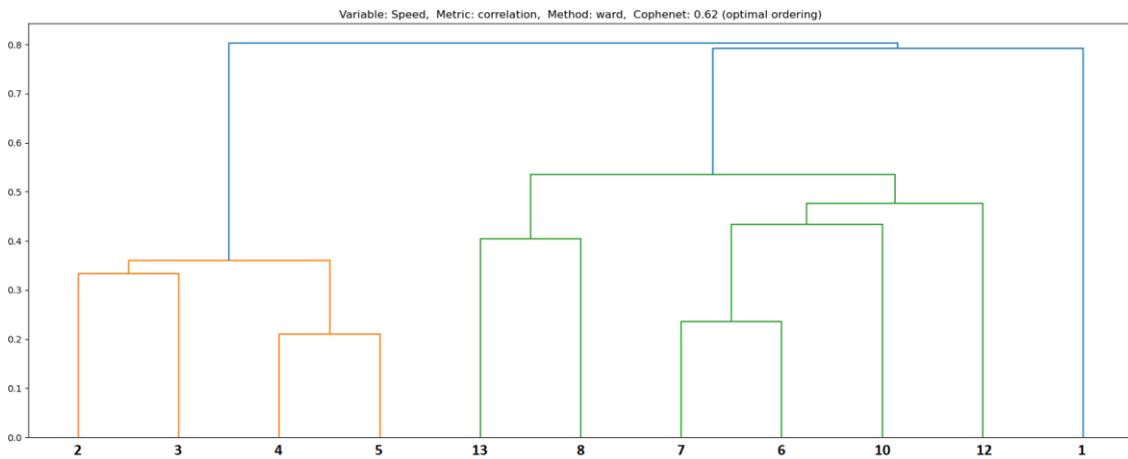


Figura 6.5: Dendrograma da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Ward.

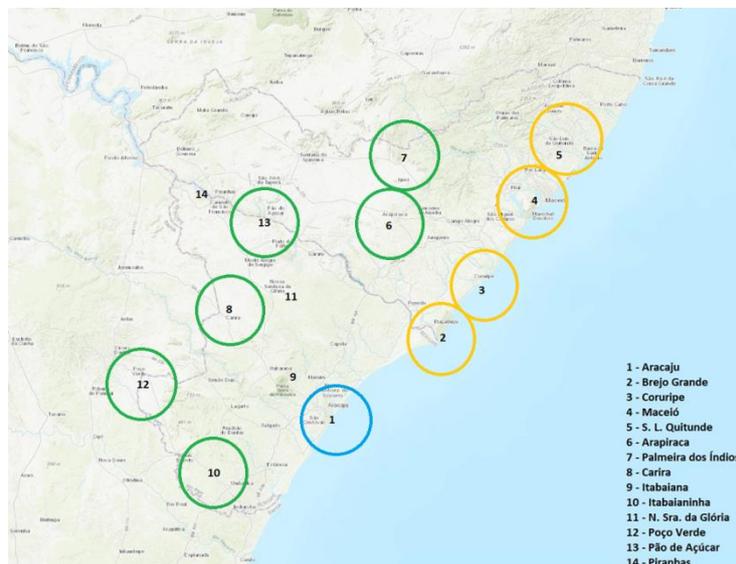


Figura 6.6: Mapa de Similaridade da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Ward.

Os resultados da Análise de Agrupamento dos dados de velocidade do vento a 10m (V) indicam, inicialmente, um grupo com as estações do litoral: Brejo Grande (2), localizada próxima a foz do Rio São Francisco, divisa entre os Estados de Alagoas e Sergipe, Coruripe (3), Maceió (4) e S.L. do Quitunde (5), agrupando as estações do Estado de Alagoas localizadas na área costeira, indicando a atuação da composição “alísios+SBM” de uma forma homogênea sobre o litoral da região. Dentre as três métricas de ligação utilizadas, a ligação Média (figura 6.2) agrupa ao litoral a estação Itabaianinha (10), enquanto que a ligação Completa (figura 6.4) e Ward (figura 6.6) agrupam esta

estação às estações do interior. Próximo a esse grupo, temos o grupo em azul, composto apenas pela estação Aracaju (1), localizada no litoral do Estado de Sergipe. Ressalta-se que esta estação se aproxima do grupo amarelo (litoral do Estado de Alagoas), no entanto localiza-se a sul destas estações. Considerando que as três métricas de ligação separam a estação Aracaju das demais estações litorâneas, é possível que esta dissimilaridade esteja relacionada a sua posição mais a sul do Estado de Sergipe, onde observa-se uma reduzida influência dos alísios, permitindo a formação de uma brisa continental durante a madrugada, e uma influência sazonal de ventos de sul oriundos de frentes frias que conseguem alcançar o sul do NEB.

Na sequência, as métricas de ligação aplicadas formam um grupo com as estações Arapiraca (6) e Palmeira dos Índios (7), localizadas no interior do Estado de Alagoas, e as estações Carira (8) e Pão de Açúcar (13), localizadas no interior do Estado de Sergipe, indicando a influência dos ventos da composição “alísios+SBM” ao longo da extensão destes Estados e uma redução homogênea de sua intensidade. Por fim, a ligação Completa forma um grupo com as estações Itabaianinha (10) e Poço Verde (12), agrupando as estações localizadas no interior da porção sul do Estado de Sergipe. Por outro lado, a ligação Média agrupa Poço Verde com as outras estações do interior e mantém Itabaianinha com as estações do litoral, enquanto que a ligação Ward agrupa Itabaianinha e Poço Verde com as estações do interior. Acerca disto, é importante lembrar que a estação Poço Verde se localiza próximo à divisa com o estado da Bahia, no entanto a ausência de relevo significativo não atenua a influência da circulação da brisa marítima.

6.1.2 Componente Zonal do Vento em 10m (V_x)

- Ligação “Completa”

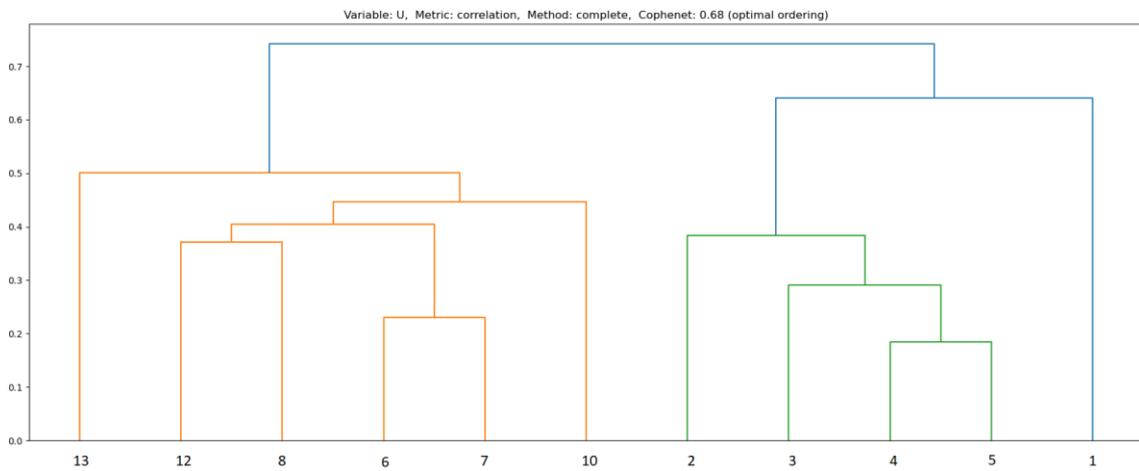


Figura 6.7: Dendrograma da componente zonal da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Completa.

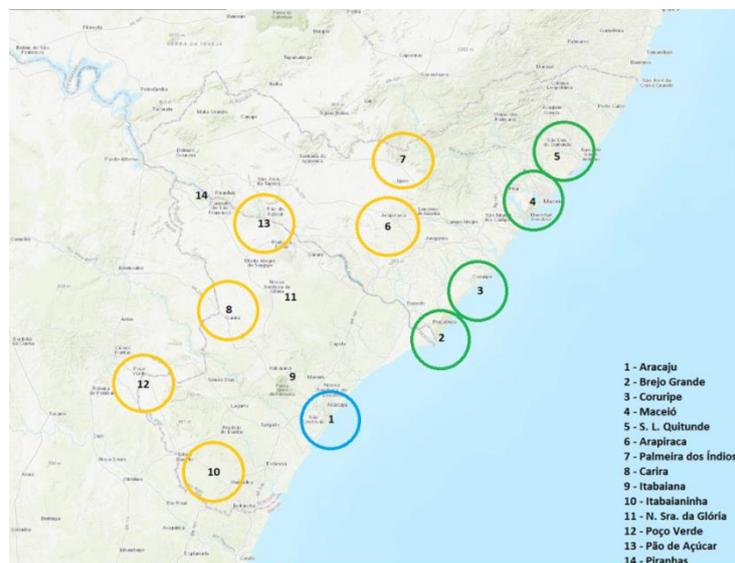


Figura 6.8: Mapa de Similaridade da componente zonal da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Completa.

- Ligação “Média”

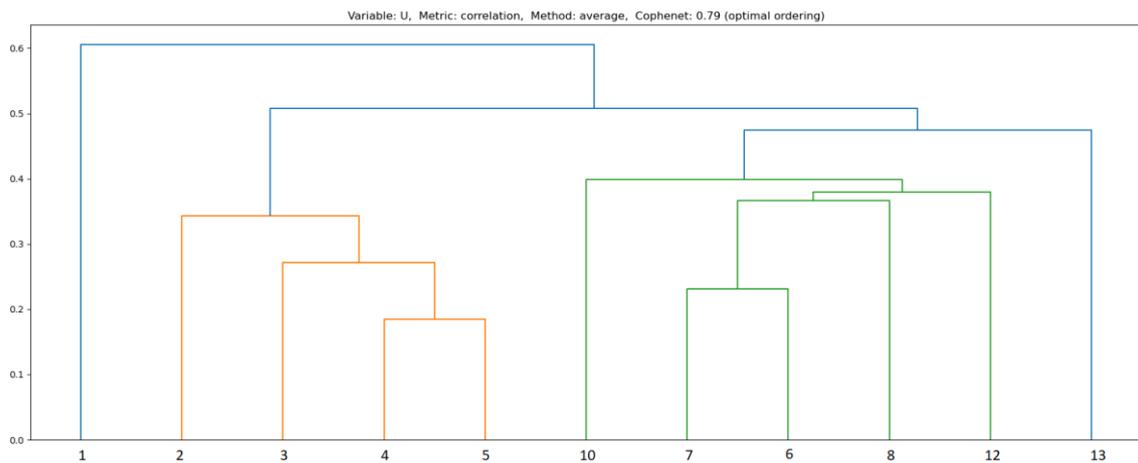


Figura 6.9: Dendrograma da componente zonal da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Média.



Figura 6.10: Mapa de Similaridade da componente zonal da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Média.

- Ligação “Ward”

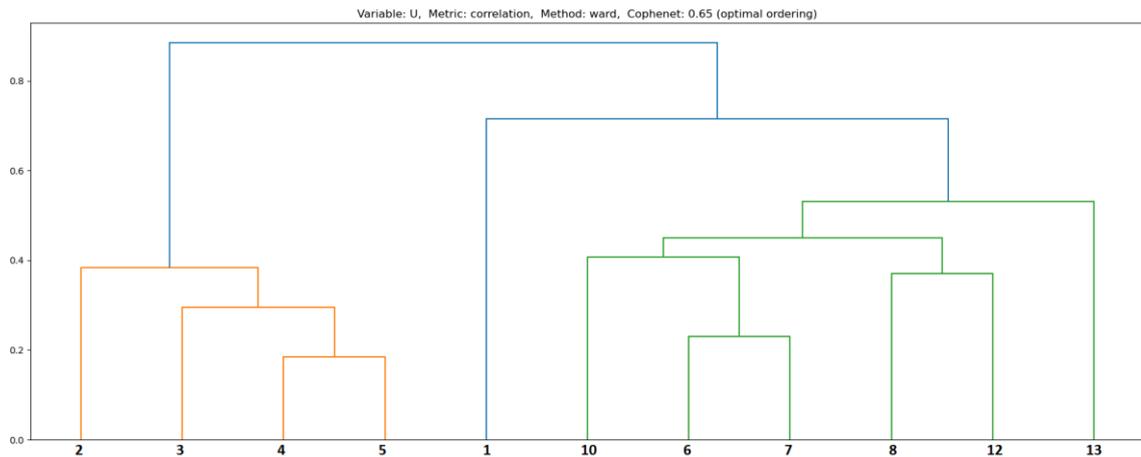


Figura 6.11: Dendrograma da componente zonal da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Ward.

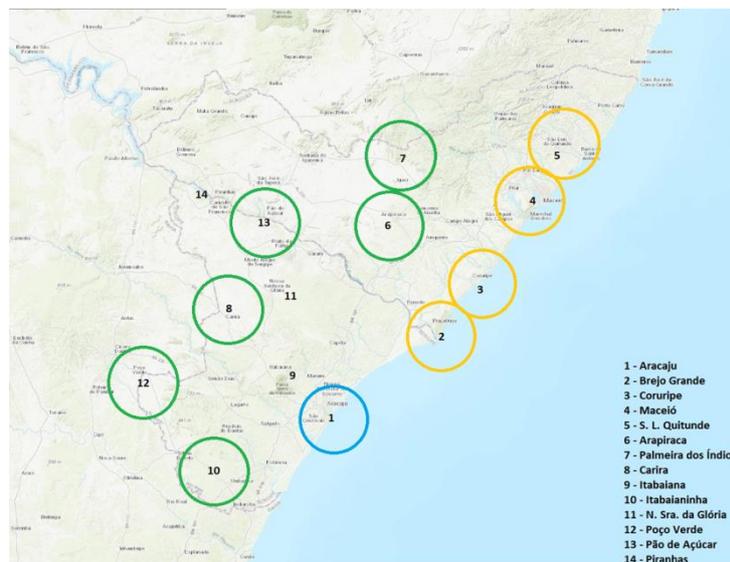


Figura 6.12: Mapa de Similaridade da componente zonal da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Ward.

Os resultados da Análise de Agrupamento dos dados da componente zonal do vento em 10m (V_x) indicam, novamente, um grupo com as estações do litoral: Brejo Grande (2), Coruripe (3), Maceió (4) e S.L. do Quitunde (5), reforçando o indicativo de atuação da composição “alísios+SBM” de uma forma homogênea sobre o litoral da região, semelhante aos resultados do campo velocidade do vento. Em seguida, observa-se novamente um grupo unitário com a estação Aracaju (1), localizada no litoral do Estado de Sergipe. Destaca-se que os dendogramas das três métricas de ligação indicam uma

maior similaridade desta estação com o grupo supracitado (litoral do Estado de Alagoas), no entanto não é o suficiente para realizar o agrupamento.

Na sequência, as ligações Completa (figura 6.8) e Ward (figura 6.12) forma um grande grupo com as estações Arapiraca (6) e Palmeira dos Índios (7) (interior do Estado de Alagoas), Carira (8), Itabaianinha (10), Poço Verde (12) e Pão de Açúcar (13). Considerando que todas se localizam afastadas do litoral, ratifica-se a hipótese de uma leve e homogênea redução da intensidade da composição “alísios+SBM” à medida que se afasta do litoral, devido à ausência de relevo significativo entre esta região e o litoral. A ligação Média (figura 6.10), por sua vez, forma um grupo parecido, no entanto exclui a estação Pão de Açúcar, formando um grupo unitário com ela. De fato, esta estação se localiza próxima ao Alto São Francisco, região de planalto onde se localiza o Complexo Hidrelétrico de Paulo Afonso e que compõe a divisa entre os estados de Alagoas, Bahia e Sergipe, sendo mais afastada do litoral do que as outras e com altitude superior às demais, contribuindo assim para esta dissimilaridade.

6.1.3 Componente Meridional do Vento em 10m (Vy)

- Ligação “Completa”

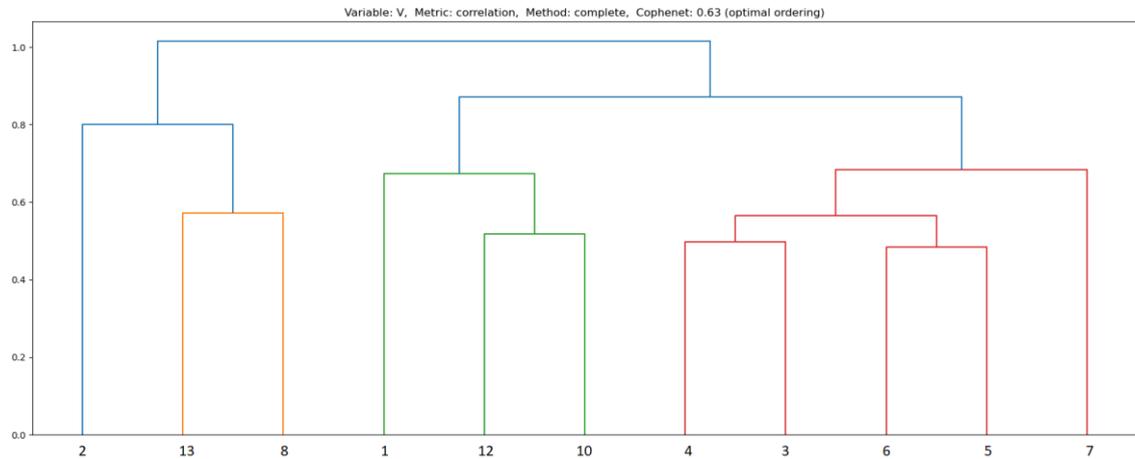


Figura 6.13: Dendrograma da componente meridional da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Completa.

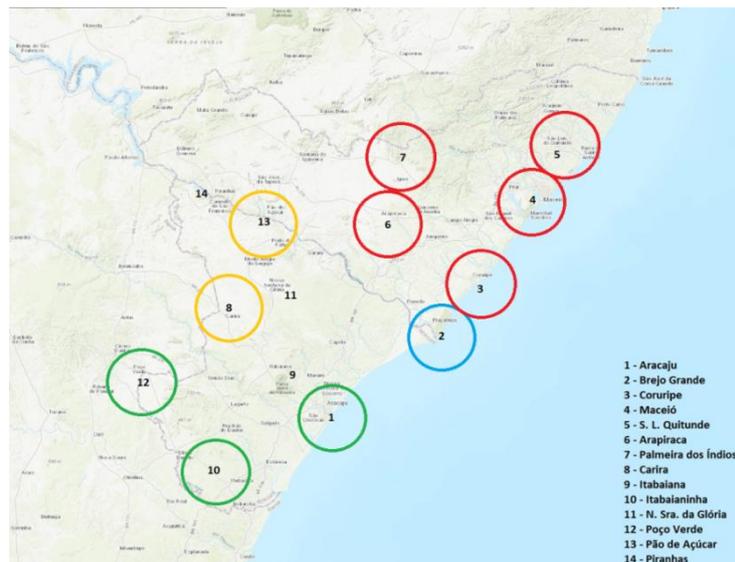


Figura 6.14: Mapa de Similaridade da componente meridional da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Completa.

- Ligação “Média”

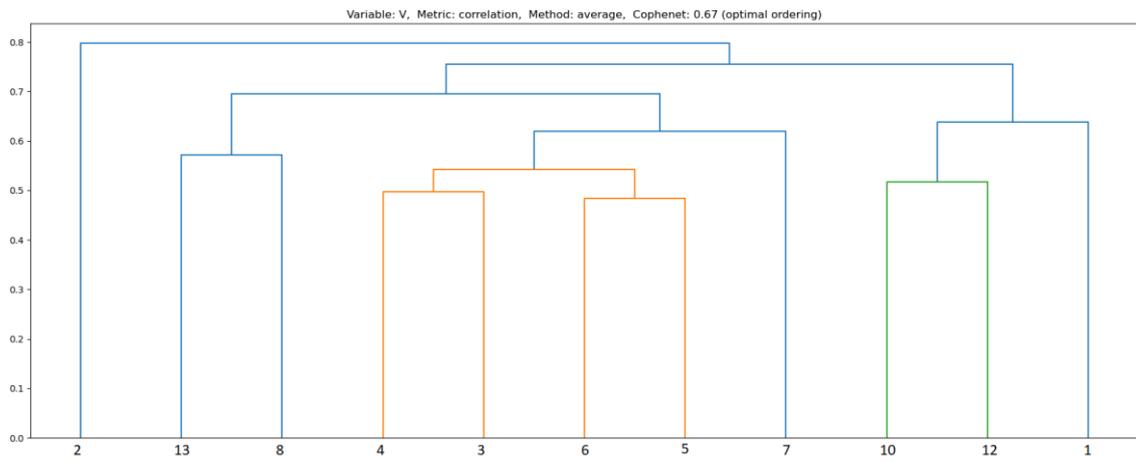


Figura 6.15: Dendrograma da componente meridional da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Média.

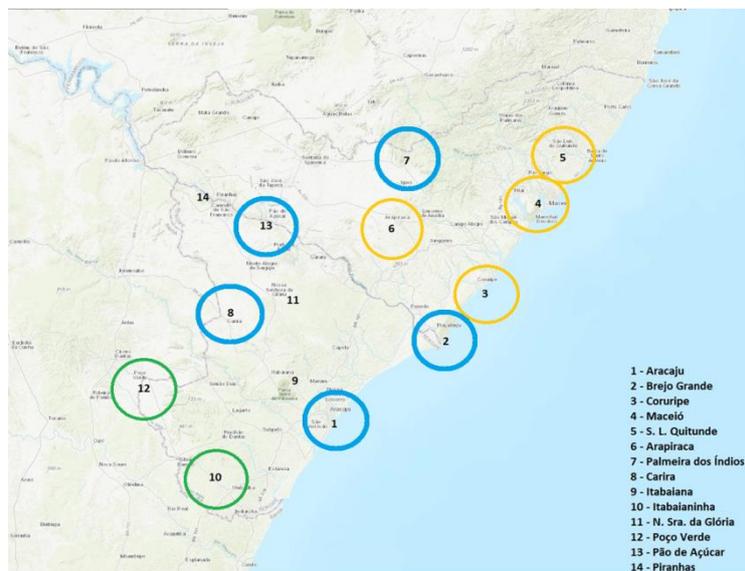


Figura 6.16: Mapa de Similaridade da componente meridional da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Média.

- Ligação “Ward”

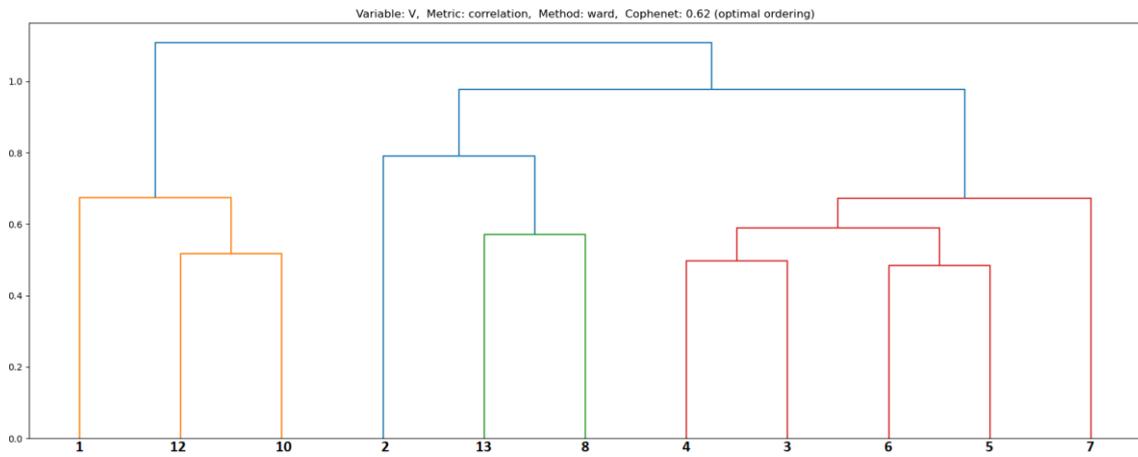


Figura 6.17: Dendrograma da componente meridional da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Ward.

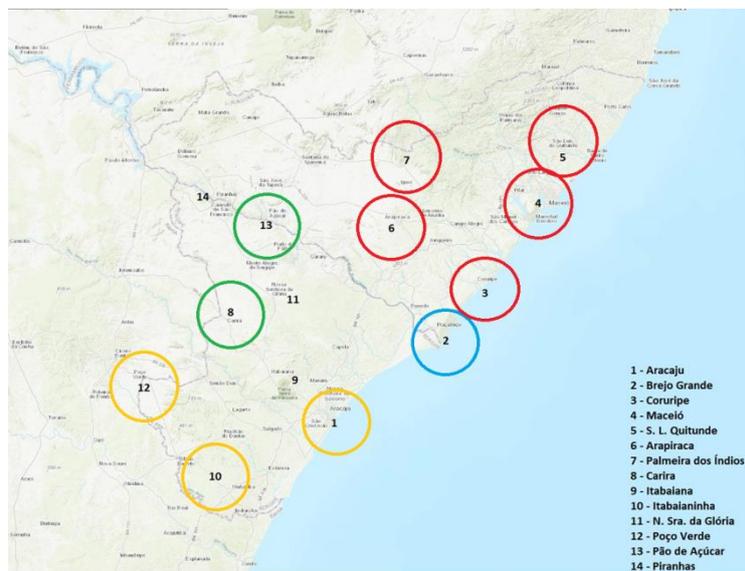


Figura 6.18: Mapa de Similaridade da componente meridional da velocidade do vento em 10 m segundo a ligação Ward.

Os resultados da Análise de Agrupamento dos dados da componente meridional do vento em 10m (V_y) mostram que as métricas de ligação aplicadas formam, inicialmente, um grupo com as estações do Estado de Alagoas: Coruripe (3), Maceió (4), S.L. do Quitunde (5), Arapiraca (6) e Palmeira dos Índios (7). Todavia, a ligação Média (figura 6.16) exclui deste grupo a estação Palmeira dos Índios (7). Uma possível explicação é a presença de uma circulação de brisa de vale-montanha induzida pela proximidade com o Planalto da Borborema, como observado anteriormente nesta região nos Resultados da Qualificação e por (RAMOS et al., 2013).

Em seguida, as ligações Completa (figura 6.14) e Ward (figura 6.18) formam um grupo com as estações Aracaju (1), Itabianinha (10) e Poço Verde (12), agrupando as estações localizadas na porção sul do Estado de Sergipe, indicando uma possível influência do enfraquecimento dos alísios e a presença de ventos de sul característicos da passagem de sistemas frontais. A ligação Média (figura 6.16), por sua vez, forma um grupo parecido, excluindo a estação Aracaju (1). Na sequência, as três ligações agrupam as estações Carira (8) e Pão de Açúcar (13), estações localizadas no interior do Estado de Sergipe, mais afastadas do oceano e da influência da composição “alísios+SBM”, além de formar um grupo unitário com a estação Brejo Grande (2), localizada na foz do Rio São Francisco, divisa entre os Estados de Alagoas e Sergipe e o oceano.

Em suma, observou-se através dos resultados desta análise multivariada que V e sua componente zonal V_x se agrupam de forma mais similar do que V e sua componente meridional V_y , indicando o protagonismo da componente zonal (“alísios+SBM”) na composição do vento da região. De fato, V_y parece ser mais sensível a elementos locais como o relevo e a passagem de sistemas transientes, enquanto que V_x reflete o vento dominante da região, resultante de uma sobreposição entre o SBM e os alísios/componente norte da ASAS.

As Análises de Agrupamento das estações localizadas nos Estados de Alagoas e Sergipe possibilitou a identificação de regiões homogêneas quanto à intensidade do vento e confirmou-se a importância da atuação acoplada dos alísios e do SBM na composição do vento nesta região.

6.2 Análise do Regime de Vento: litoral (Aracaju) e interior (Carira) de Sergipe

O próximo passo foi realizar uma análise aprofundada dos dados das estações Aracaju (cluster unitário no litoral de Sergipe) e Carira (cluster do interior de Sergipe), tendo em vista detectar o ciclo diário do SBM e a aplicação destes resultados no estudo de caso sobre a viabilidade econômica da aplicação de energia eólica de pequeno porte como subsídio para irrigação.

A tabela 6.1 e as figuras 6.19 e 6.20, respectivamente, apresentam as médias mensais de precipitação e velocidade do vento em 10 m das estações Aracaju (2003-2021) e Carira (2009-2020). A partir dos resultados apresentados abaixo, observa-se que as médias mensais da velocidade do vento apresentam menor variabilidade no primeiro semestre (janeiro a junho), indicando a penetração da composição “alísios+SBM” ao longo do interior do Estado de Sergipe. Entre julho e dezembro, observa-se que essa variabilidade aumenta, de forma que Aracaju apresenta valores superiores a Carira, indicando uma alteração no comportamento do vento. Essa alteração no comportamento será explorada na sequência. Outra importante observação é a clara alternância entre a estação seca da região, com menores valores pluviométricos e ventos mais intensos, e a estação chuvosa, com maiores valores pluviométricos e ventos menos intensos.

Tabela 6.1: Médias mensais da velocidade do vento em 10 m das estações Aracaju (2003-2021) e Carira (2009-2020).

Mês	Velocidade do Vento Média (m/s)	
	Aracaju (2003-2021)	Carira (2009-2020)
Janeiro	3,5	3,5
Fevereiro	3,3	3,4
Março	3,1	3,0
Abril	2,5	2,6
Mai	2,1	2,1
Junho	2,1	2,1
Julho	2,3	1,9
Agosto	2,4	2,0
Setembro	3,1	2,5
Outubro	3,7	3,0
Novembro	4,1	3,7
Dezembro	3,9	3,6

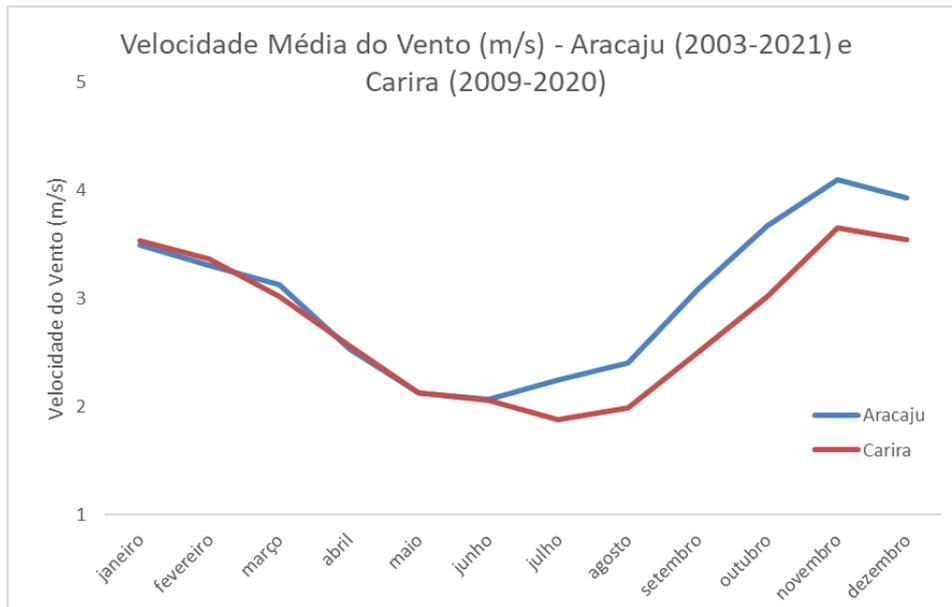


Figura 6.19: Médias mensais da velocidade do vento em 10 m das estações Aracaju (2003-2021) e Carira (2009-2020).

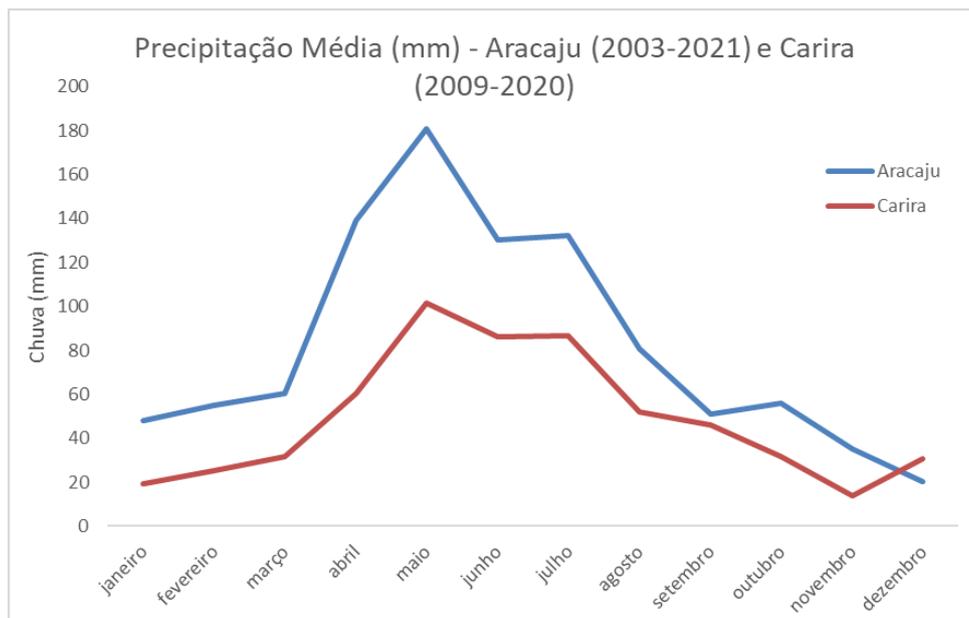


Figura 6.20: Médias mensais de precipitação das estações Aracaju (2003-2021) e Carira (2009-2020).

A seguir são apresentadas as rosas-dos-ventos construídas a partir da distribuição de frequência de dados horários de direção e intensidade do vento em 10 m das estações Aracaju (2003-2021) e Carira (2009-2020). As cores das barras representam a intensidade do vento e a posição das barras representa a direção do vento. Além disso, o tamanho das barras reflete a quantidade em percentual de registros de vento em determinada direção. Os resultados indicam o predomínio de ventos de direção leste-sudeste em Carira ao longo do ano, enquanto que em Aracaju observa-se uma maior variação na direção do vento, com predomínio de ventos de leste entre outubro e abril e ventos variando entre leste e sul entre maio e setembro. Uma importante conclusão destes resultados é a identificação de ventos de sul no período entre maio e setembro: apesar de não corresponderem ao vento dominante da região, é um indicativo de atuação de instabilidades associadas às frentes frias que alcançam o sul do NEB nesta época do ano, contribuindo para a estação chuvosa da região.

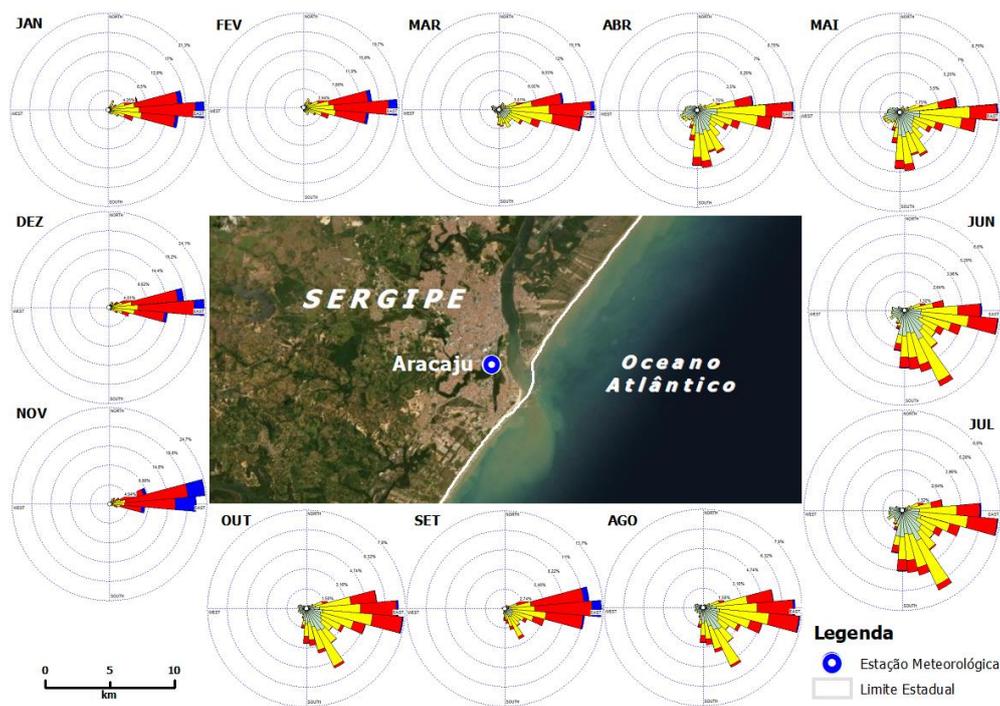


Figura 6.21: Distribuição de frequência do vento em 10 m na estação Aracaju entre 2003 e 2021.

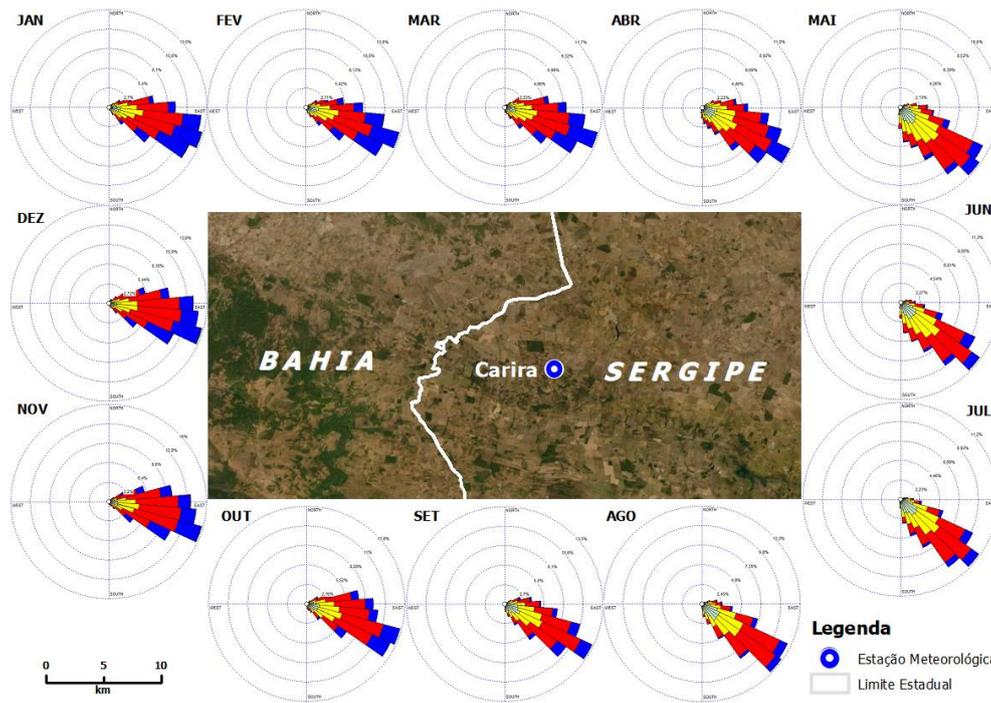


Figura 6.22: Distribuição de frequência do vento em 10 m na estação Carira entre 2009 e 2020.

6.2.1 Período Diurno

O detalhamento da atuação da circulação da brisa marítima foi feito com a divisão dos dados observados de acordo com o ciclo diário. A seguir serão apresentadas as médias mensais da velocidade do vento das estações Aracaju (2003-2021) e Carira (2009-2020) para os horários entre 06h-18 e entre 18h-06h. A partir da análise baseada no ciclo diário, observa-se em primeiro lugar a intensificação do vento no período entre 06h-18h (figura 6.23), como esperado por conta da dinâmica da circulação do SBM. A variabilidade das velocidades do vento entre 06h e 18h é semelhante ao ciclo diário completo, indicando a contribuição mais expressiva do SBM na composição “alísios+SBM” durante este período do dia. Destaca-se que nos meses entre janeiro e setembro, Carira apresenta médias de velocidade do vento superiores as médias de Aracaju, apesar de estar mais no interior do continente. Uma possível explicação é a canalização do vento por conta da elevação da superfície, visto que Aracaju se encontra no nível do mar e Carira se localiza a 350 m. Por outro lado, entre outubro e dezembro, as médias de velocidade em Aracaju conseguem se aproximar das médias de Carira. Considerando que este é o trimestre com maiores velocidades do vento para ambas estações, uma possível explicação é a formação de um gradiente térmico maior entre o litoral e o oceano decorrente da ausência de

nebulosidade provocado pela estação seca (FRANCHITO et al., 1998; MILLER et al., 2003; DUBREUIL et al., 2004), como verificado na figura 6.20.

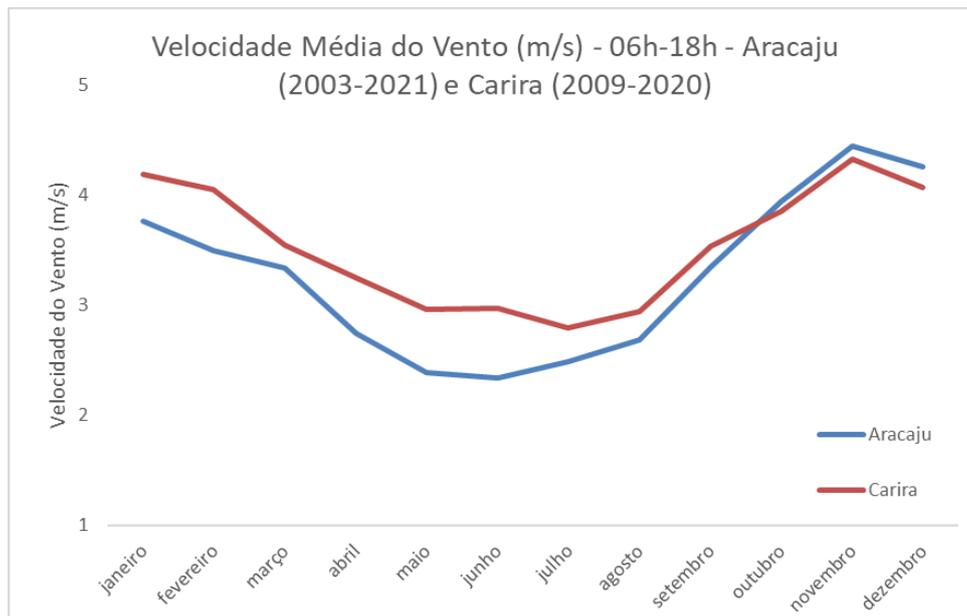


Figura 6.23: Médias mensais da velocidade do vento em 10 m das estações Aracaju (2003-2021) e Carira (2009-2020) para os horários entre 06h-18h.

Para aprofundar a análise da penetração da composição “alísios+SBM” no cluster de Carira, os dados foram separados em períodos de acordo com o ciclo diário. Estes horários foram selecionados pois são representativos do ciclo diário do SBM, permitindo examinar sua influência na composição “alísios+SBM”. Entre 10h e 18h (figura 6.24), período mais intenso do SBM, observa-se predomínio de ventos de direção sudeste e intensidade acima de 3 m/s ao longo do ano, principalmente entre os meses de setembro a março, que compreendem a estação seca da região. Este resultado é importante pois possibilita o aproveitamento deste potencial eólico para aplicações de pequena escala, que é o escopo deste trabalho, como a operação diária de um aerogerador durante períodos do dia visando o fornecimento de energia para irrigação de propriedades de AF.

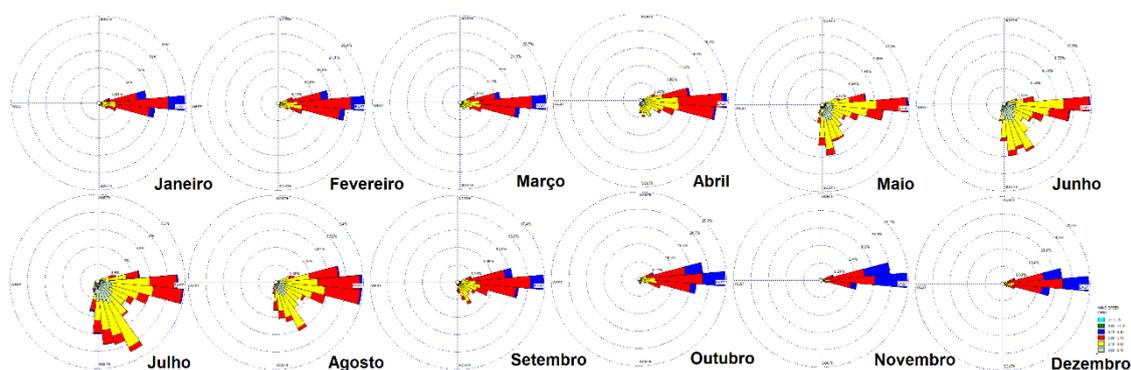


Figura 6.24: Distribuição de frequência do vento em 10 m na estação Aracaju entre 2003 e 2021 nos horários de 10h-18h local.

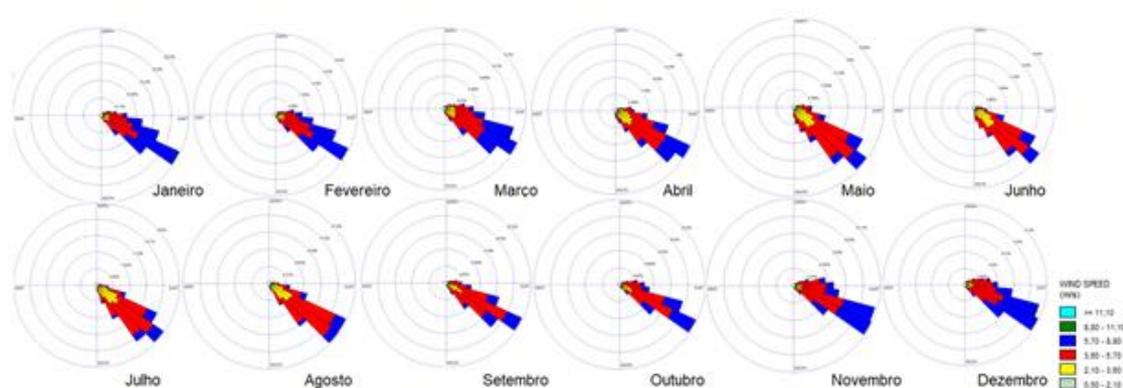


Figura 6.25: Distribuição de frequência do vento em 10 m na estação Carira entre 2009 e 2020 nos horários de 10h-18h local.

6.2.2 Período Noturno

Posteriormente, são apresentados os resultados para o período entre 18h e 06h (figura 6.26), indicando que as médias de velocidade do vento em 10 m em Aracaju durante o período noturno são superiores do que os valores de Carira em todos os meses do ano. Novamente é apresentado um forte indício que este enfraquecimento do vento noturno em Carira é resultado do natural enfraquecimento do SBM e de como o SBM é influente na composição “alísios+SBM”, apontando também para o papel de agente climatológico desempenhado pelo SBM na região, considerando a substancial redução na intensidade média do vento neste período. Analisando-se mês a mês, observam-se menores valores no trimestre de maio a julho, período chuvoso da região, no qual o gradiente térmico entre litoral e oceano é reduzido (FRANCHITO et al., 1998; MILLER et al., 2003; DUBREUIL et al., 2004), contribuindo para estes valores menores em comparação à estação seca, onde observam-se ventos mais intensos.

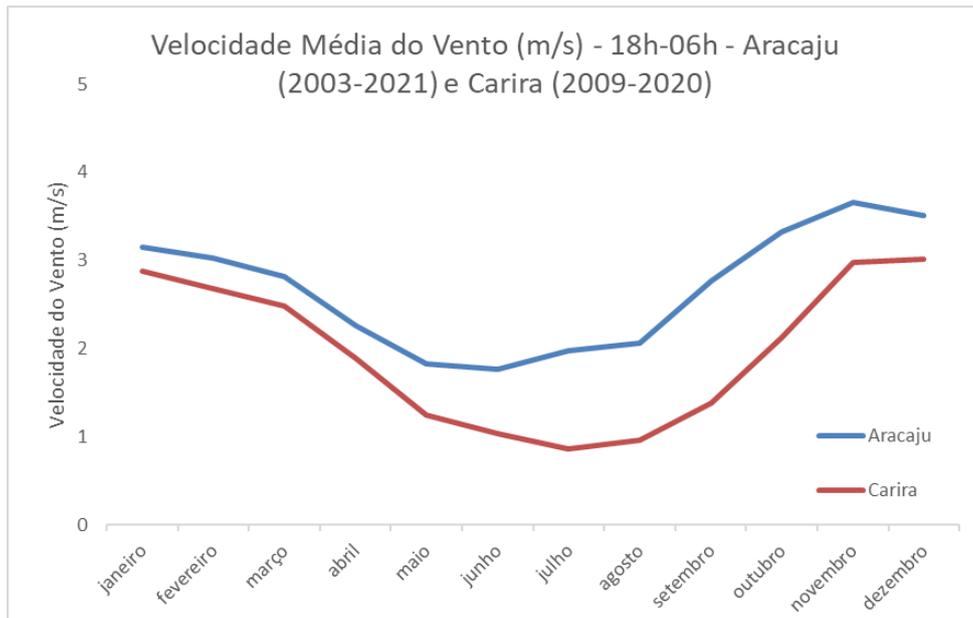


Figura 6.26: Médias mensais da velocidade do vento em 10 m das estações Aracaju (2003-2021) e Carira (2009-2020) para os horários entre 18h-06h.

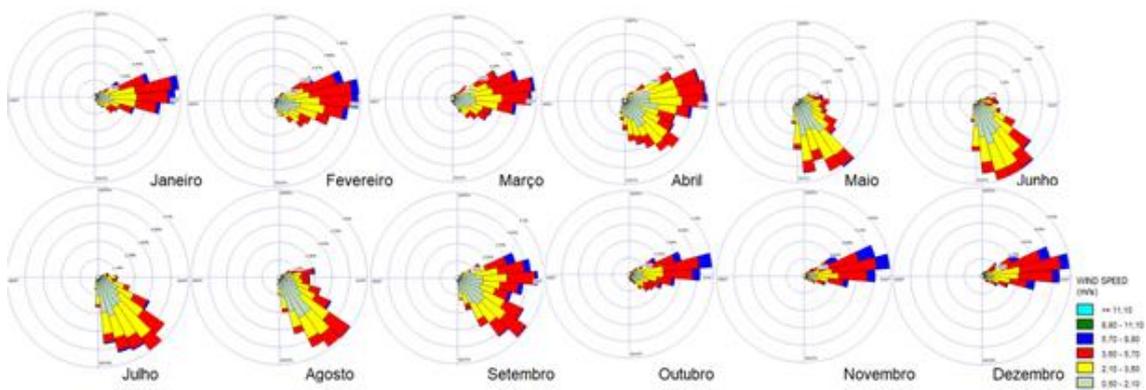


Figura 6.27: Distribuição de frequência do vento em 10 m na estação Carira entre 2009 e 2020 nos horários de 03h-09h local.

Para reforçar a análise da intensidade dos ventos em 10 m na região de interesse, elaborou-se uma tabela com os valores do percentual de calmaria (tabela 6.2), ou seja, a porcentagem de dados inferiores a 0,5 m/s. Esta informação é importante na tomada de decisões sobre potencial eólico e, neste caso, na escolha do horário de operação de uma torre eólica de pequeno porte.

Tabela 6.2: Taxas mensais de calmaria das estações Aracaju (2003-2021) e Carira (2009-2020).

Mês	Taxa de Calmaria (%)	
	Aracaju (2003-2021)	Carira (2009-2020)
Janeiro	1,1	12,9
Fevereiro	1,2	15,6
Março	1,5	20,0
Abril	2,2	25,4
Mai	4,2	32,2
Junho	3,3	33,1
Julho	2,2	38,1
Agosto	1,5	35,0
Setembro	0,9	26,1
Outubro	0,5	20,9
Novembro	0,4	14,6
Dezembro	0,4	16,3

Observa-se que a estação Aracaju apresenta taxas de calmaria abaixo de 5% ao longo do ano, enquanto que Carira apenas apresenta taxas acima de 15%, principalmente no trimestre entre maio e julho. A primeira conclusão é a clara indicação de um período com maior calmaria nas duas estações analisadas (estação chuvosa), sendo mais notável em Carira, e a indicação de menor taxa de ventos abaixo de 0,5 m/s no período seco da região. Estes resultados indicam que a região do cluster de Carira não se mostra adequada para operação de parques eólicos de grande porte. No entanto, a operação de aerogeradores de pequeno porte, combinada a outras fontes renováveis, como geração solar ou biomassa, mostra-se favorável. Ademais, considerando a legislação atual, seria possível também a comercialização do excedente de energia produzido durante as horas de operação do aerogerador nos meses da estação seca, em troca de acesso à energia em épocas do ano com ventos menos intensos (estação chuvosa).

6.3. Estudo de Caso: Viabilidade da Geração de Energia Eólica de Pequeno Porte para o Plantio de Milho no Sertão de Sergipe

A terceira parte dos Resultados desta dissertação apresenta um estudo de caso sobre a aplicação de geração eólica de pequeno porte na irrigação em uma propriedade de Agricultura Familiar. Definiu-se o plantio de milho como objeto de estudo, a partir dos dados obtidos pelo SIG, informações de EMDAGRO (2018) e MENEZES et al. (2019), sobre a distribuição das lavouras de milho no Sertão de Sergipe cultivados por agricultores familiares, e de EMBRAPA (2006) e OSTI et al. (2018), sobre as

características da cultura do milho, como ciclo de desenvolvimento e quantidade de água necessária para irrigação.

A figura 6.28 reúne informações geográficas do estado de Sergipe, como o uso e ocupação da terra, com destaque para as áreas de pastagem com manejo, perímetros irrigados, vegetação campestre e áreas agrícolas, bem como assentamentos rurais, territórios indígenas e unidades de conservação. De acordo com o escopo deste trabalho, foram destacadas as regiões com produção de grãos (arroz, feijão e milho), frutas (abacaxi, coco-da-baía e laranja) além de derivados do leite, representando o mosaico da produção agrícola no estado, como citado por (EMDAGRO, 2018), Menezes et al. (2019) e Oliveira Vasconcelos (2013).

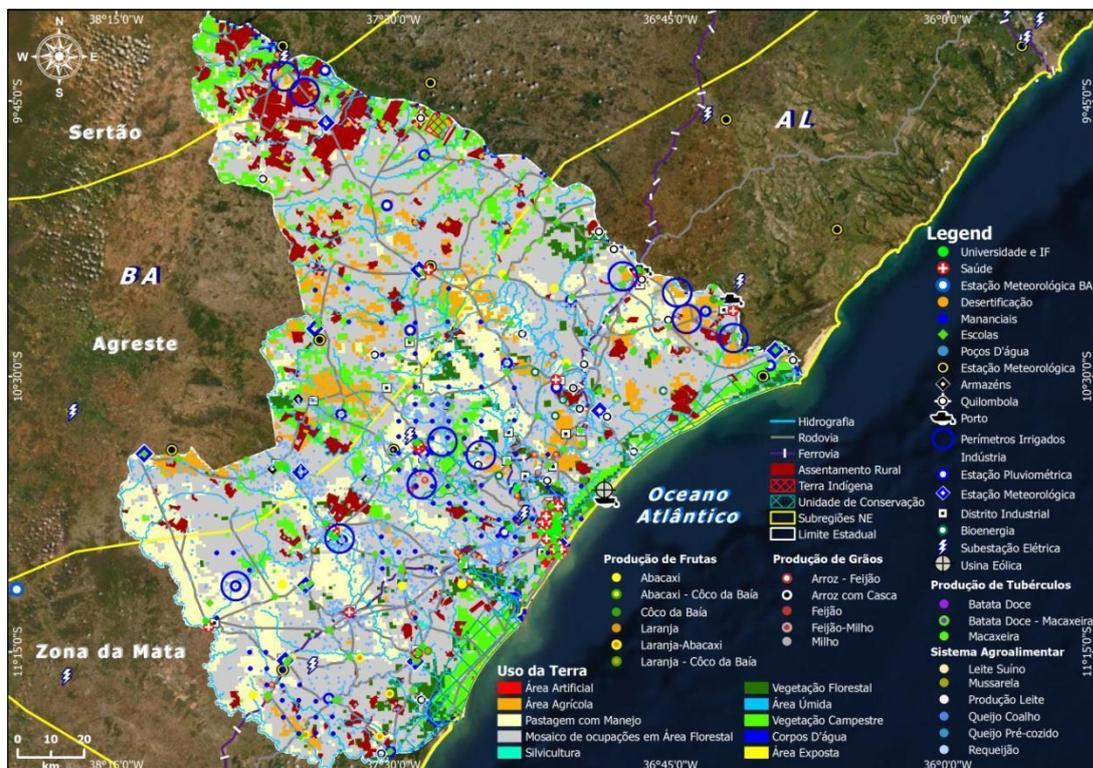


Figura 6.28: Configuração espacial da produção agrícola do estado de Sergipe.

Seguindo a metodologia recomendada pela literatura, foi proposto no estudo de caso a utilização de um aerogerador de 6kW (BARCELLOS, 2014; SCHINCARIOL NETTO, 2017) para geração de energia para irrigação de milho, de acordo com o modelo de bomba de irrigação utilizado por FEITOSA et al. (2014b) e a quantidade de água necessária estimada por EMBRAPA (2006) e OSTI et al. (2018). Para avaliar a viabilidade econômica do investimento neste aerogerador, será calculado o tempo de *payback* simples, sendo considerados dois valores de bandeira tarifária para atividades

rurais fornecidos pela concessionária Energisa (ENERGISA, 2022) de acordo com as proposições da REN 1000 (ANEEL, 2021): para o consumidor do tipo “irrigante noturno”, no valor de R\$ 0,16390 kWh, e para o consumidor do tipo “não irrigante noturno”, no valor de R\$ 0,60707 kWh.

Tabela 6.3: Resumo das informações técnicas do estudo de caso.

Resumo das Informações Técnicas
Aerogerador Verne 555, potência nominal de 6kW
Horário de Operação do Aerogerador: entre 09h e 21h local
Bomba de Irrigação (Feitosa et al. 2014b): 3 horas de operação por dia (1,8kWh/dia)
Cultura do Milho (EMBRAPA, 2006; OSTI et al. 2018): 50.000 litros de água por dia por hectare

Neste estudo de caso, será proposto que a utilização do aerogerador esteja restrita aos horários de maior intensidade do vento, logo somente serão utilizados os dados entre 09h e 21h local. A figura 6.29 apresenta a distribuição de Weibull dos dados de velocidade do vento em 10m de Carira entre 2009 e 2020, somente para os horários entre 09h até 21h local.

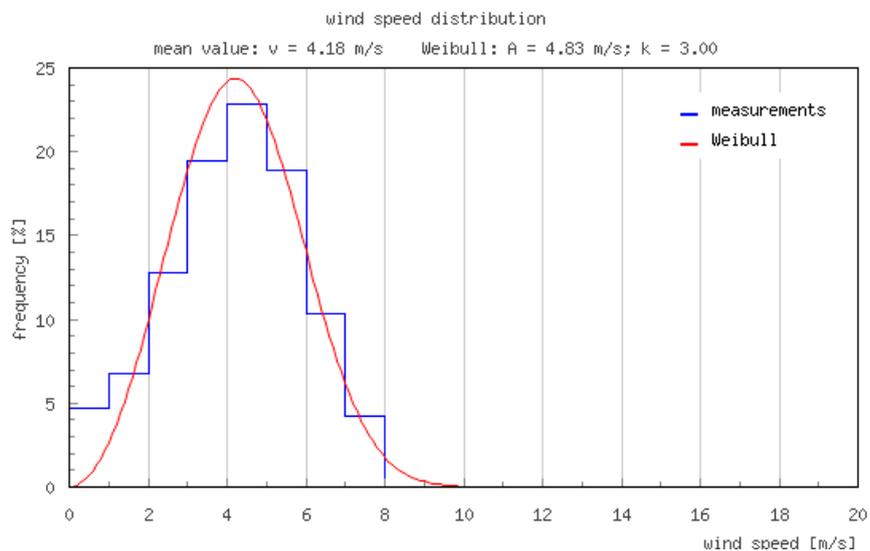


Figura 6.29: Distribuição de Weibull dos dados de velocidade do vento em 10m na estação Carira entre 2009 e 2020 (entre 09h e 21h local).

A partir da Distribuição de Weibull, foi possível determinar a distribuição de probabilidade dos dados de velocidade do vento em 10m na estação Carira entre 2009 e

2020 (entre 09h e 21h local) e realizar o cálculo da produção anual para cada intervalo de velocidades (tabela 6.4), indicando uma produção anual total de 4,63 MWh. É importante explicitar que esta produção refere-se aos ventos em 10 m e apenas ao período entre 09h e 21h local, considerando que não foi realizada extrapolação do vento para alturas superiores, como realizado por outros trabalhos, e que o aerogerador opere apenas durante o período do dia em que os ventos na região são mais intensos, com menores taxas de calmaria.

Tabela 6.4: Distribuição de probabilidade dos dados de velocidade do vento em 10m na estação Carira entre 2009 e 2020 (entre 09h e 21h local).

Verne 555			
Velocidade (m/s)	Dens. de Probabilidade (%)	Potência de Geração (kWh/mês)	Produção Anual (kWh)
1	4.7	0	
2	6.8	0	
3	12.7	250	191.1
4	19.4	400	466.0
5	22.8	810	1108.8
6	18.9	1280	1454.0
7	10.3	1500	928.4
8	4.2	1900	484.2
Produção Anual Total (Mwh)			4.63

A tabela 6.5 apresenta as informações utilizadas na análise financeira do projeto. O custo de aquisição do aerogerador é de R\$ 41.000,00 e sua vida útil é de 20 anos. Logo, o tempo de retorno do investimento precisa ser menor do que 20 anos para que este investimento seja rentável.

Tabela 6.5: Informações da Análise Financeira do Estudo de Caso

Análise Financeira	
Aquisição (Verne 555)	R\$ 41.000,00
Vida Útil (Verne 555)	20 anos
Consumo Anual Estimado	4630 kWh/ano
Tarifa Irrigante Noturno	R\$ 0,16390/kWh
Tarifa Não Irrigante Noturno	R\$ 0,60707/kWh

A bomba de irrigação utilizada por FEITOSA et al. (2014b), operando 3 horas por dia, demanda um consumo de 1,8kWh/dia, ou 0,6MWh/ano. O cultivo do milho necessita diariamente de 5 litros de água/m² durante, em média, 120 dias (EMBRAPA, 2006; OSTI et al., 2018). Desta forma, a produção eólica anual estimada de 4,63MWh/ano é suficiente para suprir as necessidades de irrigação de 7 ha de milho. Para o consumidor do tipo “não irrigante noturno”, com tarifa de R\$ 0,60707 kWh, o custo com energia para esta produção anual é de R\$ 2810,73. Assim, considerando o tempo de vida útil do aerogerador (20 anos) e seu custo (R\$ 41.000,00), o investimento é viável, com um tempo de *payback* de 15 anos (figura 6.30). No entanto, destaca-se que este tempo de retorno é muito próximo da vida útil, o que pode diminuir o interesse por esta alternativa.

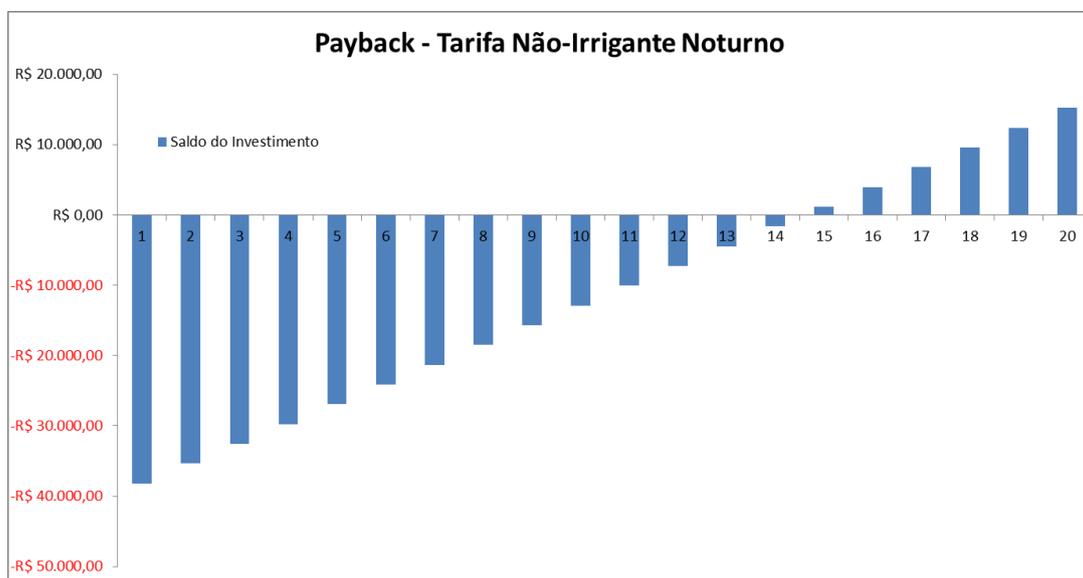


Figura 6.30: Tempo de *payback* do investimento proposto para um consumidor do tipo “não irrigante noturno”.

Para o consumidor do tipo “irrigante noturno”, com tarifa de R\$ 0,16390 kWh, o custo com energia para esta produção anual é de R\$ 783,86. Neste caso, o tempo de retorno excede a vida útil do aerogerador e a metodologia proposta não se mostra vantajosa financeiramente para produtores que dispõem do desconto de irrigante noturno.

6.4. Avaliação do Modelo de Mesoescala WRF para a Representação do Regime de Vento

Neste item serão apresentados os resultados das simulações complementares do WRF para os dias 1 e 2 de janeiro de 2022, geradas com as grades e parametrizações indicadas na Metodologia. Inicialmente, será apresentada uma breve descrição da configuração sinótica observada nestes dias. Posteriormente, serão apresentados os resultados das simulações dos campos: temperatura a 2 metros (sombreado) sobreposta ao vento a 10 metros (barbelas); e água precipitável (sombreado) sobreposta ao vento a 10 metros (barbelas). Por fim, será apresentada uma comparação entre os dados de temperatura a 2 metros e vento a 10 metros observados nas estações Maceió (-9,55°/-35,77°), Itabaianinha (-11,27°/-37,79°) e Piranhas (-9,62°/-37,77°) e os resultados das 3 grades de simulação (9 km, 3 km e 1 km) extraídos do respectivo ponto de grade, objetivando avaliar qualitativamente a habilidade do modelo em reproduzir estas variáveis meteorológicas.

6.4.1 Análise Sinótica

A análise das cartas de superfície (figura 6.31) elaboradas pela Marinha do Brasil (DHN, 2022), das cartas de altitude (figura 6.32) elaboradas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e das imagens do canal infravermelho realçado do satélite GOES-16 (figura 6.33), também disponibilizadas pelo CPTEC (CPTEC, 2022), indicam uma configuração sinótica típica de Zona de Convergência do Atlântico (ZCAS) nos dias 1 e 2 de janeiro de 2022, conforme descrito no item 3.3. Esta configuração é caracterizada pelo posicionamento de um anticiclone em altos níveis sobre a porção oeste da América do Sul (Alta da Bolívia) e de um Vórtice Ciclônico em Altos Níveis (VCAN) sobre o Oceano Atlântico Equatorial, próximo ao Nordeste do Brasil (figuras 6.32 e 6.33) e é reforçada pela passagem de uma frente fria pelo oceano, favorecendo a convergência de umidade e contribuindo, por exemplo, para acumulados significativos de chuva sobre os estados da Bahia e Minas Gerais ao longo do mês de dezembro de 2021.

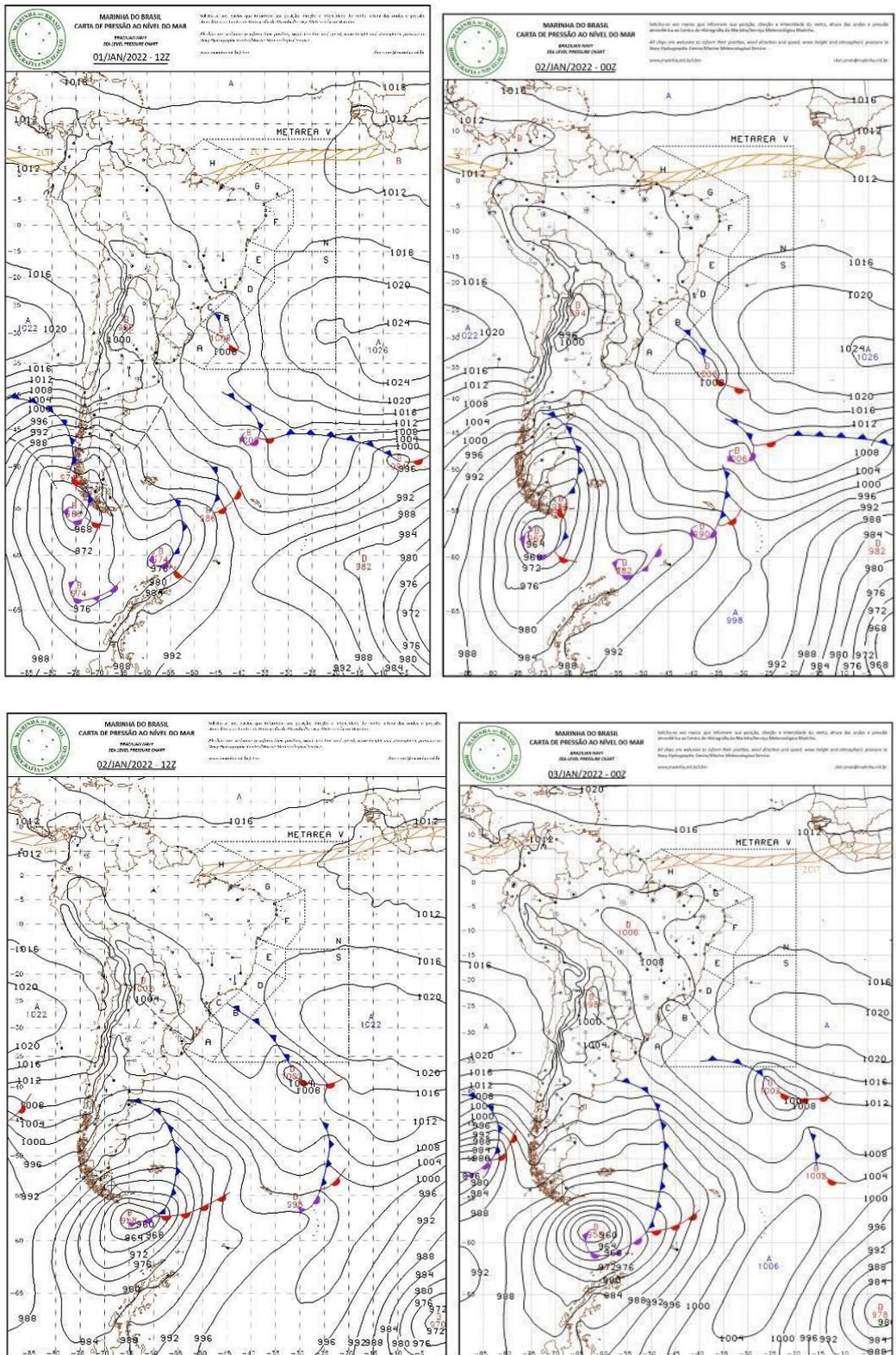


Figura 6.31: Cartas de superfície para os dias 1 e 2 de janeiro de 2022 (DHN, 2022): 01/01/2022, 12Z (6.30a), 02/01/2022, 00Z (6.30b), 02/01/2022, 12Z (6.30c) e 03/01/2022, 00Z (6.30d).

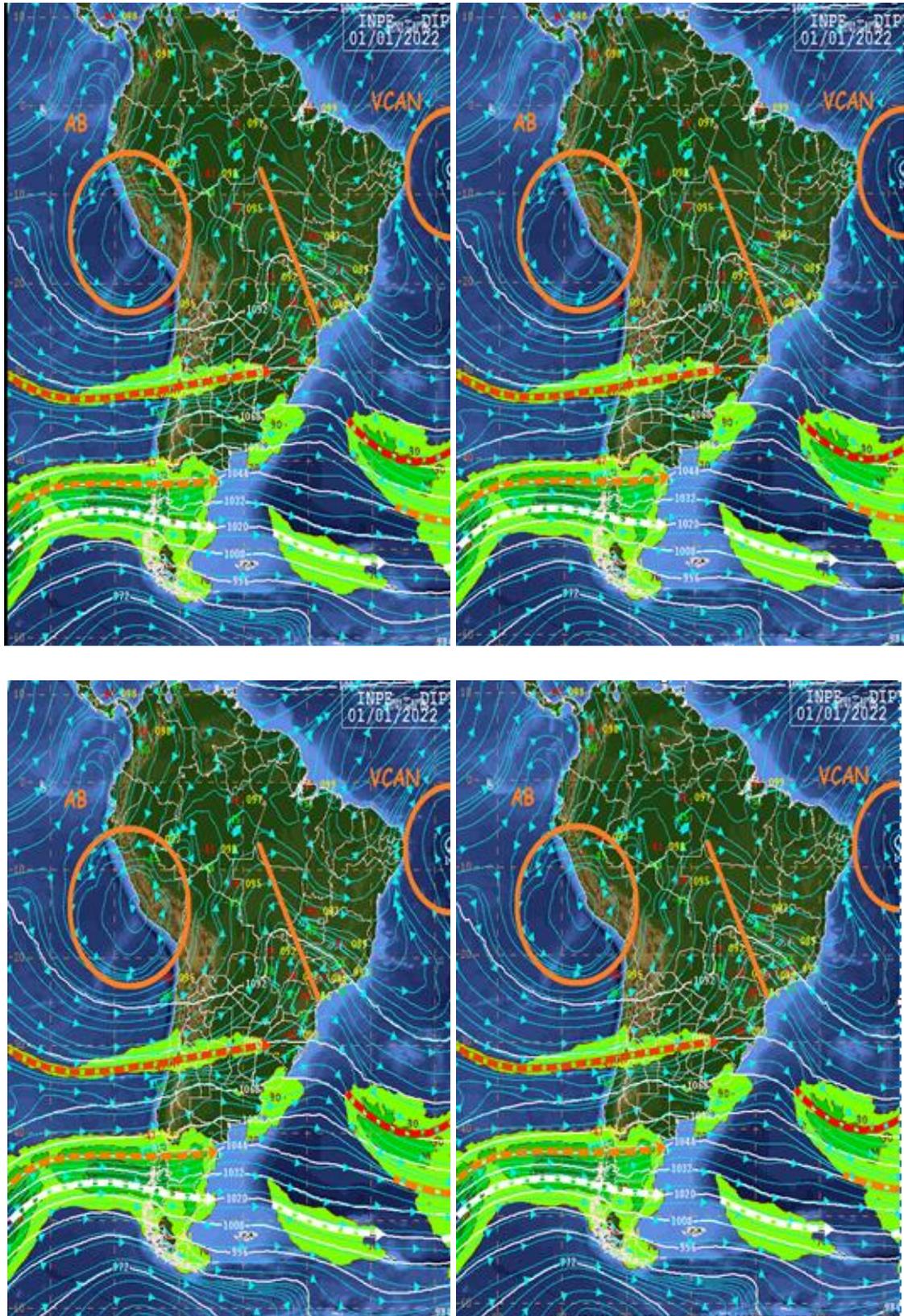


Figura 6.32: Cartas de altitude para os dias 1 e 2 de janeiro de 2022 (CPTEC, 2022): 01/01/2022, 12Z (6.31a), 02/01/2022, 00Z (6.31b), 02/01/2022, 12Z (6.31c) e 03/01/2022, 00Z (6.31d).

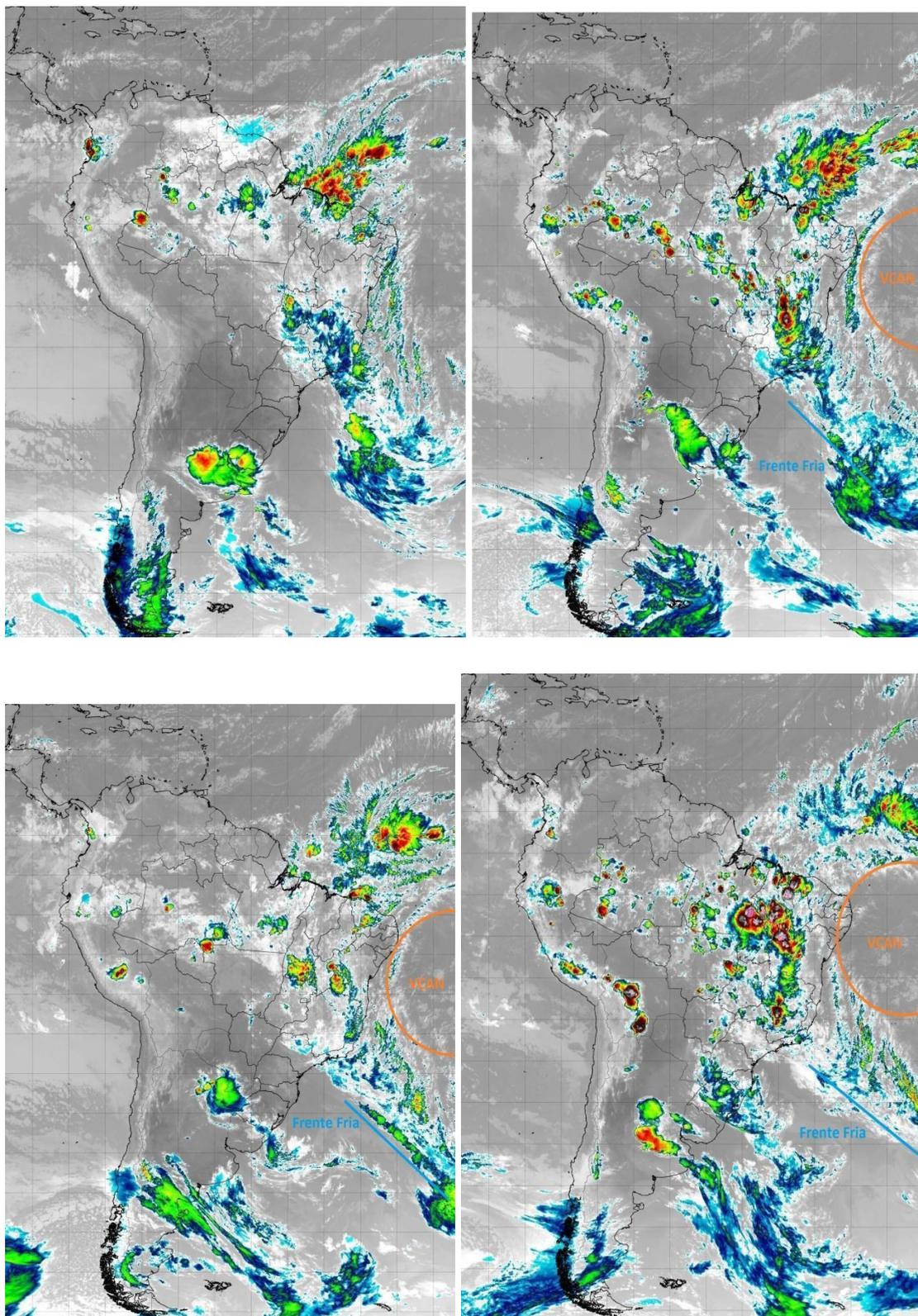


Figura 6.33: Imagens de satélite para os dias 1 e 2 de janeiro de 2022 (CPTEC, 2022): 01/01/2022, 12Z (6.32a), 02/01/2022, 00Z (6.32b), 02/01/2022, 12Z (6.32c) e 03/01/2022, 00Z (6.32d).

Também é possível identificar a presença da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) como uma banda de nuvens convectivas entre 5°N e 0° de latitude (figuras 6.31 e 6.33). Esta localização é típica neste período do ano, no qual o sistema ocupa suas posições mais meridionais, conforme descrito no item 3.3. Sobre a região de estudo, as imagens de satélite (figura 6.33) indicam uma faixa de nebulosidade característica da borda do VCAN, onde os movimentos ascendentes favorecem aumento de nebulosidade e tempo instável.

6.5.2 Simulações Numéricas do Campo de Temperatura e Vento para Subáreas de Sergipe

A seguir serão discutidos os resultados obtidos das simulações do WRF para os dias 1 e 2 de janeiro de 2022, geradas com as grades e parametrizações indicadas na Metodologia. A figura 6.34 apresenta os campos de temperatura a 2 metros (sombreado) sobreposta ao vento a 10 metros (barbelas) entre 12Z do dia 1 de janeiro de 2022 e 00Z do dia 2 de janeiro de 2022, indicando o predomínio de ventos de leste durante este período, como esperado de acordo com os resultados obtidos na seção 6.1, por conta da atuação da composição “alísios+SBM”.

De fato, as simulações de mesoescala do WRF conseguem reproduzir as interações entre alísios e SBM descritas no modelo conceitual (figura 3.9), indicando um escoamento de leste sobre o oceano, que em seguida sofre um desvio para sudeste ao avançar sobre o continente por conta do SBM, que atua de forma perpendicular ao litoral. Outra observação pertinente é a advecção de calor sensível da região litorânea para as regiões do Agreste e Sertão dos estados de Alagoas e Sergipe, imposta pela composição “alísios+SBM”, contribuindo para elevar a temperatura do ar nas regiões afastadas do litoral.

A figura 6.35 apresenta os campos de água precipitável (sombreado) sobreposta ao vento a 10 metros (barbelas). De fato, observa-se um aumento na quantidade de água precipitável sobre o litoral, concomitante ao fortalecimento do SBM e, ao longo da tarde, é possível notar uma advecção de umidade forçada pelo SBM no interior dos estados de Alagoas e Sergipe, indicando a penetração deste ar mais úmido nas regiões afastadas do litoral.

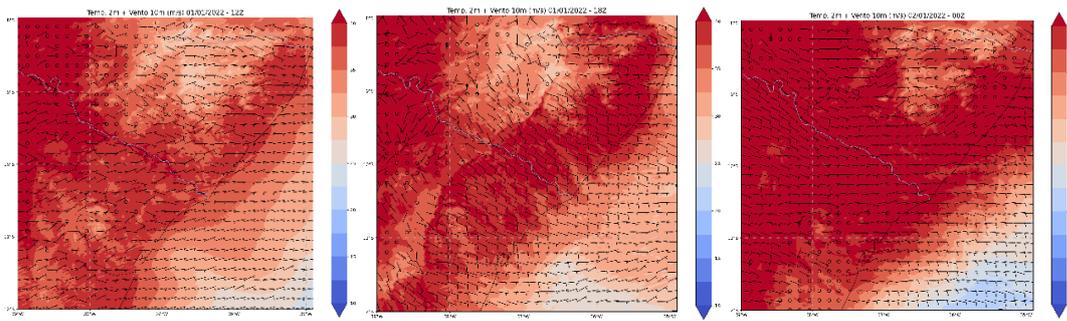


Figura 6.34: Simulações do WRF para temperatura a 2 metros (sombreado) e vento a 10 metros (barbelas) para os dias 1 e 2 de janeiro de 2022.

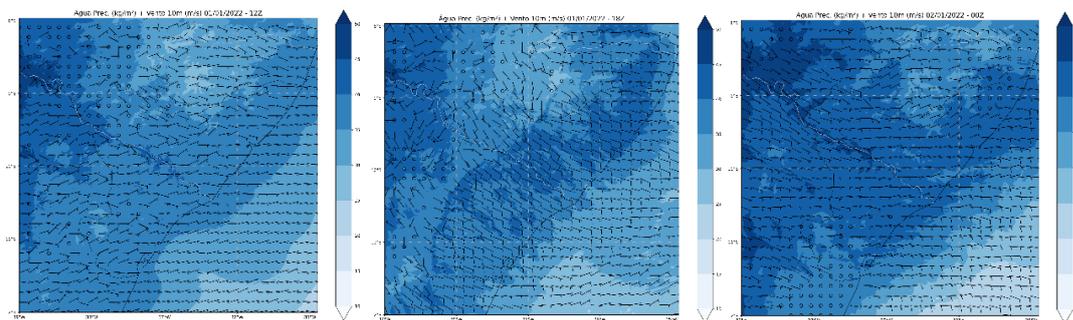


Figura 6.35: Simulações do WRF para água precipitável (sombreado) e vento a 10 metros (barbelas) para os dias 1 e 2 de janeiro de 2022.

A seguir, serão apresentadas comparações entre os dados de temperatura a 2 metros e vento a 10 metros observados nas estações Maceió ($-9,55^{\circ}/-35,77^{\circ}$), Itabaianinha ($-11,27^{\circ}/-37,79^{\circ}$) e Piranhas ($-9,62^{\circ}/-37,77^{\circ}$) e os resultados das 3 grades de simulação (9, 3 e 1 km) para o respectivo ponto de grade. As figuras de comparação (figuras 6.36 a 6.41) mostram que o modelo consegue reproduzir as variações esperadas para o ciclo diário de temperatura e vento, apesar de errar na intensidade dos máximos e mínimos destas variáveis.

Em geral, os resultados do 2º dia de simulação se aproximam mais do dado observado para os 3 pontos de grade, indicando a influência do tempo de integração do modelo e a necessidade de se avaliar futuramente a sensibilidade dos resultados a diferentes tempos de *spin-up*. Em relação às grades de simulação (9, 3 e 1 km), observa-se que os resultados das grades mais refinadas não apresentam melhoras significativas, sugerindo que o gasto computacional necessário para se refinar a grade de simulação não seja compensado por uma melhora significativa dos resultados, como já indicado por outros trabalhos.

No que se refere aos pontos de grade, o modelo acerta mais as temperaturas máximas em Maceió (litoral), errando mais à medida que se avança para o interior (Piranhas e Itabaianinha). Por outro lado, este cenário se inverte para as temperaturas mínimas, errando mais no litoral. Em relação à velocidade do vento, o modelo superestima sua intensidade nos horários típicos de intensificação do SBM para todas as estações, indicando que ele detecta corretamente o vento de escala sinótica (alísios), mas provavelmente erra ao reproduzir os mecanismos térmicos que geram a brisa marítima.

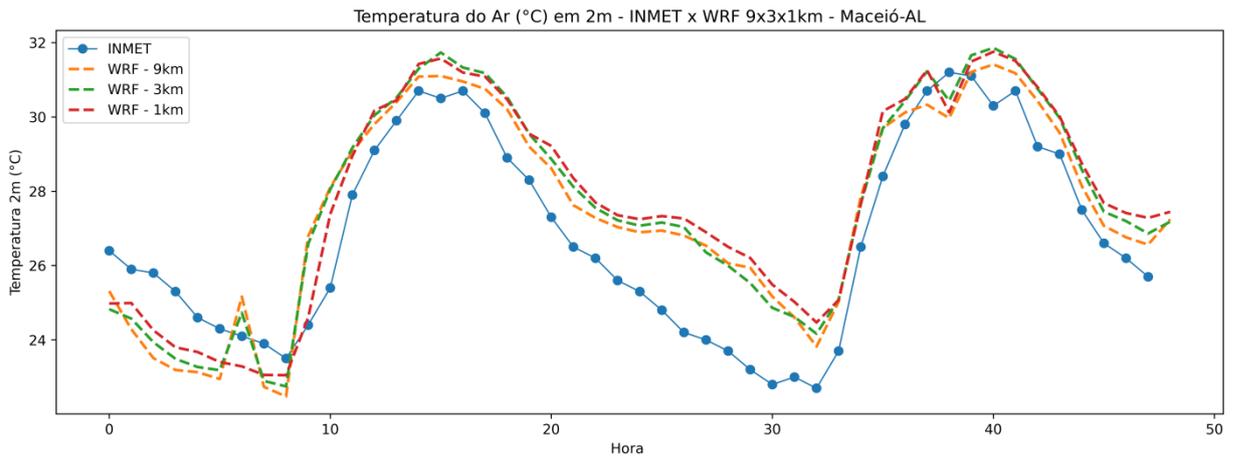


Figura 6.36: Comparação das simulações do WRF da temperatura do ar em 2m para Maceió (-9,55°/-35,77°).

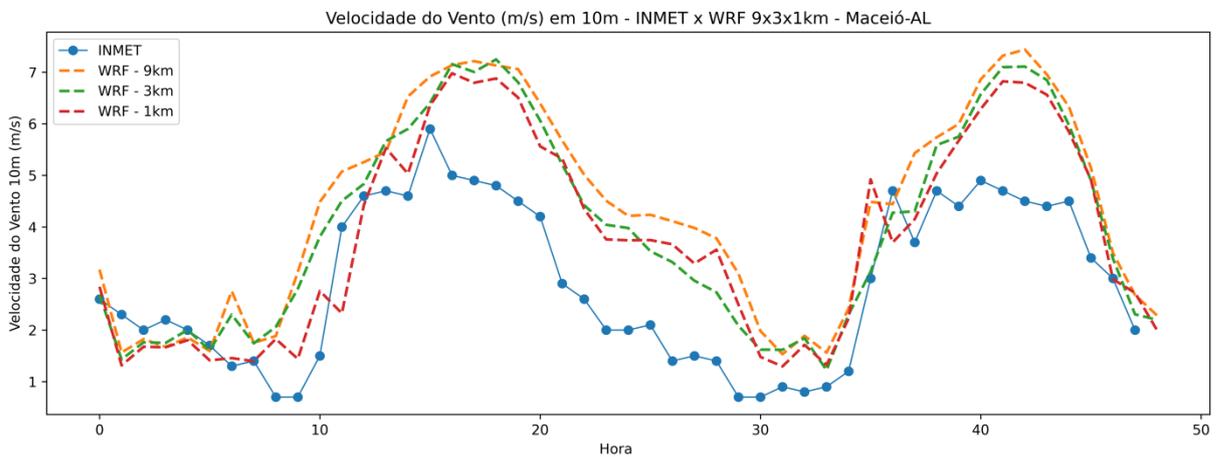


Figura 6.37: Comparação das simulações do WRF da velocidade do vento em 10m para Maceió (-9,55°/-35,77°).

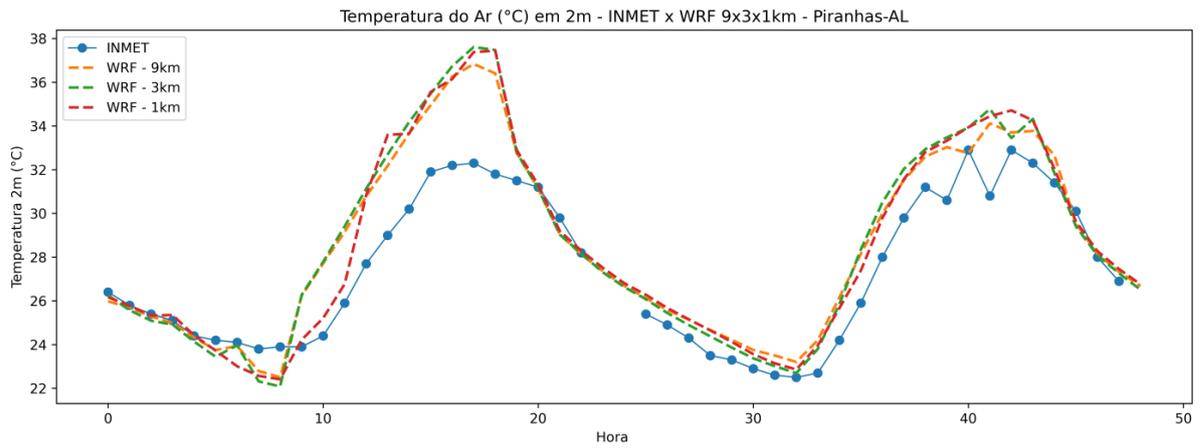


Figura 6.38: Comparação das simulações do WRF da temperatura do ar em 2m para Piranhas (-9,62°/-37,77°).

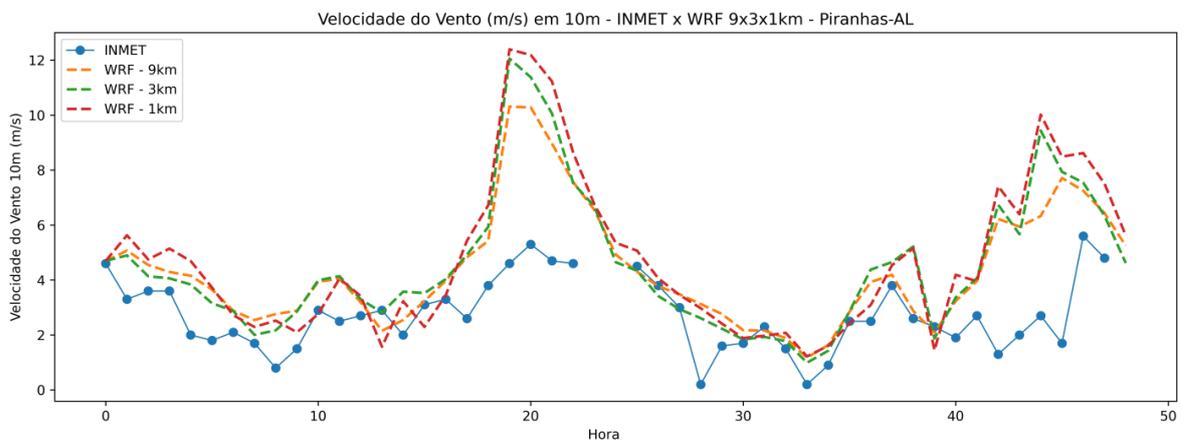


Figura 6.39: Comparação das simulações do WRF da velocidade do vento em 10m para Piranhas (-9,62°/-37,77°).

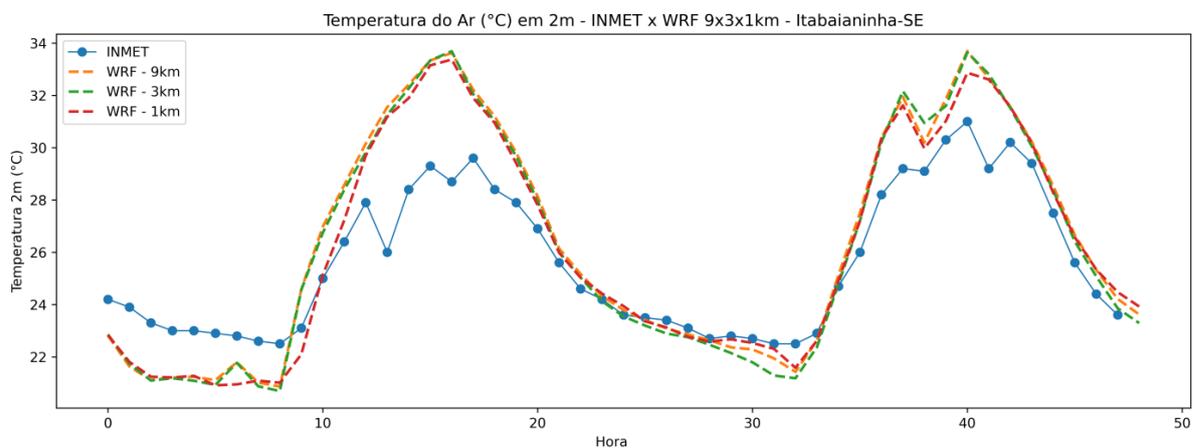


Figura 6.40: Comparação das simulações do WRF da temperatura do ar em 2m para Itabaianinha (-11,27°/-37,79°).

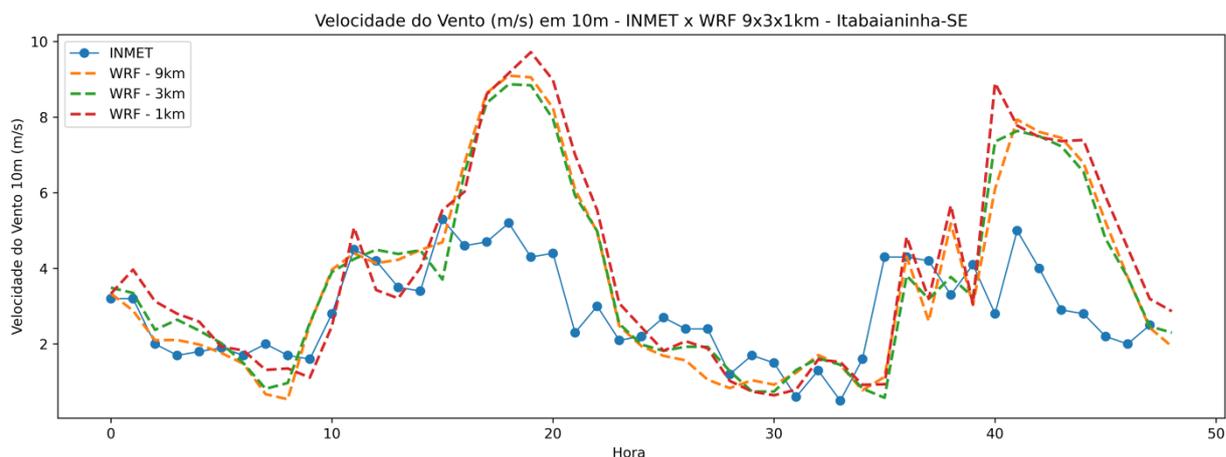


Figura 6.41: Comparação das simulações do WRF da velocidade do vento em 10m para Itabaianinha (-11,27°/-37,79°).

Por fim, é apresentada uma comparação (figura 6.42) entre as simulações de direção e intensidade do vento em 10 m nas estações Maceió (-9,55°/-35,77°), Itabaianinha (-11,27°/-37,79°) e Piranhas (-9,62°/-37,77°) e os resultados da grade de simulação mais refinada (1 km) para o respectivo ponto de grade. Observa-se que o modelo reproduz corretamente os ventos de leste e o desvio para sudeste característico do SBM no período da tarde. Vale também destacar a defasagem do horário de entrada da brisa marítima observada entre os pontos de grade: Maceió-AL encontra-se próxima ao litoral, enquanto que Piranhas-AL é localizada no extremo interior da grade de simulação.

A análise qualitativa das simulações do WRF indica que um possível caminho para melhora dos resultados esteja em testar outras parametrizações físicas de CLA e interação solo-superfície. SILVA JÚNIOR et al. (2016), por exemplo, aplicaram atualizações nos esquemas de parametrização de topografia e uso do solo, obtendo assim melhores simulações da direção e intensidade do vento.

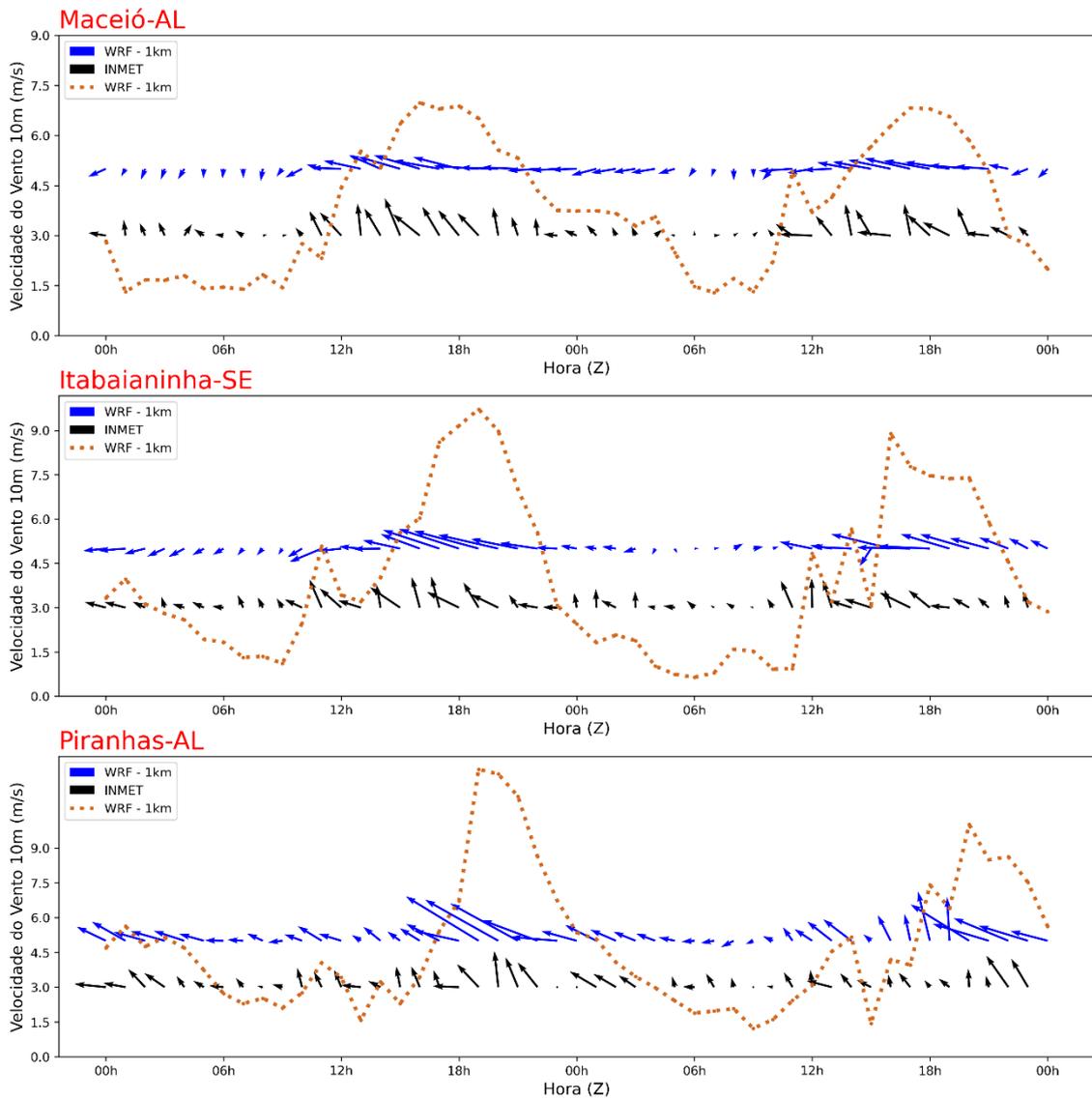


Figura 6.42: Comparação das simulações do WRF para direção e velocidade do vento em 10m em Maceió (-9,55°/-35,77°), Piranhas (-9,62°/-37,77°) e Itabaianinha (-11,27°/-37,79°).

7. Conclusões e Discussões

O objetivo deste trabalho foi fornecer base científica para futuros projetos de geração de energia eólica de pequeno porte, voltados para suprir energeticamente e baratear o custo de inserção de inovações tecnológicas, como a irrigação. Para isso, propôs-se uma metodologia de análise do comportamento do vento na região de interesse e um estudo de caso de geração de energia eólica direcionada para a irrigação de plantações de milho em propriedades de agricultura familiar no Sertão de Sergipe.

Considerando a carência de trabalhos publicados sobre Meteorologia e estudo do comportamento do vento em Sergipe, a primeira parte dos resultados já justifica esta Dissertação, trazendo uma contribuição pioneira sobre os fenômenos meteorológicos atuantes na região, principalmente a presença da brisa marítima e sua penetração no interior dos estados de Alagoas e Sergipe.

A principal conclusão da análise meteorológica foi de que os ventos alísios não são intensos o suficiente para possibilitar a geração de energia eólica no Sertão de Sergipe, no entanto a composição “alísios+SBM” observada nos períodos da manhã e tarde, intensifica o escoamento e permite o aproveitamento para geração eólica de pequeno porte, sendo restrito, portanto, pela duração do ciclo diário do SBM. Os resultados da análise multivariada dos dados de velocidade do vento (V) e de suas componentes zonal (V_x) e meridional (V_y) mostram que V e V_x se agrupam de forma mais similar do que V e V_y , indicando o protagonismo da componente zonal (“alísios+SBM”) na composição do vento da região. A Análise de Agrupamento dos dados de V_x reforçam a atuação da composição “alísios+SBM” de uma forma homogênea sobre o litoral da região, semelhante aos resultados do campo velocidade do vento.

A análise do ciclo diário do SBM evidencia seu protagonismo na composição “alísios+SBM”, principalmente ao comparar a fase inativa (período noturno) com a fase ativa do SBM (período diurno). Analisando-se as médias mensais de velocidade do vento da série histórica, observam-se menores valores no trimestre de maio a julho, período chuvoso da região, no qual o gradiente térmico entre litoral e oceano é reduzido, contribuindo para valores menores em comparação à estação seca, onde observam-se ventos mais intensos (FRANCHITO et al., 1998; MILLER et al., 2003; DUBREUIL et al., 2004). Em relação às taxas de calmaria (ventos abaixo de 0,5 m/s), novamente se

evidencia um período com maiores valores nas duas estações analisadas durante o período chuvoso e menores valores no período seco da região.

Os resultados do estudo de caso indicam que o investimento é viável para o consumidor do tipo “não irrigante noturno”, com um tempo de *payback* (15 anos) inferior a vida útil do aerogerador (20 anos). No entanto, destaca-se que este tempo de retorno é muito próximo da vida útil, o que pode diminuir o interesse por esta fonte alternativa. Para o consumidor do tipo “irrigante noturno”, o tempo de retorno excede a vida útil do aerogerador e a metodologia proposta não se mostra vantajosa financeiramente para produtores que dispõem do desconto de irrigante noturno. Não está no escopo deste trabalho discutir as desvantagens do desconto de irrigante noturno, que promove um retorno financeiro ao consumidor, mas que impõe restrições ao uso de tecnologias, como por exemplo as bombas de irrigação.

Isto posto, os resultados mostram que a metodologia proposta oferece uma alternativa economicamente vantajosa e intermediária às modalidades “irrigante noturno” e “não-irrigante noturno”. Por exemplo, para o produtor que deseja utilizar irrigação em outros horários, ou até mesmo utilizar outros maquinários, sem que haja tanto custo financeiro. Estes resultados servem também para exemplificar o alto custo de geração eólica de pequeno porte e o quanto este nicho de mercado ainda pode se tornar mais atraente para o consumidor, como citado por ARAÚJO et al. (2021), seja por meio de políticas públicas, seja por expansão do mercado produtor de aerogeradores.

Por fim, vale destacar que este estudo de caso apresenta vantagens (meteorológicas) e desvantagens (financeiras) em relação aos trabalhos semelhantes descritos anteriormente. A principal vantagem é que este estudo de caso se baseia em uma maior quantidade de dados (12 anos), enquanto que trabalhos semelhantes se restringem a poucos anos (ou até alguns meses apenas) apresentando assim maior confiabilidade estatística. Outra vantagem é que neste estudo de caso não foi realizada extrapolação dos dados de velocidade do vento medidos em 10m para alturas superiores, como realizado em trabalhos semelhantes, nos quais foi estimado o vento em 20m e 50m. Estas extrapolações são realizadas a partir de suposições sobre a estabilidade atmosférica local e descarte de alguns termos das equações de similaridade de Monin-Obukhov, gerando maiores incertezas no valor final. Como citado anteriormente, o potencial eólico teórico

é proporcional à terceira potência da velocidade do vento, logo eventuais erros na estimativa da intensidade do vento são maximizados na estimativa da produção eólica.

Em relação às desvantagens, a análise da viabilidade econômica deste projeto contou apenas com o método do *payback* simples, enquanto que trabalhos semelhantes também utilizaram outras ferramentas financeiras como o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR). Outra desvantagem é a avaliação de apenas um modelo de aerogerador e um modelo de bomba de irrigação, enquanto que outros trabalhos semelhantes testaram mais modelos de equipamentos.

Os resultados indicam que a região do cluster de Carira não se mostra adequada para operação de parques eólicos de grande porte. No entanto, a operação de aerogeradores de pequeno porte, combinada a outras fontes renováveis, como geração solar ou biomassa, mostra-se favorável, como indicado pelo estudo de caso. Ademais, considerando a legislação atual, seria possível também a comercialização do excedente de energia produzido durante as horas de operação do aerogerador nos meses da estação seca, em troca de acesso à energia em épocas do ano com ventos menos intensos (estação chuvosa).

Os resultados das simulações do WRF para os estados de Alagoas e Sergipe indicam que esta é uma ferramenta valiosa para projeções de curto, médio e longo prazo do potencial eólico, ainda mais ao considerar que se trata de uma região que carece de uma série temporal extensa de dados observados. No entanto, faz-se necessário implementar algumas modificações nas configurações propostas. Por exemplo, testar outras parametrizações físicas de Camada Limite Atmosférica e Interação Solo-Superfícies e atualizar as parametrizações de topografia e uso do solo, obtendo assim melhores simulações da direção e intensidade do vento. Por outro lado, os resultados indicam que o refinamento das grades talvez não compense o elevado gasto computacional, principalmente considerando um ambiente operacional voltado para previsão de potencial eólico de curto prazo.

Referências

- ABBS, D. J., PHYSICK, W. L. Sea-breeze observations and modelling: a review. 1992.
- ACUNHA JUNIOR, I. C. Análise do Desempenho de um Aerogerador de Pequeno Porte. 2006.
- ALBIERO, D.; DAHER, S. MONTEIRO, L. A. CANAFISTULA, F. J. F. Turbina eólica para agricultura familiar do semiárido com inovações tecnológicas para baixas velocidades de vento. *Rev. Ciênc. Agron.*, v. 196 45, n. 1, p. 186-196, jan-mar. 2014.
- ALBIERO, D.; PRACIANO, A. C.; VOGT, H. H.; MONTEIRO, L. A.; FEITOSA, E. O. Sistema Híbrido Renovável de Geração de Energia Elétrica para o Semiárido. *REVISTA CONEXÕES - CIÊNCIA E TECNOLOGIA*, v. 11, p. 43-48, 2017.
- ALVES, J. M. B.; FERREIRA, F.; CAMPOS, J. N.; SOUZA FILHO, F.; DURAND, B. J.; SERVAIN, J.; DE CARVALHO STUDART, T. Mecanismos atmosféricos associados à ocorrência de precipitação intensa sobre o Nordeste do Brasil durante Janeiro/2004. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, n. 01, p. 1-21, 2006.
- ALVES, S. S.; MELO, R. P.; SANTOS, P. A.; ALBIERO, D. Design and development of mobile tower for wind turbine. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, p. 65202-65209, 2020.
- ARAÚJO, F. R. P. d.; PEREIRA, M. G.; FREITAS, M. A. V.; DA SILVA, N. F.; DANTAS, E. J. d. A. Bigger Is Not Always Better: Review of Small Wind in Brazil. *Energies* 2021, 14, 976.
- ARAÚJO, R. G., ANDREOLI, R.V., CANDIDO L. A., KAYANO M. T., SOUZA R. A. F.. A influência do evento El Niño - Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. *Acta Amaz.*, Manaus, v. 43, n. 4, p. 469-480, Dec. 2013.
- ARAÚJO, S. R. N. Microgeração eólica conectada à rede elétrica para uso residencial. 2016.
- ARRUDA, M. F.; CARVALHO, P. C. M.; ALBIERO, D.; CANAFISTULA, F. J. F.; TEIXEIRA, A. S. Solar and Wind powered Stand Alone Water Pumping system. *Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ)*, v. 13, p. 253-259, 2015.

BARCELLOS, S. N. Avaliação de Potencial Eólico para Aerogeradores de Pequeno Porte - Região de Estudo: Espírito Santo. 2014.

BENJAMIN, S. G.; WEYGANDT, S. S.; BROWN, J. M.; HU, M.; ALEXANDER, C. R.; SMIRNOVA, T. G.; OLSON, J. B.; JAMES, E. P.; DOWELL, D. C.; GRELL, G. A.; LIN, H.; PECKHAM, S. E.; SMITH, T. L.; MONINGER, W. R.; KENYON, J. S. A.; MANIKIN, G. S. North American Hourly Assimilation and Model Forecast Cycle: The Rapid Refresh. *Monthly Weather Review* 144, 4. American Meteorological Society. 2016. 10.1175/MWR-D-15-0242.1

BOCQUET-APPEL, J. P.; When the World's Population Took Off: The Springboard of the Neolithic Demographic Transition. *Science* 29 Jul 2011: Vol. 333, Issue 6042, pp. 560-561. DOI: 10.1126/science.1208880.

BONNET, S. M.; DERECZYNSKI, C. P.; NUNES, A. Caracterização Sinótica e Climatológica de Eventos de Chuva Pós-Frontal no Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, p. 547-557, 2018.

BRASIL. ANEEL. Resolução ANEEL nº 414 de 9 de setembro de 2010. Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada.

BRASIL. ANEEL. Resolução ANEEL nº 1000 de 7 de dezembro de 2021. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica; revoga as Resoluções Normativas ANEEL nº 414, de 9 de setembro de 2010; nº 470, de 13 de dezembro de 2011; nº 901, de 8 de dezembro de 2020 e dá outras providências.

BRASIL. ANEEL. Resolução ANEEL nº 482 de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

BRASIL. ANEEL. Resolução ANEEL nº 687 de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST.

BRASIL. ANEEL. Resolução ANEEL nº 786 de 17 de outubro de 2017. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Diário Oficial da União: edição: 5, seção: 1, página: 4, Brasília, DF. 7 jan. 2022.

CARRILO, A.; MORAIS, M.; LANDULFO, E.; DE CAMARGO, R.; UEHARA, S.; MARIANO, G.; PETTO JÚNIOR, S. Identificação da intrusão da brisa marítima sobre a região metropolitana de São Paulo através da técnica LIDAR aliada à análise meteorológica. *Ciência e Natura*. 2007.

CARVALHO, A. L.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; SILVA, E. C. Estação chuvosa e de cultivo para a região de Rio Largo, Alagoas baseada em métodos diretos e sua relação com o El Niño - Oscilação Sul. *Rev. bras. meteorol.* [online]. 2013, vol.28, n.2, pp.192-198. ISSN 0102-7786. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000200008>.

CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SILVA 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, 2012.

CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SILVA SANTOS, C. 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*, v. 135, p. 234-246, 2014.

CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SILVA SANTOS, C. WRF wind simulation and wind energy production estimates forced by different reanalyses: Comparison with observed data for Portugal. *Applied Energy*, v. 117, p. 116-126, 2014.

CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Albuquerque; FERREIRA, Nelson Jesus; DIAS, Maria Assunção Faus da Silva; SILVA, Maria Gertrudes Alvarez Justi da. *Tempo e clima no Brasil*. 2009.

CASTRO, C. N. *A agricultura no nordeste brasileiro: Oportunidades e limitações ao desenvolvimento*, Texto para Discussão, No. 1786, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília. 2012.

CORSO, A. C. O. T. Estudo de Caso Sobre Microgeração Distribuída de Energia Eólica Aplicada À Produtores Rurais. 2019.

DALU, G., PIELKE, R. An Analytical Study of the Sea Breeze. *Journal of Atmospheric Sciences*. 1989, 46, 1815-1825.

DRAXL, C., HAHMANN, A. N., PENA DIAZ, A., NISSEN, J. N., & GIEBEL, G. Validation of boundary-layer winds from WRF Mesoscale Forecasts with applications to wind energy forecasting. Extended abstracts. 19th Symposium on Boundary Layers and Turbulence. 2010.

DE ALCÂNTARA SILVA, V. M.; MARCELINO PATRÍCIO, M. C.; RIBEIRO, V. H. A.; MEDEIROS, R. M. O Desastre Seca no Nordeste Brasileiro. *POLÊMICA*, [S.l.], v. 12, n. 2, p. 284-293, jun. 2013. ISSN 1676-0727.

DE ASSIS TAVARES, L. F.; SHADMAN, M.; DE FREITAS ASSAD, L. P.; SILVA, C.; LANDAU, L.; ESTEFEN, S. F. Assessment of the offshore wind technical potential for the Brazilian Southeast and South regions. *ENERGY*, v. 196, p. 117097, 2020.

DEPPE, A. J., GALLUS, W. A., TAKLE, E. S. A WRF Ensemble for Improved Wind Speed Forecasts at Turbine Height. 2013. *Weather Forecasting*, 28, 212–228. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-11-00112.1>. 2013.

DUBREUIL, V.; DAMATO F; PLANCHON, O.; PASSOS M. Contribuição dos dados GOES para a cartografia das frentes da brisa marítima no Nordeste. In: VI Simposio Brasileiro de Climatologia Geográfica, 2004, Aracaju. Anais do VI Simposio Brasileiro de Climatologia Geográfica. Aracaju: ABCLima/UFS, 2004. v. 6. p. 1-8.

DUPUY, J.P.; "Introdução à Crítica da Ecologia Política", *Civilização Brasileira*, 1980.

EMBRAPA. Viabilidade e Manejo da Irrigação da Cultura do Milho. Circular Técnica. ISSN 1679-1150. 2006.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2022: Ano base 2021. Rio de Janeiro, 2022.

EMPRESA DE DESENVOLVIMENTO AGROPECUÁRIO DE SERGIPE. Relatório de Atividades. Aracaju. 2018.

ENERGISA. Tipos de Tarifas. Modalidade Tarifária Convencional – Baixa Tensão. Disponível em: <<https://www.energisa.com.br/paginas/informacoes/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>>. Acesso em: 10 de ago. de 2022.

ENGEL, V.; FEIJÓ, G. G. A.; DEPONTI, C. M. Agricultura Familiar no contexto das cooperativas rurais: o caso da Ecocitrus. Cadernos de Ciência & Tecnologia, Brasília, v. 34, n. 1, p. 59-81, jan./abr. 2017.

ESTOQUE, M. A. The Sea Breeze as a Function of the Prevailing Synoptic Situation. Journal of the Atmospheric Sciences, 1962, volume 19, pages 244-250.

FEITOSA, E. O.; ALBIERO, D.; PRACIANO, A. C.; MACEDO, D. X. S.; CHIODEROLI, C. A. Simulação do aproveitamento da energia eólica para irrigação no distrito irrigado Baixo-Acaraù-CE. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 3, p. 65-79, 2014a.

FEITOSA, E. O.; ALBIERO, D.; FEITOSA, S. O.; PRACIANO, A. C.; FEITOSA, H. O.; CARVALHO, C. M. Energia eólica como alternativa energética para convivência com semiárido no perímetro irrigado Tabuleiros de Russas. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 8, p. 199-209, 2014b.

FEITOSA, E.O.; ALBIERO, D.; FEITOSA, H.O.; MONTEIRO, L.A.; PRACIANO, A.C.. Utilização da energia elétrica proveniente de geração eólica, hidroelétrica e termoelétrica no perímetro irrigado Jaguaribe-Apodi. REVISTA BRASILEIRA DE CIENCIAS AGRARIAS, v. 9, p. 258-263, 2014c.

FEITOSA, E. O.; ALBIERO, D.; SANTOS, P. R. A.; FERNANDES, F. R. B.; MELO, R. P.. Utilização de Aerogeradores para Geração de Energia Elétrica no Estado do Ceará. REVISTA CONEXÕES - CIÊNCIA E TECNOLOGIA, v. 11, p. 57-63, 2017.

GERMANO, A. S., SILVA JUNIOR, R. S. Estimativa do Potencial Eólico do Estado de Alagoas Utilizando o Modelo Atmosférico WRF. Revista Eletrônica de Energia, v. 6, n. 1, p. 18-26. 2016.

GIANNAKOPOULOU, M. E.; NHILI, R. WRF Model Methodology for Offshore Wind Energy Applications. Advances in Meteorology, vol. 2014, Article ID 319819, 14 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/319819>.

GRIMM, A. M. The El Niño Impact on the Summer Monsoon in Brazil: Regional Processes versus Remote Influences. *J. Climate*, 16, 263–280, 2003. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<0263:TENIOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<0263:TENIOT>2.0.CO;2).

HASTENRATH, S.; HELLER, L. 1977: Dynamics of climatic hazards in north-east Brazil. *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, 110, 411-425.

HEIKENFELD, M.; MARINESCU, P. J.; CHRISTENSEN, M.; WATSON-PARRIS, D.; SENF, F.; van den HEEVER, S. C.; STIER, P. Tobac 1.2: Towards a flexible framework for tracking and analysis of clouds in diverse datasets, *Geosci. Model Dev.* 2019. 12, 4551–4570, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4551-2019>.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001. 2023.

INTERNATIONAL STANDARD. Wind turbines - Part 2: Small wind turbines. IEC 61400-2. ISBN 978-2-8322-1284-4. 2013.

JORGETTI, T., DE CAMARGO, R., JANUÁRIO, C. S. Caracterização da Célula de Brisa na Região Metropolitana de São Paulo Através de Observações Simultâneas. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz de Iguaçu-PR, 2002.

KAZEMIRAD, M.; MILLER, M. A. Summertime Post-Cold-Frontal Marine Stratocumulus Transition Processes over the Eastern North Atlantic. *J. Atmos. Sci.*. 2020. 77, 2011–2037. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-19-0167.1>.

KOUSKY, V.E.; GAN, M.A. 1981. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. *Tellus*, 36(6):538-551, Dec.

LÍVIA, A. S. R.; PEREIRA, G. S. Projeto de Concepção de Unidade de Geração Eólica de Pequeno Porte. 2018.

LOPES DE LIMA, F. J.; CASTRO AMANAJÁS, J.; SOUZA GUEDES, R. V.; DA SILVA, E. M. Análises de Componente Principal e de Agrupamento para estudo de ventos para a geração de energia eólica na região do Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte. *Brasil Ambiente & Água*, vol. 5, núm. 2, 2010, pp. 188-201.

LYRA, R. F. F.; SILVA JUNIOR, R. S.; MOURA, M. A. L. e Marney Chaves de Aragão Lisboa Amorim. Prognóstico da velocidade do vento utilizando o modelo WRF na região central de Alagoas. *Ciência e Natura*, Santa Maria v.38 Ed. Especial-IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, 2016, p. 447 – 451.

MAMALAKIS, A.; RANDERSON, J. T.; YU, J. Y.; PRITCHARD, M. S.; MAGNUSDOTTIR, G.; SMYTH, P.; LEVINE, P. A.; SUNGDUK, Y.; FOUFOULA-GEORGIOU, E. Zonally contrasting shifts of the tropical rain belt in response to climate change. *Nature Climate Change*, vol. 11, no. 2, pp. 143–151. doi:10.1038/s41558-020-00963-x. 2021.

MARAFFON, C. Estudo do sistema de microgeração de energia eólica. 2018.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theor. Appl. Climatol.* (2016). DOI: 10.1007/s00704-016-1840-8.

MATTAR, C.; BÓRVARAN, D. Offshore wind power simulation by using WRF in the central coast of Chile. *Renewable Energy*, Volume 94, Pages 22-31, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.005>. 2016.

MENEZES, S. S. M.; SANTOS SILVA, P. A.; CONCEIÇÃO SILVA, H. R.; Configuração espacial da geografia alimentar em Sergipe. *Confins* [En ligne],40. 2019. <https://doi.org/10.4000/confins.20412412>.

METZ, J.; MONARD, M. C. Clustering hierárquico: uma metodologia para auxiliar na interpretação dos clusters. In: V Encontro Nacional de Inteligência Artificial, 2005, São Leopoldo/RS. ENIA - Encontro Nacional de Inteligência Artificial, 2005. p. 1-4.

MILLER, S. T. K.; KEIM, B. D.; TALBOT, R. W. MAO, H. Sea Breeze: Structure, Forecasting and Impacts. Climate Change Research Center, Institute for the Study of Earth, Oceans and Space, University of New Hampshire, Durham, New Hampshire, USA. 2003.

MUSIAL, W.; HEIMILLER, D.; BEITER, P.; SCOTT, G.; DRAXL, C. 2016 Offshore Wind Energy Resource Assessment for the United States. United States: N. p., 2016. Web. doi:10.2172/1324533.

NAKANE, H.; SASANO, Y. Structure of a Sea-breeze Front Revealed by Scanning Lidar Observation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 64, No. 5. 1986.

NCAR. Convection-Permitting Physics Suite for WRF. Available online: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/ncar_convection_suite.php. 2020.

NWS. NCEP GDAS/FNL 0.25 degree global tropospheric analyses and forecast grids. National Center for Atmospheric Research Computational and Information Systems Laboratory Research Data Archive. 2015. <https://doi.org/10.5065/D65Q4T4Z>.

OLIVEIRA, T. P.; SILVA JUNIOR, R. S.; LYRA, R. F. F.; Sandro Correia Holanda. Estudo da produção de energia eólica a partir de medições anemométricas da estação de craíbas/AL e simulações com o modelo WASP. *Ciência e Natura*, Santa Maria v.38 Ed. Especial-IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, 2016, p. 477 – 483.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; KWON, B. H.; SARMENTO, A. C.; SOARES DOS SANTOS, A. A brisa marítima observada através de um radar Doppler banda-L. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, Brasil. 2005.

ORLANSKI, I. 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56(5), p. 527-530.

OSTI, A. M.; DALLACORT, R.; TIEPPO, R. C.; GRZEBIELUCKAS, C.; CONCEIÇÃO, A. M.. Rentabilidade do milho e do feijão submetido a diferentes lâminas de irrigação em Mato Grosso. *Revista de economia e sociologia rural*, v. 57, p. 505-518, 2019.

PEREIRA, M. G.; DUTRA, R. M. ; GUEDES, V. . ESTUDO PROSPECTIVO DO MERCADO DE ENERGIA EÓLICA DE PEQUENO PORTE NO BRASIL. In: *Brazil Windpower 2013 - Conference & Exhibition*, 2013, Rio de Janeiro. *Brazil Windpower 2013*, 2013.

PEREIRA, M. G.; DUTRA, R. M. ; MONTEZANO, B. E. M. . Mercado de Aerogeradores de Pequeno Porte no Brasil: análise da percepção dos agentes. 2015.

PESSANHA, J. F. M.; JUSTINO, T.C. Um Modelo para Previsão de Carga de Curto Prazo. *X Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*. 2013.

PIMENTEL, S. D. Choosing a Clustering: An A Posteriori Method for Social Networks. *Journal of Social Structure* 15(1):1-21. 2014.

POWERS, J. G., KLEMP, J. B., SKAMAROCK, W. C., DAVIS, C. A., DUDHIA, J., GILL, D. O., MICHALAKES, J.; TRAHAN, S.; BENJAMIN, S. G.; ALEXANDER, C. R.; DIMEGO, G. J.; WANG, W.; SCHWARTZ, C. S.; ROMINE, G. S.; LIU, Z.; SNYDER, C.; CHEN, F. BARLAGE, M. J.; Yu, W.; DUDA, M. G. The Weather Research and Forecasting Model: Overview, system efforts, and future directions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98, 1717–1737. 2017. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>.

RAMOS, D. N. S., LYRA, R. F. F., SILVA JUNIOR, R. S., Cavalcante, G. H., Varela Lopes, G. E. Wind Power in Girau do Ponciano, Alagoas, Brazil, Using Anemometric Data and Microscale Modeling. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 2, 279-288, 2018.

RASKIN, P.; BANURI, T.; GALLOPIN, G.; GUTMAN, P.; HAMMOND, A.; KATES, R.; SWART, R.; “Great Transition – The Promise and Lure of the Times Ahead”, Global Scenario Group, March 2002.

REBOITA, Michelle Simões; GAN, SILVA FILHO Alonso; ROCHA, Rosmeri Porfírio da; AMBRIZZI, Tércio. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Rev. bras. meteorol.* [online]. 2010, vol.25, n.2, pp.185-204.

REBOITA, Michelle Simões et al. Causas da Semi-aridez do Sertão Nordestino. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 19, oct. 2016.

RICHARDSON, L. F. *Numerical Prediction by Numerical Process*, Cambridge Univ. Press. Second Edition. 1922.

ROCHA, T.; PERES, S. M.; BISCARO, H. H.; MADEO, R. C. B. ; BOSCARIOLI, C. Tutorial sobre Fuzzy-c-Means e Fuzzy Learning Vector Quantization: Abordagens Híbridas para Tarefas de Agrupamento e Classificação. *Revista de Informática Teórica e Aplicada: RITA*, v. 19, p. 120-163, 2012.

ROSATO, M.A. (2018). *Small Wind Turbines for Electricity and Irrigation: Design and Construction* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b22493>

ROTUNNO, R. On the Linear Theory of the Land and Sea Breeze, *Journal of Atmospheric Sciences*, 1983, 40(8), 1999-2009.

SACHS, I.; "Equitable Development on a Healthy Planet – Transition Strategies for the 21st Century”, report to the UNCED Secretariat, January 1992.

SALVADOR, N. Estudo da Camada Limite Atmosférica em Regiões Metropolitanas Costeiras com Simulações de Brisa Marítima. 2014.

SANTOS DA SILVA, S. M.; LYRA, R. F. F.; SILVA JUNIOR, R. S., DELGADO DA CRUZ, N. S., DOS SANTOS SILVA, S. Avaliação do Desempenho do Modelo WRF para Prognóstico do vento na Região Central de Alagoas – Craíbas. *Ciência e Natura*, Santa Maria v.40, Edição Especial: X Workshop Brasileiro de Micrometeorologia. 2018.

SARMENTO, A. C. Avaliação de Padrões Atmosféricos Associados à Ocorrência de Chuvas Extremas no Litoral da Região Nordeste do Brasil: Aspectos Numéricos na Previsão Operacional do Tempo. 2009.

SCHINCARIOL NETTO, A. Estudo de Viabilidade de Microgeração de Energia Eólica no Campus da UTFPR de Guarapuava. 2017

SENTELHAS, P.C., PEREIRA, A.B. El Niño–Southern Oscillation and Its Impacts on Local Climate and Sugarcane Yield in Brazil. *Sugar Tech* 21, 976–985 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00725-w>

SICILIANO, B., DANTAS, G., SILVA, C.M., ARBILLA, G. Increased ozone levels during the COVID-19 lockdown: Analysis for the city of Rio de Janeiro, Brazil. *Science of the Total Environment*, 737 (2020).

SILVA, S. S. F., ALVES, A. C., Ramalho, Â. M. C., LACERDA, C. S., SOUSA, C. M. Complementaridade Hidro Eólica: Desafios e perspectivas para o planejamento energético nacional. *Revista Holos*, Ano 31, Vol. 6. 2015.

SILVA FILHO, M. P. O., LIMA, L. C., MACEDO, A. R. M. Fabricação de Uma Pequena Turbina Eólica de Eixo Vertical. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v.4, p. 01-16, 2015.

SILVA JUNIOR, R. S., LYRA, R. F. F., RAMOS, D. N. S., MOURA, M. A. L., GOMES, H. B., HOLANDA, S. C. Prognóstico do vento para o estado de alagoas utilizando o

modelo wrf em alta resolução: avaliação da melhoria da topografia, uso do solo e velocidade de fricção. *Ciência e Natura*, Santa Maria v.38, Edição Especial: IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia. 2016.

SIUTA, D.; WEST, G.; STULL, R. WRF Hub-Height Wind Forecast Sensitivity to PBL Scheme, Grid Length, and Initial Condition Choice in Complex Terrain. *Weather and Forecasting*. American Meteorological Society. 2017.

SKAMAROCK, W. C., KLEMP, J. B., DUDHIA, J., et al. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. Relatório técnico, National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, Colorado, USA, 2019.

SOARES DA SILVA, M. Investigação dos Processos Fonte-Sumidouro do Ozônio Troposférico na RMRJ: Abordagem Teórica e Computacional. 2019.

SOBRAL, F. S. B., FACCIOLI, G. G. Avaliação do Potencial Eólico para Geração de Energia em Nossa Senhora da Glória-SE. *Scientia Plena*, 5(6). 2009.

SOKAL, R. R.; ROHLF, F. J. The Comparison of Dendrograms by Objective Methods. *Taxon*, Vol. 11, No. 2, pp. 33-40. 1962.

STORM, B.; DUDHIA, J.; BASU, S.; SWIFT, A.; GIAMMANCO, I. Evaluation of the Weather Research and Forecasting Model on Forecasting Low-level Jets: Implications for Wind Energy. *Wind Energ.* 2009; 12:81–90.

STORM, B.; BASU, S. The WRF Model Forecast-Derived Low-Level Wind Shear Climatology over the United States Great Plains. *Energies* 2010, 3, 258-276.

STULL, R. B., *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, 670 pp., Kluwer Acad., Norwell, Mass., 1988.

TASZAREK, M.; PILGUJ, N.; ORLIKOWSKI, J.; SUROWIECKI, A.; WALCZAKIEWICZ, S.; PILORZ, W.; PIASECKI, K.; PAJUREK, L.; POLROLNICZAK, M. Derecho Evolving from a Mesocyclone—A Study of 11 August 2017 Severe Weather Outbreak in Poland: Event Analysis and High-Resolution Simulation. *Mon. Wea. Rev.* 2019. 147, 2283–2306. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0330.1>.

TEIXEIRA, C. S. A economia política da transformação do nordeste: de Furtado a Unger. Cad. CRH [online]. 2014, vol.27, n.70, pp.201-214.

TEIXEIRA, R. F. B. O fenômeno da brisa e sua relação com a chuva sobre Fortaleza-CE. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 23, p. 282-291, 2008.

TIJM, A. B. C.; VAN DELDEN, A. J. The role of sound waves in sea-breeze circulation, Q. J. R. Meteorol. Soc., 125, 1997–2018, 1999.

TORRACA, H. B. B. Aplicação de Técnicas de Mineração de Dados na Avaliação da Relação das Condições Atmosféricas com as Concentrações de Particulados nas Estações de Copacabana e São Cristóvão. 2012.

VASCONCELOS, R. O. Modernização da Agricultura Irrigada no Agreste de Itabaiana-SE. Dissertação de Mestrado. 2013.

VINHOZA, A. J. C. S. Potencial Eólico Offshore no Brasil: Localização de Áreas Nobres através de Análise Multicritério. 2019.

WARD, J. H. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. Journal of the American Statistical Association 38, 301: 236-44. 1963.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Guidelines on the Calculation of Climate Normals. Genebra. 2017.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Guide to Instruments and Methods of Observation. Genebra. 2021.

YAMAZAKI, Y.; RAO, V.B. Tropical cloudiness over the South Atlantic Ocean, J. Met. Soc. Jap., 55(2), 205-207. 1977.