



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**EVENTOS SINÓTICOS ASSOCIADOS A INTERRUPÇÃO
DA GERAÇÃO DE ENERGIA APLICADO AO COMPLEXO
EÓLICO OMEGA – PAULINO NEVES, MA**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Werik Kaian Silva Rodrigues

Itajubá, MG, Brasil

2023

**EVENTOS SINÓTICOS ASSOCIADOS A INTERRUPÇÃO DA
GERAÇÃO DE ENERGIA APLICADO AO COMPLEXO
EÓLICO OMEGA – PAULINO NEVES, MA**

por

Werik Kaian Silva Rodrigues

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas.

Orientador: Arcilan Trevenzoli Assireu

**Itajubá, MG, Brasil
2023**

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Monografia

**EVENTOS SINÓTICOS ASSOCIADOS A INTERRUPÇÃO DA
GERAÇÃO DE ENERGIA APLICADO AO COMPLEXO EÓLICO
OMEGA – PAULINO NEVES, MA**

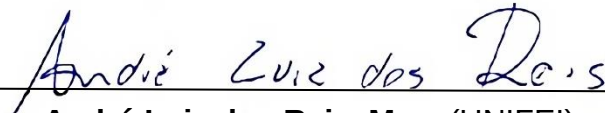
elaborada por

Werik Kaian Silva Rodrigues

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:



Arcilan Trevenzoli Assireu, Dr. (UNIFEI)
(Presidente/Orientador)

André Luiz dos Reis, Msc. (UNIFEI)

Vinícius Siqueira Oliveira Carvalho, Msc. (UNIFEI)

Itajubá, 20 de novembro de 2023.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Helen Maria e Wanderley Rodrigues, por tornarem possível todo o processo de graduação, acreditando e me incentivando em todos os momentos. Ao meu orientador Dr. Arcilan, pelas oportunidades, conhecimento e confiança entregues a min. Ao professor André Reis, por toda a paciência e ajuda em programação. A Todos os amigos que fiz ao decorrer da graduação, em especial aos remanescentes da turma de 2018, pelo suporte e momentos únicos que zelarei em minhas memórias com carinho. E a todos os professores que tive o prazer de compartilhar dúvidas e conhecimento ao decorrer da graduação.

Aos meus pais Helen Maria Silva Costa e
Wanderley Rodrigues da Costa

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

EVENTOS SINÓTICOS ASSOCIADOS A INTERRUPÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA APLICADO AO COMPLEXO EÓLICO

OMEGA – PAULINO NEVES, MA

AUTOR(A): WERIK KAIAN SILVA RODRIGUES
ORIENTADOR: ARCILAN TREVENZOLI ASSIREU
Local e Data da Defesa: Itajubá, 20 de novembro de 2023.

O estudo da ocorrência e influência de fenômenos meteorológicos em regiões costeiras do território brasileiro tem se mostrado um fator de grande importância no cenário atual. Fenômenos que interferem na dinâmica da atmosfera local favorecem a ocorrência de eventos atípicos, onde se tem a oscilação dos padrões de brisa marítima, o que pode acarretar a queda abrupta na velocidade do vento afetando a geração de energia eólica e a integridade dos aerogeradores. A ocorrência de tais fenômenos foram registrados no complexo eólico OMEGA, situado na cidade de Paulino Neves – MA. Estes eventos estão diretamente ligados aos sistemas sinóticos que influenciam a região, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e o gradiente de pressão entre o oceano e o continente. Durante o segundo semestre do ano de 2021, foram registrados um total de 28 eventos no local, com duração média de aproximadamente 1 hora e 54 minutos e ocorrência de maior frequência no período entre 6 e 7 horas da manhã. Tais eventos acarretaram a interrupção do funcionamento dos aerogeradores devido a abrupta diminuição da velocidade do vento. A pesquisa utilizou dados meteorológicos, incluindo dados de reanálise do ERA5, LIDAR e imagens de satélite, para avaliar as condições meteorológicas associadas a esses eventos. As composições geradas a partir dos registros indicaram a variação da direção e velocidade do vento, onde em junção com imagens de satélite, foi possível detectar a presença de nuvens no local, indicando a inibição da radiação solar alterando a fluxo da brisa marítima do local. Essas informações podem fornecer subsídios valiosos para a manutenção e o desempenho eficiente dos sistemas eólicos na região.

Palavras-chave: Processos sinóticos; Processos de mesoescala; Rampa de energia; Energia eólica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Intensidade do vento a partir do LIDAR em 20 diferentes alturas (40 a 260 m). Perfil vertical da intensidade (b) e da direção do vento (c). As cores no painel (a) trazem a intensidade do vento em m s^{-1} . FONTE: Assireu et al. (2022).....	3
Figura 2 - Ilustração do campo de pressão que gera a brisa marítima. FONTE: Adaptado de Simpson (1994).	4
Figura 3 – Representação esquemática da circulação	5
Figura 4 - Localização geográfica do ponto de interesse. O ponto vermelho indica o local da instalação da estação meteorológica e LIDAR onde foram registrados os eventos. Fonte: Autoria própria.	9
Figura 5 - Porcentagem de eventos registrados nos meses do estudo no ano de 2021. FONTE: Autoria própria.	14
Figura 6 - Frequência horária de eventos registrados. FONTE: Autoria Própria.....	14
Figura 7 - Média horária da intensidade do vento a 40 metros de altura (LIDAR), onde as barras verticais indicam os eventos registrados no local. FONTE: Autoria própria.	15
Figura 8 - Séries temporais do período de 19 a 23 de setembro para (a) temperatura do ar e (b) umidade relativa. As barras verticais tracejadas indicam o fenômeno meteorológico de interesse (21 de setembro, entre 07h00 e 08h30 LT). FONTE: Assireu et al. (2022).....	15
Figura 9 - Perfil vertical da componente zonal do vento (u), componente meridional (v) e velocidade vertical (w) para o dia anterior (23/09), durante (24/09) e posterior (25/09) ao evento a partir do modelo ERA5 para o pixel mais próximo do local. O eixo x se refere a pressão em hPa e o eixo y a hora local. FONTE: Autoria própria.	16
Figura 10 - Velocidade e direção do vento horário em 850 hPa e 100m (LIDAR) no dia 23 e 24 de setembro de 2021. FONTE: Autoria própria	17
Figura 11 - Velocidade e direção do vento horário em 1000 hPa e 100m e 40m (LIDAR) nos dias 22 e 21 de setembro de 2021. FONTE: Autoria própria.	18
Figura 12 - Condições da PNMM e escoamento em 1000 hPa para as 07 LT para seis dos eventos registrados. As linhas pretas são isóbaras, o shaded representa a velocidade do vento e os vetores representam o escoamento. FONTE: Autoria própria.....	19
Figura 13 – (a) Imagens projetadas com os canais visíveis do satélite GOES- 16 (RGB- True Color) e (b) imagens projetadas no canal infravermelho para o dia do evento (24-09), dia anterior e posterior ao registro. FONTE: Autoria própria.	20

Figura 14 - Imagens projetadas no canal infravermelho do satélite GOES- 16 (CH13) para uma série de eventos registrados. FONTE: Autoria própria.	21
Figura 15 – Composição da distribuição de temperatura (°C) obtida através do ERA5 para os dias 20, 21 e 22 de setembro de 2021. Imagens a), b) e c) indicam a climatologia de 20 anos de dados do local e imagens subsequentes são referentes aos dias mencionados. FONTE: Autoria própria.	23
Figura 16 – Representação gráfica da fração de cobertura de nuvens entre as 04 e 09 LT a partir do pixel mais próximo do ERA5. Linhas vermelhas indicam os dias dos eventos e linhas pretas os dias anteriores aos eventos. FONTE: Autoria própria.....	24
Figura 17 – Refletância (%) e temperatura de brilho (°C) sobre a região dos eventos registrados às 07 LT a partir de matrizes de dados obtidas pelo satélite GOES-16. FONTE: Autoria própria.	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de atributos relacionados ao LIDAR, presente nas campanhas do projeto EOSOLAR.....	10
Tabela 2 - Lista de atributos espectrais das bandas do ABI (The Advanced Baseline Imager) a bordo do satélite GOES-16.....	12

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ZCIT - Zona de convergência intertropical

ERA5 - Fifth Generation ECMWF Atmospheric Reanalysis

LIDAR - Light Detection and Ranging

GOES - Geostationary Operational Environmental Satellite

ABI - Advanced Baseline Imager

IR – Infrared

Vis - Visível

U – Componente u do vento

V – Componente v do vento

W – Componente vertical do vento

StCu – Estratocúmulus

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. BRISA MARÍTIMA E TERRESTRE.....	3
2.2. VENTOS ALÍSIOS	5
2.3. CLIMATOLOGIA DA REGIÃO	6
2.3. EFEITO RAMPA	6
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	7
3.1. ÁREA DE ESTUDO	8
3.2. DADOS OBSERVADOS.....	9
3.3. MODELO ERA5.....	10
3.4. OBSERVAÇÕES A PARTIR DO GOES-16	11
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
4.1. INTERPRETAÇÃO GERAL DOS DADOS	13
4.2. AVALIAÇÃO DOS EVENTOS REGISTRADOS.....	16
4.3. PADRÃO DE NUVENS DURANTE OS EVENTOS	20
5. CONCLUSÃO.....	26
6. REFERÊNCIAS	28

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, no Brasil, o desenvolvimento em áreas de pesquisa voltadas para a geração de energia de forma sustentável vem ganhando cada vez mais espaço. Nesse cenário, a geração de energia proveniente do potencial eólico vem se desenvolvendo de forma promissora; de acordo com o relatório GSR (Renewables 2022 Global Status Report), o Brasil se destaca na lista de países com a maior capacidade instalada, com valores inferiores a China e Estados Unidos. Neste âmbito, para obter um melhor aproveitamento, é de grande importância que se tenha total entendimento dos mecanismos ligados a essa geração.

Fenômenos associados a abrupta redução da velocidade do vento, além de ter grande influência na geração de energia eólica, também afetam de forma negativa a estrutura dos aerogeradores, acarretando a diminuição da vida útil de tais componentes (HARA; HAYASHI, 2012). Na região nordeste brasileira, onde dispõe a maior concentração de complexos eólicos de todo o país (LUCENA, 2019), tem-se a presença de diversos sistemas sinóticos responsáveis por proporcionar um ambiente favorável para tal geração. Os ventos alísios, sendo o principal e mais importante fator atuante na região (CORREIA et al., 2008), oferecem índices estáveis e consistentes, fazendo assim, com que a região se torne um dos principais focos de investimentos no setor eólico.

Os ventos alísios, por serem um mecanismo presente durante todo o ano na região nordeste (BRITO COSTA; FERNANDO; FONSECA LYRA, 2012), são alvos de amplos estudos referentes ao regime de chuvas na região. Por ser um dos fatores responsáveis pela formação da ZCIT (Zona de convergência intertropical), que tem grande influência sobre índices de nebulosidade registrados na região. Silva et al. (2002), mostraram que o fluxo dos ventos alísios tem grande influência também sobre a brisa marítima, podendo favorecer a penetração da mesma no continente. Em suma, os ventos alísios são um fator determinante para a circulação atmosférica da região, onde sua presença e influência é notável em grande parte dos sistemas atmosféricos atuantes na região do nordeste brasileiro (FERREIRA; GIOVANNI; MELLO, 2005).

O evento da brisa marítima é também um fenômeno atmosférico de grande relevância para o estudo do potencial eólico da região (SILVA et al., 2002). Conforme estudo realizado por Simpson (1994), a diferença de temperatura entre o oceano e o continente cria um gradiente de pressão, gerando ventos que sopram do oceano em direção à terra, fornecendo, assim, um potencial favorável para a produção de eletricidade. Além disso, possui também um papel fundamental na regulação térmica das áreas costeiras, atuando como um moderador das temperaturas e atuante nos regimes de chuva da região (SIMPSON, 1994). Estudo realizado por Silva et al. (2017) mostrou que a brisa marítima contribui para a formação de nuvens e para o aumento da precipitação na faixa litorânea do Nordeste, sendo um fator determinante para o equilíbrio hidrológico regional.

O conhecimento acerca de tais sistemas sinóticos é de grande importância, tendo em consideração as atividades de complexos eólicos presentes na região. A detecção de anomalias referentes a estes sistemas sinóticos representa uma informação altamente relevante para a manutenção e comportamento estável do sistema eólico, possibilitando uma melhor taxa de conversão de energia (DE QUEIROZ; BRASÍLIA, 2016).

Eventos meteorológicos, com duração aproximada de 1,5 horas (07:00h-08:30h), caracterizados por uma acentuada queda na velocidade do vento e mudança de direção, observados pela manhã durante o período de setembro a dezembro de 2021 (Figura 1) no complexo eólico OMEGA, localizado no município de Paulino Neves, MA (Figura 4), foram registrados durante campanhas realizadas pelo projeto EOSOLAR (ASSIREU et al., 2022), onde os indicativos analisados mostram a determinante influência dos distúrbios da brisa marítima em relação a dinâmica atmosférica do local.

Nesse sentido, o objetivo do presente estudo é investigar eventos sinóticos responsáveis pela abrupta diminuição da velocidade dos ventos e a interrupção da geração de energia no complexo eólico OMEGA localizado no município de Paulino Neves, MA. Para isso, serão analisados dados meteorológicos por meio de dados de reanálise do ERA5, LIDAR e imagens de satélite. Serão avaliadas as condições meteorológicas associadas a esses eventos.

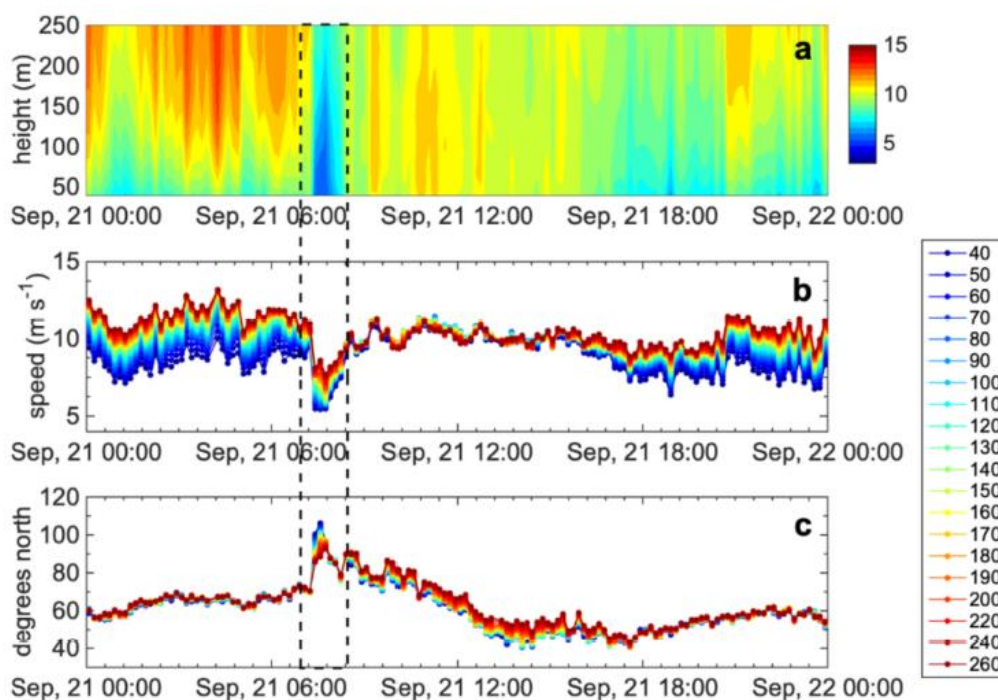


Figura 1 - (a) Intensidade do vento a partir do LIDAR em 20 diferentes alturas (40 a 260 m). Perfil vertical da intensidade (b) e da direção do vento (c). As cores no painel (a) trazem a intensidade do vento em m s^{-1} . FONTE: Assireu et al. (2022).

Espera-se que os resultados deste estudo possam contribuir para uma melhor compreensão dos impactos dos eventos sinóticos na geração de energia em complexos eólicos, permitindo o desenvolvimento de estratégias para minimizar esses efeitos e garantir a segurança energética em regiões afetadas por tais eventos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Brisa marítima e terrestre

A brisa marítima e a brisa terrestre são ventos advindos de regiões costeiras e estão associados a diferenças de temperatura estabelecidos entre a terra e o mar (SIMPSON, 1994).

Durante o dia a ocorrência da brisa marítima é causada pela diferença de aquecimento entre a terra e o mar, o sol aquece a superfície terrestre em taxa maior do que a água do mar. Em decorrência disso, o ar próximo à costa obtém valores de temperatura maiores e consequentemente se expande, tornando-se menos denso e

criando uma área de baixa pressão (FERREIRA; GIOVANNI; MELLO, 2005), promovendo o movimento do ar em direção a terra, criando a brisa marítima.

A brisa terrestre, por sua vez, ocorre predominante durante a noite (FERREIRA; GIOVANNI; MELLO, 2005), onde a terra sofre resfriamento em uma taxa maior que a água do mar, de modo que, se tem a inversão da direção do vento em relação ao dia. A terra, após atingir uma temperatura menor que a do mar, resulta em um gradiente de pressão. O ar mais quente adjacente à superfície do mar sobe e o ar mais frio sobre o continente flui em direção ao mar, formando a brisa terrestre (NNOCENTINI, 1921).

Tais padrões de brisa marítima e brisa terrestre são mais recorrentes em áreas costeiras onde devido ao relevo e a distribuição de terra e água torna propício a formação desse fluxo. Segundo Kousky (1980), a influência da brisa marítima no Nordeste do Brasil desempenha um papel significativo na determinação dos horários de maior ocorrência da precipitação. Além disso, o autor mostrou que a variação sazonal na direção dos ventos alísios resulta em alterações na região de convergência com a brisa marítima, o que determina a ocorrência de precipitação sobre o continente ou no oceano.

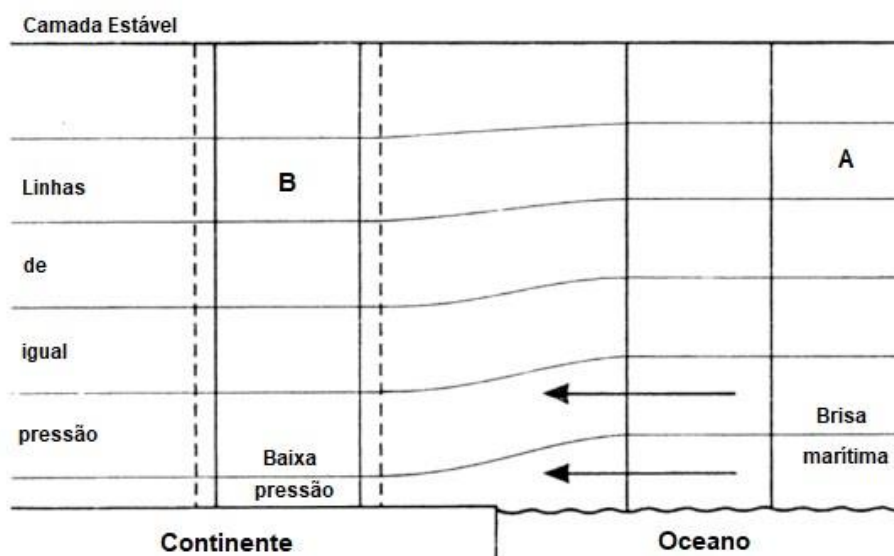


Figura 2 - Ilustração do campo de pressão que gera a brisa marítima. FONTE: Adaptado de Simpson (1994).

2.2. Ventos alísios

Os ventos alísios são descritos como correntes de vento perene que ocorre em regiões próximas ao equador. Têm grande influência nos padrões climáticos, circulação oceânica e navegação marítima.

Em latitudes próximas a 30°, parte do ar presente na superfície se move em direção a zonas equatoriais devido a menor pressão causada pela diferença de temperatura entre as regiões equatoriais e subtropicais, porém, em razão da força de Coriolis, esse fluxo é defletido, fazendo com que as correntes de ar presentes no hemisfério sul sejam direcionadas em sentido anti-horário e no hemisfério norte em sentido horário (Figura 3).

Kousky (1980) destacou a variação sazonal na direção dos ventos alísios, que afeta a região de convergência com a brisa marítima, resultando em mudanças na ocorrência de precipitação sobre o continente ou o mar.

McPhaden e Cane (2006) demonstraram também o importante papel dos ventos alísios na variabilidade climática. Suas análises também indicaram a influência dos ventos na circulação oceânica e os fenômenos climáticos como El Niño-Oscilação Sul (ENOS). O estudo destacou também a influência dos ventos alísios na interação entre o oceano e a atmosfera, onde desempenha um grande papel na transferência de calor, sendo um fator importante na modulação do clima regional e global.

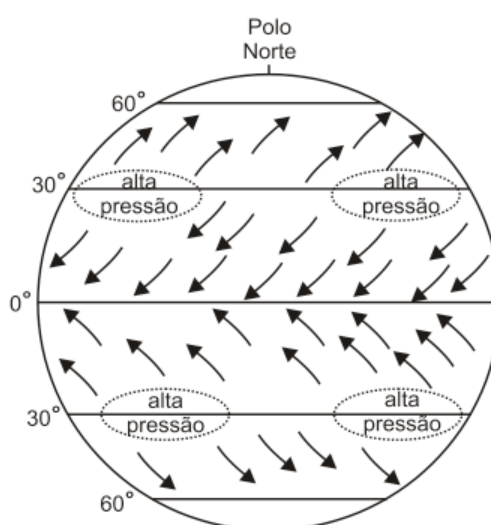


Figura 3 – Representação esquemática da circulação geral da atmosfera. Fonte: James (2021).

2.3. Climatologia da região

A climatologia da região costeira do Maranhão é caracterizada por uma série de fatores que a tornam única e influencia seu clima de maneira distinta. Localizado na região nordeste do Brasil e abrangendo uma extensa faixa costeira ao longo do Oceano Atlântico. A sua proximidade com a Linha do Equador resulta em altas temperaturas ao longo do ano, tornando-o parte da zona tropical do país.

O clima da região é determinado por um regime de chuvas sazonal, com uma estação chuvosa e uma estação seca bem definidas, onde de acordo com Corrêa et al. (2023), a região se enquadra na classificação climática como Clima Sub-Úmido Seco (C1) pela classificação de Thornthwaite.

Com estação chuvosa ocorrendo geralmente de janeiro a junho, quando a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) se move para o sul (REBOITA et al., 2016), trazendo chuvas intensas e frequentes. Durante a estação seca, que ocorre de julho a dezembro, a ZCIT se afasta para o norte, levando a um período de menor precipitação.

A região costeira do Maranhão, devido a sua proximidade com a linha do equador, experimenta altas temperaturas ao longo do ano, com médias mensais que podem superar os 30°C (CORRÊA, W., CARVALHO, M. W. L., & MENDES, T. J., 2023). Durante a estação chuvosa, a umidade do ar aumenta, contribuindo também para temperaturas mais elevadas. Também no período chuvoso se tem uma menor amplitude entre as temperaturas noturnas e diurnas, onde a nebulosidade do local exerce um papel importante na regulação da temperatura da região.

2.3. Efeito rampa

Os eventos de rampa na produção de energia eólica são caracterizados por mudanças súbitas na produção de energia num curto período, acarretando desafios significativos aos sistemas elétricos (FERREIRA et al., 2020). Tais eventos podem ser ocasionados por vários fenômenos meteorológicos, como sistemas de baixa pressão, frentes frias e saídas de tempestades, levando a eventos de aumento ou diminuição súbita da velocidade do vento. A ocorrência de fenômenos de rampa tem maior frequência em determinadas estações, como o inverno (PARSONS et al., 2020). O impacto dos eventos de rampa da energia eólica estende-se aos aspectos técnicos dos sistemas elétricos, afetando a qualidade da energia, a fiabilidade, a

segurança e a gestão da carga (YANG et al., 2016). Além disso, a integração da energia eólica na rede apresenta desafios na gestão dos eventos de rampa devido às limitações das unidades de energia tradicionais para lidar com as rápidas mudanças na produção de energia eólica (WANG et al., 2019). À medida que a implementação da energia eólica se expande, a gravidade do impacto dos eventos nos sistemas eléctricos também se intensifica (XU et al., 2014).

No cenário atual a investigação tem-se centrado na previsão de tais fenômenos com o propósito de permitir medidas proativas de gestão da rede (GALLEGO-CASTILLO et al., 2015; CAO et al., 2022). Várias metodologias, incluindo estratégias de pesquisa de similaridade baseadas em imagens e pós-processamento estatístico multivariado, como proposto por Worsnop (2018), foram desenvolvidas para a previsão de rampas de energia eólica. Além disso, foi explorado o desenvolvimento de modelos flexíveis e estratégias para responder de forma eficaz a eventos de rampa em diferentes escalas temporais. Sevlian & Rajagopal (2012) e Xu (2014) utilizaram técnicas de avaliação e detecção de riscos para analisar o impacto e as estatísticas dos eventos de rampa de energia eólica nos sistemas de energia.

Os eventos de rampa de energia eólica representam desafios complexos para os sistemas eléctricos, exigindo uma abordagem multidisciplinar que integre a meteorologia, as engenharias e a análise estatística para prever e mitigar os impactos no sistema.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Com o propósito de avaliar a relação entre a subsidência ocasionada pela brisa marítima, e a relação da nebulosidade e a variação dos parâmetros de brisa marítima no complexo eólico, análises foram feitas a partir de dados de reanálise do modelo ERA5, dados advindos do satélite GOES-16 e dados obtidos pelo LIDAR no local do evento, para o período entre 21 de setembro e 31 de dezembro de 2021, onde para a filtragem dos dados e seleção dos eventos, foram considerados os parâmetros de velocidade menor que 4 m/s, direção do vento maior que 90° e precipitação igual a zero.

3.1. Área de estudo

A região de estudo, situada no estado do Maranhão no nordeste brasileiro, nas proximidades do município de Paulino Neves, encontra-se em uma zona de baixa latitude, aproximadamente a 2° 42' de latitude sul e 42° 33' de longitude oeste (Figura 4). A caracterização climática da região é marcada por um clima quente e úmido (CORRÊA et al. 2023), com uma temporada de chuvas concentradas durante o verão. A costa do Maranhão se estende por aproximadamente 640 km (IBGE, 2023), apresentando fenômenos meteorológicos associados a processos costeiros.

Durante a estação seca, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) desloca-se para o norte, resultando em períodos de menor pluviosidade e umidade relativa, enquanto na estação chuvosa, a ZCIT migra para o sul, favorecendo a formação de nuvens e precipitações. A alternância da posição da ZCIT desempenha um papel crucial na definição das características climáticas e dinâmica da atmosfera local. A região também é fortemente influenciada pela interação entre a brisa marítima e os ventos alísios. A brisa marítima, um fenômeno comum nas áreas costeiras, é caracterizada pelo deslocamento do ar mais frio do oceano em direção à terra durante o dia, substituindo o ar mais quente que se encontra sobre a terra (SIMPSON, 1994), contribuindo para a moderação das temperaturas e o aumento da umidade na região.

Outra característica muito importante são os ventos alísios, sendo ventos regulares e persistentes que sopram dos trópicos em direção ao equador, exercendo uma influência constante sobre o clima local.

Além disso, a região costeira do Maranhão, devido à sua localização geográfica estratégica, apresenta um potencial significativo para estudos sobre os impactos na geração de energia eólica e mudanças climáticas.

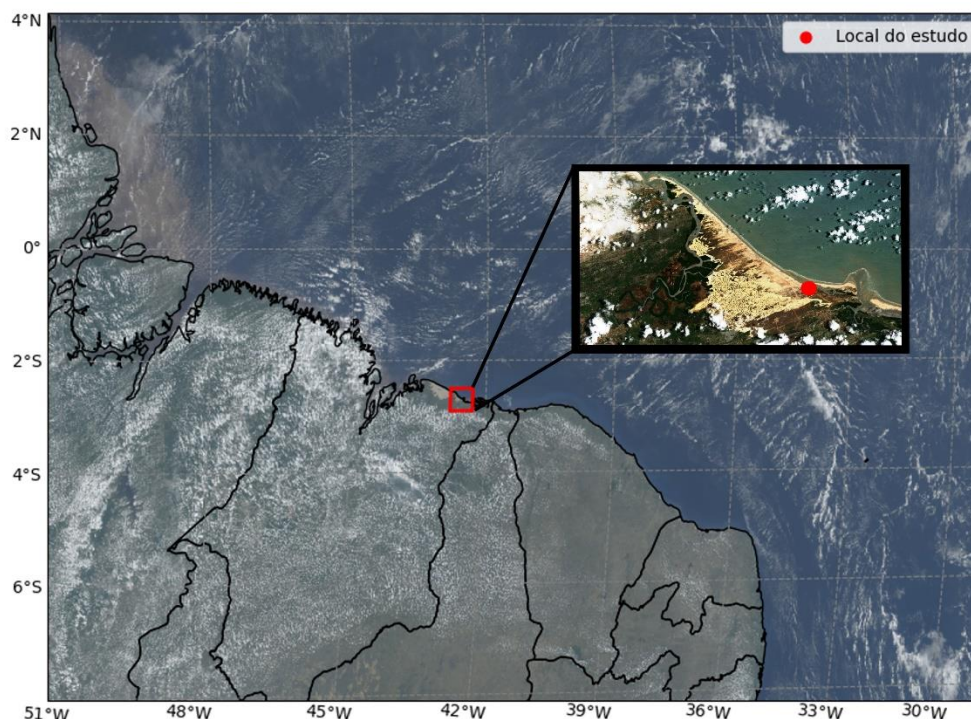


Figura 4 - Localização geográfica do ponto de interesse. O ponto vermelho indica o local da instalação da estação meteorológica e LIDAR onde foram registrados os eventos. Fonte: Autoria própria.

3.2. Dados observados

O presente estudo está inserido no âmbito do projeto “EOSOLAR: Prospecção dos recursos eólicos em uma região equatorial brasileira” (ASSIREU et al., 2022), os dados advindos do projeto foram coletados a partir de torres micro meteorológicas e LIDAR (Light Detection and Ranging) (Tabela 1) que oferece informações sobre perfis de vento medidos até 260m (Componentes U e V).

LIDAR é uma tecnologia de sensoriamento remoto que utiliza pulsos de luz laser para medir distâncias precisas e obter informações detalhadas sobre objetos e superfícies. Ele é amplamente utilizado em diversas aplicações, como mapeamento topográfico, monitoramento atmosférico, detecção de objetos em veículos autônomos, entre outros. O LIDAR é capaz de fornecer dados tridimensionais de alta resolução e é uma ferramenta valiosa em várias áreas da ciência e da engenharia.

Tabela 1 – Lista de atributos relacionados ao LIDAR, presente nas campanhas do projeto EOSOLAR.

Equipamento	Instrumentos	Variáveis	Altura das medições (m)	Frequência de Amostragem/Tempo-Resolução
LIDAR Modelo: Windcube V2/ Leosphere.	Estação Surface Comet PTH T3311 L (pressão, temperatura e umidade).	Perfilador de vento: velocidade, direção e turbulento intensidade.	20 níveis: 40 até 200 m, A cada 10 m. 220 até 260 m, a cada 20 m	5 s/10 min

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

3.3. Modelo ERA5

O modelo ERA5 (Fifth Generation ECMWF Atmospheric Reanalysis, v.5) é uma ferramenta que fornece dados horários da climatologia global a partir de 1959 até o presente, com uma resolução de grade de 0.25° de latitude e longitude. A reanálise consiste na combinação dos dados gerados pelo modelo com observações feitas em todo o globo, com o objetivo de auxiliar na descrição do ambiente atmosférico em escala sinótica. Essa combinação, conhecida como assimilação, segue a metodologia utilizada por centros numéricos de previsão do tempo, em que a cada 12 horas a previsão anterior é combinada com novas observações, resultando em uma estimativa mais precisa do estado da atmosfera. A reanálise funciona de maneira semelhante a esse método, mas com uma resolução reduzida, permitindo que os dados abranjam várias décadas. Os dados gerados pela reanálise são atualizados diariamente, com um atraso de aproximadamente 5 dias.

A partir do modelo ERA5, foram utilizados dados horários para a composição de perfis atmosféricos e análises de direção e intensidade do vento, divergência e Geopotencial. Esses dados foram empregados para a elaboração de composições, com base nos registros de ocorrência de eventos de abrupta redução do vento registrados no local do estudo. O objetivo foi obter uma análise mais detalhada do período dos eventos. Para a composição das imagens, foi utilizado a linguagem de programação Python juntamente com a biblioteca Matplotlib.

3.4. Observações a partir do GOES-16

O Advanced Baseline Imager (ABI) a bordo do Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) é um instrumento avançado que abrange várias faixas espectrais, incluindo as porções visível, infravermelho próximo e infravermelho (IR) do espectro eletromagnético. O mesmo é utilizado no satélite GOES-16, onde opera com 16 bandas espectrais (SCHMIT et al, 2012). Como é demonstrado na Tabela 2, cada uma das faixas espectrais tem um propósito principal bem definido, explorando diferentes comprimentos de onda para examinar diversas características da composição atmosférica.

Os canais 1, 2 e 3, como exemplo, são projetados para captar o reflexo visível da radiação solar na cor azul, vermelho e verde, respectivamente, com comprimentos de onda central de 0.47, 0.64 e 0.864 microns. Seu uso principal está relacionado ao monitoramento diurno de nuvens devido a sua notável resolução espacial, com destaque para o canal de 0.64 microns, com 500 m de resolução.

A análise qualitativa de nuvens em um conjunto de dados mais preciso é impulsionada pela refletância, um atributo particularmente eficaz no espectro visível disponibilizado pelo GOES-16, para distinguir informações diversas, como nuvens e a superfície terrestre. Essa distinção é crucial para a compreensão detalhada das características atmosféricas, onde tem implicações significativas em estudos relacionados ao clima e à meteorologia.

No presente estudo, imagens foram geradas utilizando os canais do visível (1,2 e 3), onde a partir da junção e tratamento destes, foi obtido imagens em cor real (RGB – True color) do satélite GOES-16, para se ter um melhor entendimento da cobertura de nuvens no local. Também foram utilizados dados provenientes do canal 13 (IR) do satélite, a fim de obter resultados relacionado a temperatura e altura e classificação de nuvens presente na região.

Tabela 2 - Lista de atributos espectrais das bandas do ABI (The Advanced Baseline Imager) a bordo do satélite GOES-16.

Canais	Comprimento de onda central (μm)	Espaçamento entre pixels de subponto (km)	Nome descritivo
1	0.47	1	Azul
2	0.64	0.5	Vermelho
3	0.864	1	Vegetação
4	1.373	2	Cirrus
5	1.61	1	Neve/gelo
6	2.24	2	Tamanho das partículas da nuvem
7	3.90	2	Janela de onda curta
8	6.16	2	Vapor de água em nível superior
9	6.93	2	vapor de água em nível médio
10	7.34	2	vapor de água em nível baixo/médio
11	8.44	2	Fase do topo da nuvem
12	9.61	2	Ozônio
13	10.33	2	Janela de onda longa limpa
14	11.21	2	Janela de onda longa
15	12.29	2	Janela de onda longa suja
16	13.28	2	CO2

Fonte: Adaptado de Timothy J. S. et al. (2017)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o segundo semestre de 2021, abrangendo os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, é comum ocorrerem episódios de diminuição súbita da velocidade dos ventos e de curta duração nas proximidades das áreas influenciadas pela circulação da brisa marítima. A ocorrência de tais eventos na região costeira do nordeste brasileiro é alvo de estudos devido aos seus impactos relacionados a geração de energia eólica, porém, surpreendentemente carecem de registros na literatura científica. O propósito deste estudo é abordar uma série de eventos registrados e abordados inicialmente pelo projeto EOSOLAR (ASSIREU et al., 2022). A seção subsequente se concentrará na análise da dinâmica dos ventos na região e os princípios físicos que se demonstraram fatores de grande importância para o desencadeamento dos eventos registrados.

A partir das informações da dinâmica da atmosfera local, já compreendida de forma abrangente para o período do verão e outono, onde os padrões de circulação atmosférica são fortemente influenciados pelo estado e localização da ZCIT (SCHNEIDER et al., 2014), as análises foram feitas com ênfase para o segundo semestre do ano de 2021 referentes ao período entre 21 de setembro e 31 de dezembro, onde a ocorrência dos distúrbios registrados não é compreendida de forma ampla na literatura.

4.1. Interpretação geral dos dados

Durante o período do segundo semestre de 2021 entre setembro e dezembro, identificou-se um total de 28 ocorrências de diminuição abrupta da velocidade do vento na região, com duração média de aproximadamente 1h54min.

Como demonstrado nas Figuras 5 e 6, foi contabilizado os registros de ocorrência dos eventos referentes ao período entre as 00:00 e 12:00 local, com destaque para os meses de outubro e dezembro, onde foram obtidos um volume maior de registros. O menor valor registrado em setembro é devido ao início dos registros não englobarem a totalidade dos dias do mês de em questão. Ademais, com exceção a setembro, a ocorrência dos eventos se mostrou mais homogênea, contabilizando um total de 2 eventos em setembro, 9 em outubro, 10 em novembro e 7 em dezembro.

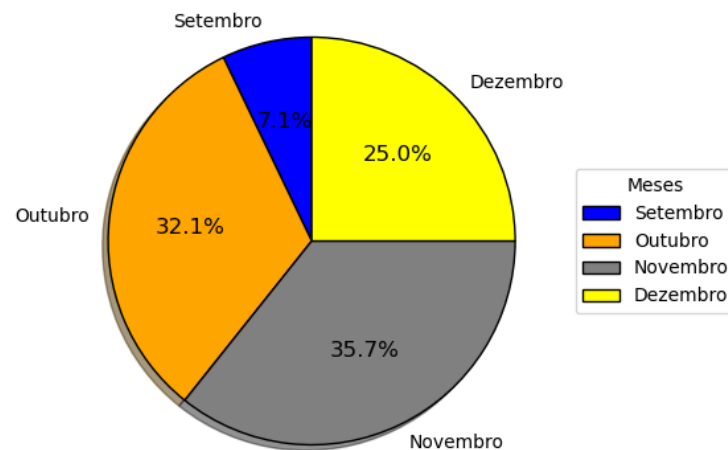


Figura 5 - Porcentagem de eventos registrados nos meses do estudo no ano de 2021. FONTE: Autoria própria.

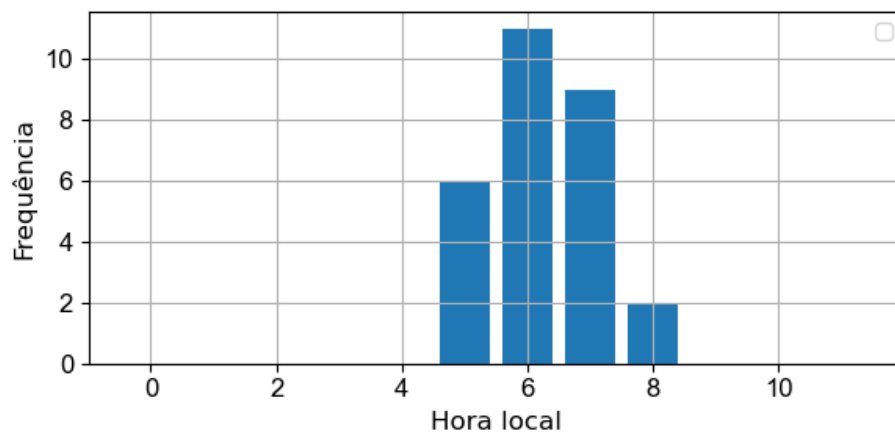


Figura 6 - Frequência horária de eventos registrados. FONTE: Autoria Própria.

Avaliando a frequência de ocorrência horária dos eventos, observa-se o maior volume de registros são referentes às 6 e 7 horas da manhã, indicando uma possível relação da dinâmica da circulação local, referente a transição noite-dia, onde a circulação atmosférica é afetada pela diferença de temperatura entre a terra e o mar.

A partir da Figura 7, utilizando a média horária obtida através dos dados registrados pelo LIDAR no local, é possível verificar a velocidade do vento em 40 metros de altura durante período referente de setembro e novembro, onde os registros listados se destacam entre os demais de menor valor de velocidade média do vento.

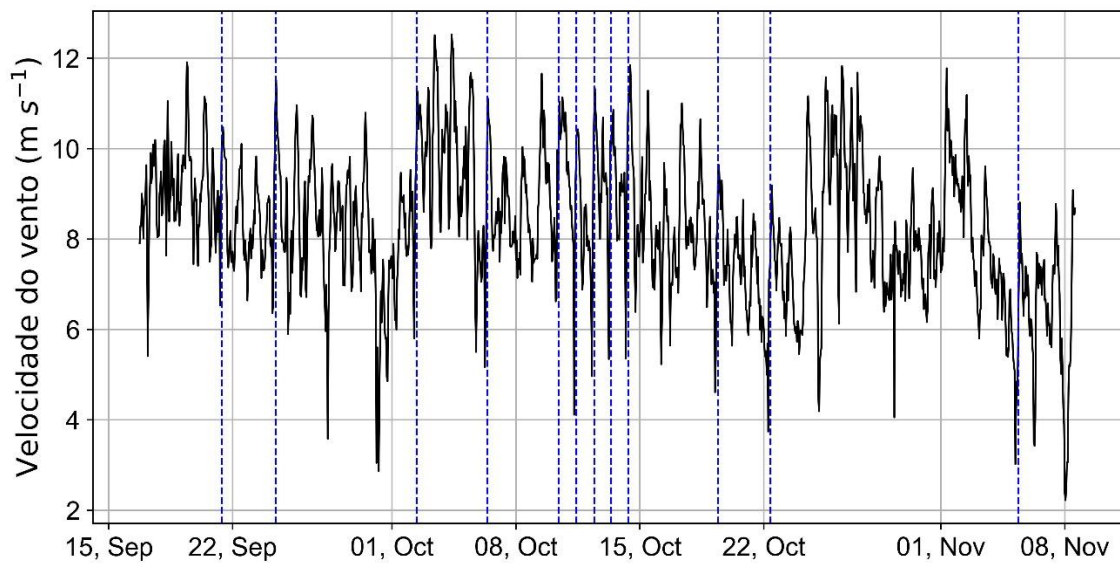


Figura 7 - Média horária da intensidade do vento a 40 metros de altura (LIDAR), onde as barras verticais indicam os eventos registrados no local. FONTE: Autoria própria.

Durante uma das campanhas realizadas no domínio do projeto EOSOLAR (ASSIREU et al., 2022), que se estendeu entre as 19 a 23 de setembro de 2021, os dados coletados demonstraram uma queda abrupta na velocidade do vento em um curto espaço de tempo, com variações significativas em sua direção. A magnitude dessa diminuição na velocidade do vento e a rapidez com que ocorreu podem ser observadas na Figura 8.

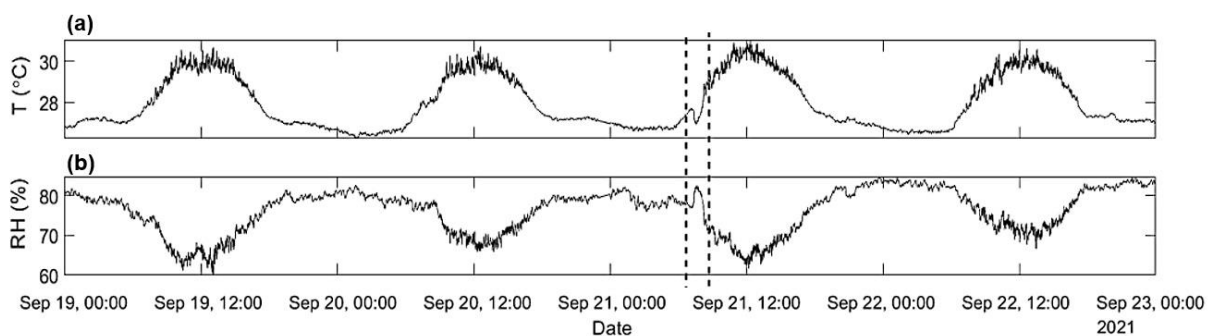


Figura 8 - Séries temporais do período de 19 a 23 de setembro para (a) temperatura do ar e (b) umidade relativa. As barras verticais tracejadas indicam o fenômeno meteorológico de interesse (21 de setembro, entre 07h00 e 08h30 LT). FONTE: Assireu et al. (2022).

A relação com outras variáveis meteorológicas, como o aumento da umidade e temperatura, é um forte indicativo de que essa redução na velocidade do vento não é um fenômeno isolado, mas sim parte de um sistema meteorológico complexo que envolve interações entre diferentes parâmetros atmosféricos.

Embora a ocorrência de ventos fracos não seja incomum na região, a combinação de fatores observada neste evento em particular, juntamente com os demais registros, aponta distúrbios possivelmente desencadeados por sistemas de mesoescala presentes na região.

4.2. Avaliação dos eventos registrados

A Figura 9 apresenta as componentes zonal (u) e meridional (v) do vento, juntamente com a velocidade vertical (w), observados a partir de dados referentes ao ERA5 dos dias 23, 24 (Evento entre 06:00 e 07:00 LT) e 25 de setembro, onde a análise da atmosfera entre 1000 hPa (cerca de 100 m) e 850 hPa (cerca de 1500 m), revela uma clara assinatura do ciclo diurno nas componentes zonal (U) e meridional (V).

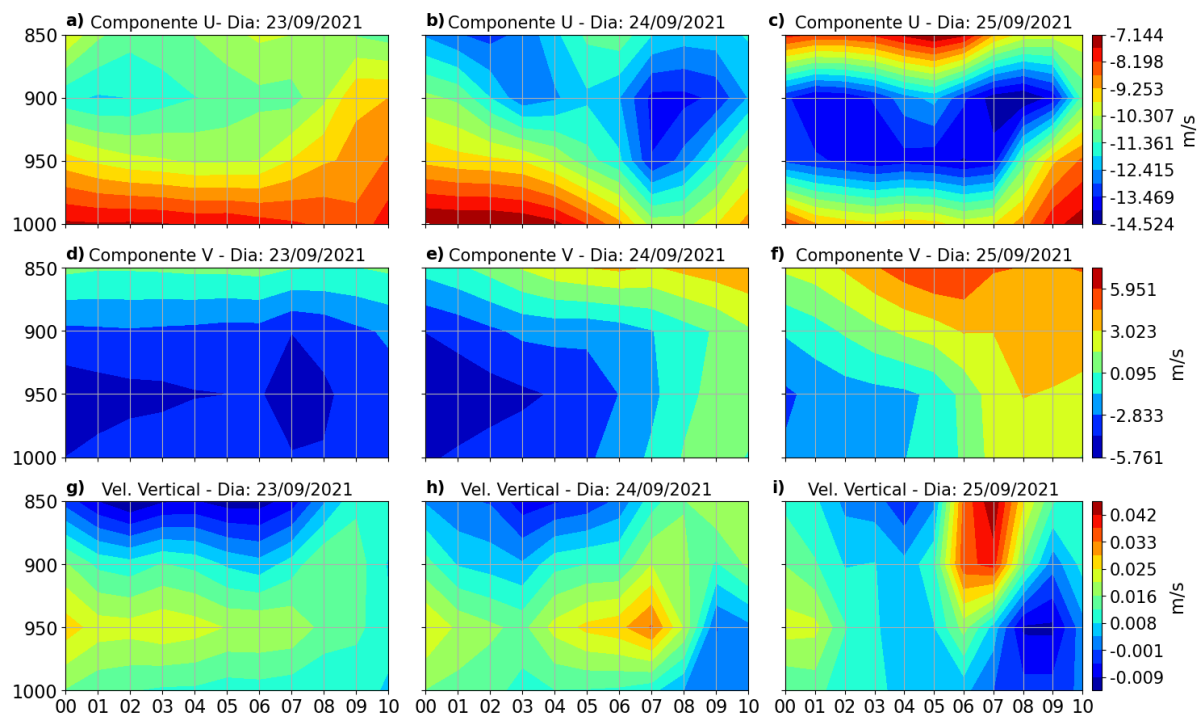


Figura 9 - Perfil vertical da componente zonal do vento (u), componente meridional (v) e velocidade vertical (w) para o dia anterior (23/09), durante (24/09) e posterior (25/09) ao evento a partir do modelo ERA5 para o pixel mais próximo do local. O eixo x se refere a pressão em hPa e o eixo y a hora local. FONTE: Autoria própria.

Nos níveis próximos à superfície, o ciclo diurno é evidenciado em todos os campos. A componente V, por sua vez, ganha destaque, uma vez que seu fluxo segue perpendicular à costa, o que a torna um indicador mais notável da brisa

marinha. Nota-se que tanto para a componente V quanto para a componente U, o fluxo do vento alísio se torna perceptível entre 900 hPa (cerca de 1000 m) e a superfície, onde a direção predominante nordeste é confirmada (componentes U e V negativas). Durante o período do evento (Dia 24) das 6 às 8 da manhã, é possível destacar valores de velocidade vertical positivos presentes em níveis próximos à superfície e níveis adjacentes, o que favorece o transporte de ar úmido para níveis superiores, corroborando com a possível influência da presença de nuvens no local. Tal padrão foi verificado em 91% dos eventos registrados.

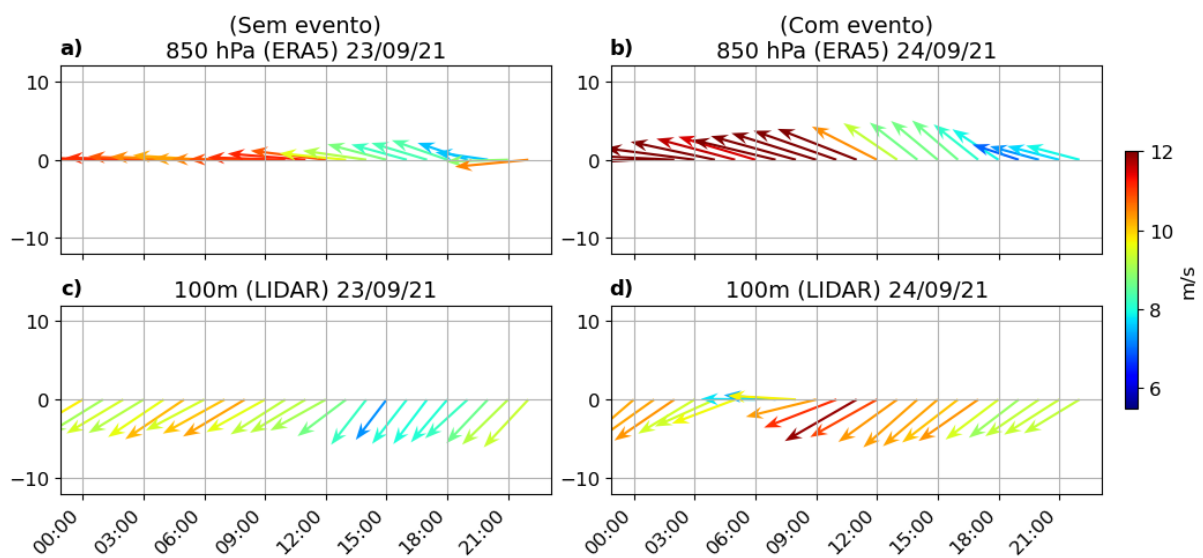


Figura 10 - Velocidade e direção do vento horário em 850 hPa e 100m (LIDAR) no dia 23 e 24 de setembro de 2021. FONTE: Autoria própria

A Figura 10 proporciona uma representação visual da direção e da velocidade do vento ao longo do decorrer do 24 de setembro através de um hodógrafo, onde também foi registrado uma variação abrupta nos padrões médios dos parâmetros mencionados. Para melhor compreensão, o dia anterior ao evento foi utilizado para comparação entre os valores obtidos. A partir dos registros referentes ao evento, é possível notar a variação da direção do vento no período do evento, das 6 horas às 9 horas da manhã para os valores registrados pelo LIDAR a 100m de altura, onde o fluxo de direção leste prevalece.

Em 850 hPa, o fluxo se manteve de forma constante durante todo o período, com exceção do intervalo entre as 18 e 23 horas, onde há uma pequena mudança nos padrões, porém, o mesmo pode ser observado no mesmo intervalo do dia anterior ao evento, o que pode ser explicado por alterações nos campos de

temperatura recorrentes durante tal período do dia, que por sua vez, exercem grande influência no fluxo dos ventos alísios da região. Em 100m, o mesmo padrão pode ser observado nos demais registros dos eventos, onde a variação abrupta da direção do vento se faz presente em sua grande maioria.

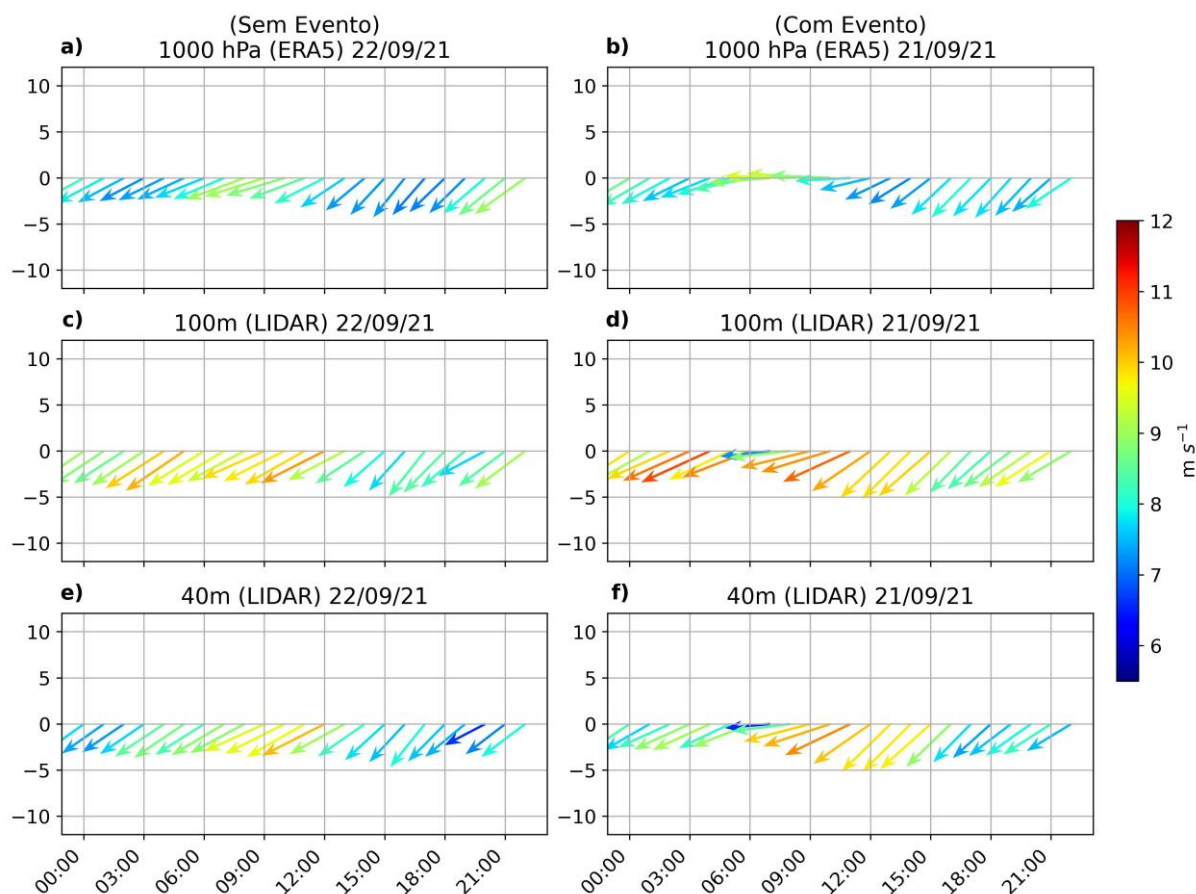


Figura 11 - Velocidade e direção do vento horário em 1000 hPa e 100m e 40m (LIDAR) nos dias 22 e 21 de setembro de 2021. FONTE: Autoria própria.

Para ambos os eventos (Figura 10-11), é possível identificar com clareza a mudança no padrão de vento em todos os níveis no dia do evento, compreendido entre as 06h00 e as 09h00 (LT), onde prevalece predominantemente o vento vindo do quadrante Nordeste, originário do oceano. Os dados demonstram uma notável consistência na direção e na intensidade do vento ao longo do dia, o que é essencial para uma compreensão abrangente da dinâmica atmosférica na região durante o período em foco.

Entre as 06h00 e as 09h00 (LT), observa-se uma mudança gradual na direção do vento, com rotação no sentido horário, longo do quadrante, que posteriormente se alinha paralelamente à linha costeira. Durante esse período, registra-se a

diminuição da velocidade do vento, porém, logo após tal período, há a tendência de o fluxo retornar aos padrões resultantes da interação dos ventos alísios com a brisa marítima, no sentido anti-horário.

A análise da evolução diurna do vento de superfície, estimada a partir dos dados do ERA-5, revelou uma notável congruência com as observações obtidas pelas medições obtidas através do LIDAR. A excelente correspondência entre os dados do ERA-5 e a velocidade do vento observada, como ilustrado nas Figuras 10 e 11, se mostrou como sendo uma ótima ferramenta para representar de maneira precisa a complexa interação entre os ventos alísios e os distúrbios relacionados a brisa marítima próximo à superfície.

Além disso, é importante destacar que essa notável congruência entre os dados estimados do ERA-5 e as medições reais do vento reforça a utilidade e a confiabilidade desse modelo na previsão e na compreensão das condições atmosféricas locais.

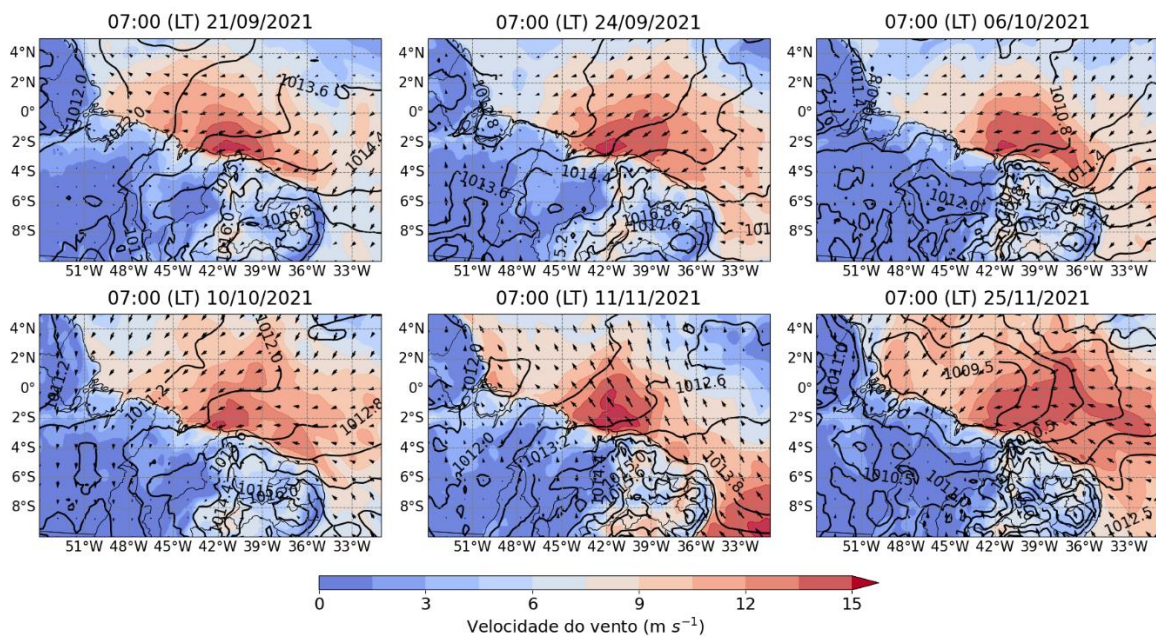


Figura 12 - Condições da PNMM e escoamento em 1000 hPa para as 07 LT para seis dos eventos registrados. As linhas pretas são isóbaras, o shaded representa a velocidade do vento e os vetores representam o escoamento. FONTE: Autoria própria.

Na Figura 12, é observável o padrão do fluxo horizontal, velocidade do vento em 1000 hPa e pressão reduzida ao nível médio do mar (PNMM). Nota-se que os ventos mais fortes se concentram ao longo do oceano em todos os casos, com destaque para a região adjacente ao local dos eventos. Essa condição favorece o

transporte de umidade presente no oceano para o continente. É possível notar também um gradiente de pressão mais acentuado a leste e a diminuição dos valores das isóbaras a noroeste da região em questão, o que corrobora com a climatologia das componentes U e V do local, devido a forte influência dos ventos alísios (FERREIRA; GIOVANNI; MELLO, 2005).

4.3. Padrão de nuvens durante os eventos

Para a análise da cobertura de nuvens na região, foram utilizadas imagens dos satélites da série GOES-16, obtidas através dos canais visível e infravermelho, onde foram projetadas com o propósito de monitorar nuvens no período relativo aos eventos. As imagens foram empregadas para uma análise visual e para distinguir as diferentes fases das nuvens. A Figura 13 (a) apresenta imagens resultantes da combinação dos canais 1, 2 e 3 (Tabela 2), representando a cor azul, vermelha e verde, respectivamente. Formando uma representação equivalente a uma imagem de cores reais do satélite GOES-16.

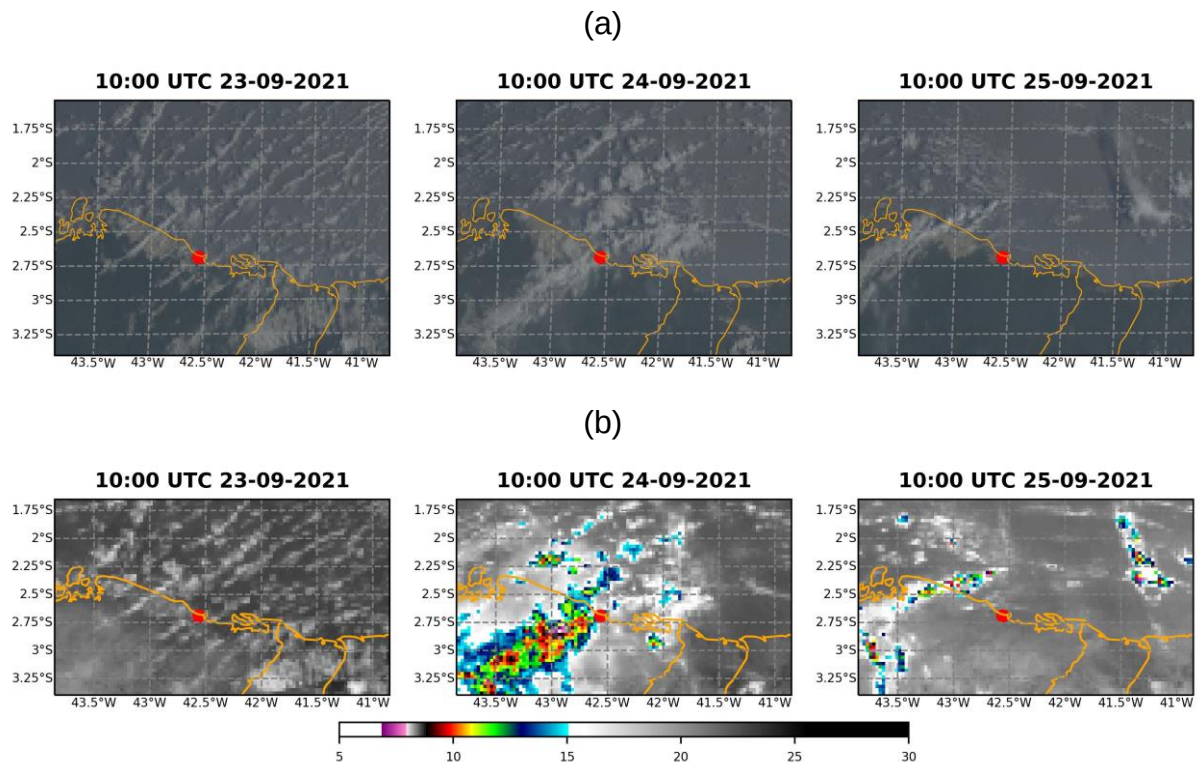


Figura 13 – (a) Imagens projetadas com os canais visíveis do satélite GOES- 16 (RGB- True Color) e (b) imagens projetadas no canal infravermelho para o dia do evento (24-09), dia anterior e posterior ao registro. FONTE: Autoria própria.

Para a Figura 13 (b) e Figura 14, o canal 13 (IR) do satélite foi utilizado a fim de compreender melhor os padrões de nebulosidade da região no período temporal de interesse. Neste contexto, as nuvens de maior altitude, devido a sua baixa radiância no canal IR são destacadas por cores mais claras, neste caso, um esquema de cores foi utilizado para destacar os pontos de menor temperatura. De forma similar, as nuvens mais baixas podem ser detectadas na região, por serem mais quentes, aparecem em tonalidades mais escuras nas imagens.

As nuvens aparecerão como regiões mais frias nas imagens do IR, uma vez que elas refletem menos radiação IR do que a superfície terrestre. Desta forma, as nuvens geralmente parecerão mais frias do que a superfície da Terra na imagem.

Na Figura 13, no dia 24 (evento), é possível observar a presença de nuvens cumulus sobre a região do evento, destacando a influência das condições meteorológicas na dinâmica atmosférica local. Neste contexto, a presença de linhas de nuvens sobre a região favorece o bloqueio solar, fazendo assim com que o início do fluxo da brisa marítima seja retardado devido ao gradiente mais tênue de temperatura terra-mar, o que pode resultar em uma brisa nula ou até mesmo em uma brisa terrestre. Isso ocorre devido às condições específicas que afetam a circulação atmosférica regional.

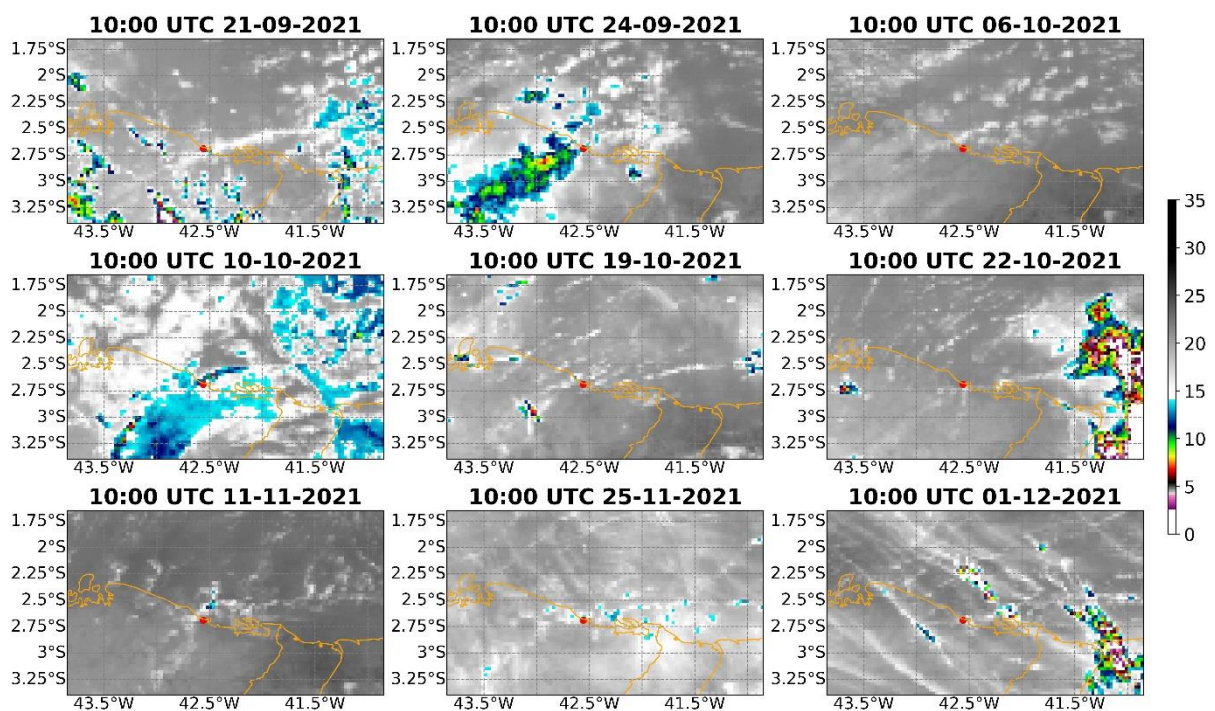


Figura 14 - Imagens projetadas no canal infravermelho do satélite GOES- 16 (CH13) para uma série de eventos registrados. FONTE: Autoria própria.

No contexto mencionado, a atenuação da radiação solar se refere ao impedimento da luz solar direta de atingir a superfície terrestre devido à presença de nuvens. Quando as nuvens se formam e se estendem a leste, bloqueando a incidência direta do Sol sobre a área de estudo, isso tem grande efeito sobre os padrões de temperatura e fluxo do vento local.

O mesmo pode ser aferido através da Figura 14, onde padrões de cobertura de nuvem similares podem ser confirmados na maioria dos eventos registrados. Os padrões encontrados são fundamentais para a compreensão das variações da dinâmica da atmosfera local e têm implicações significativas nas condições meteorológicas regionais, influenciando não apenas o início da brisa marítima, como também outros fenômenos atmosféricos (ATKINS NT, 1995). Portanto, a análise da cobertura de nuvens desempenha um papel fundamental na pesquisa relacionada ao clima e ao tempo na região de estudo.

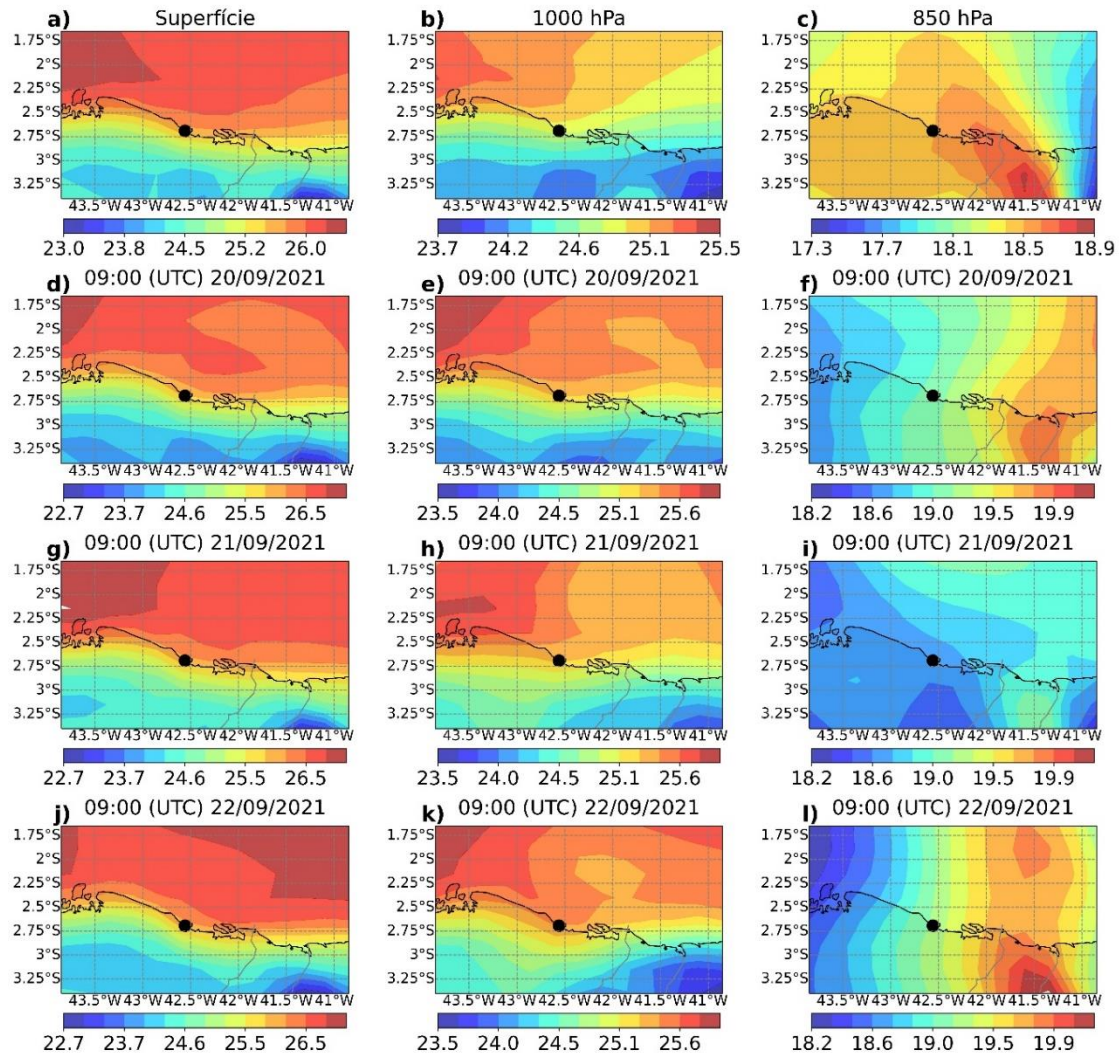


Figura 15 – Composição da distribuição de temperatura (°C) obtida através do ERA5 para os dias 20, 21 e 22 de setembro de 2021. Imagens a), b) e c) indicam a climatologia de 20 anos de dados do local e imagens subsequentes são referentes aos dias mencionados. FONTE: Autoria própria.

A partir da Figura 15, nota-se variações menos tênues no gradiente de temperatura no dia do evento (21 de setembro) em comparação ao dia posterior e anterior ao mesmo, com destaque para os níveis de 1000 hPa (100m) e superfície, o que pode ser considerado um indicativo de grande influência na intensidade e direção da brisa marítima. Neste caso, sendo associado a uma brisa mais fraca devido ao gradiente menos acentuado, que por sua vez influencia diretamente a intensidade e direção do vento no local. Portanto, a direção predominante é modulada majoritariamente pelos ventos alísios durante o evento, fazendo assim com que fluxos provenientes de SW tenham grande impacto na dinâmica do local.

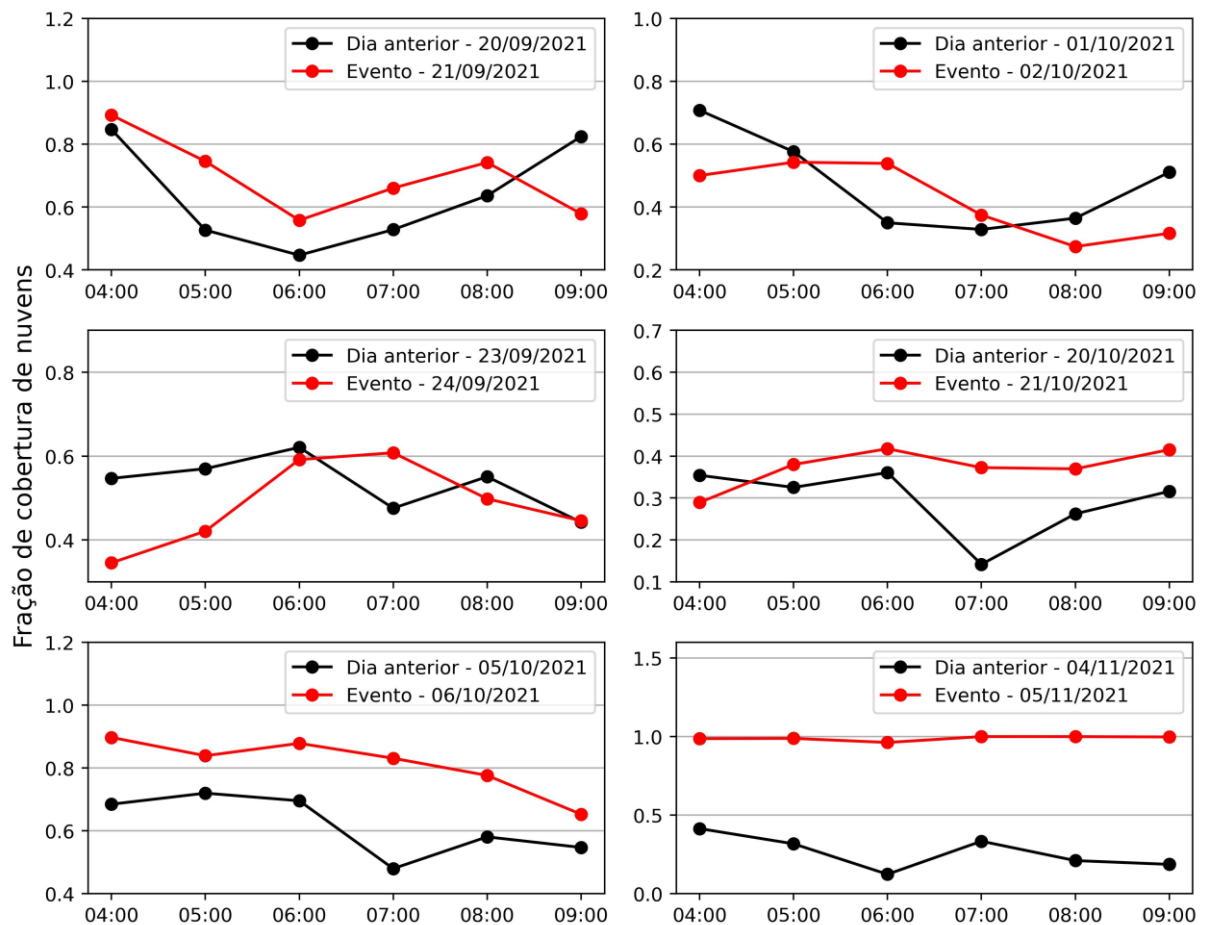


Figura 16 – Representação gráfica da fração de cobertura de nuvens entre as 04 e 09 LT a partir do pixel mais próximo do ERA5. Linhas vermelhas indicam os dias dos eventos e linhas pretas os dias anteriores aos eventos. FONTE: Autoria própria.

A Figura 16 mostra a fração total de cobertura de nuvens para 6 dos 28 eventos registrados no local entre as 4 e 9 horas (LT). Em comparação com os dias anteriores aos registros, é possível observar de forma geral que se tem valores maiores da fração de cobertura de nuvens, com destaque para os horários relativos aos eventos, entre 6 e 7 horas (LT), corroborando com os resultados encontrados através da Figura 14, onde é notável a presença de nebulosidade mais acentuada no dia em destaque.

Dessa forma, nota-se que há uma diferença média de aproximadamente 20% a mais da fração total de cobertura de nuvens para os dias em que houve o registro dos eventos, isso demonstra que a presença de nuvens em regiões costeiras pode afetar a intensidade e o ritmo da brisa marítima, que por sua vez exerce um papel importante no efeito de Convergência em tal região (MILLER et al., 2003). Portanto, um dos principais mecanismos responsáveis pela advecção e formação de nuvens

no local, a brisa marítima, também demonstra ser altamente influenciado pela presença de convecção e formação de nuvens em regiões circundantes.

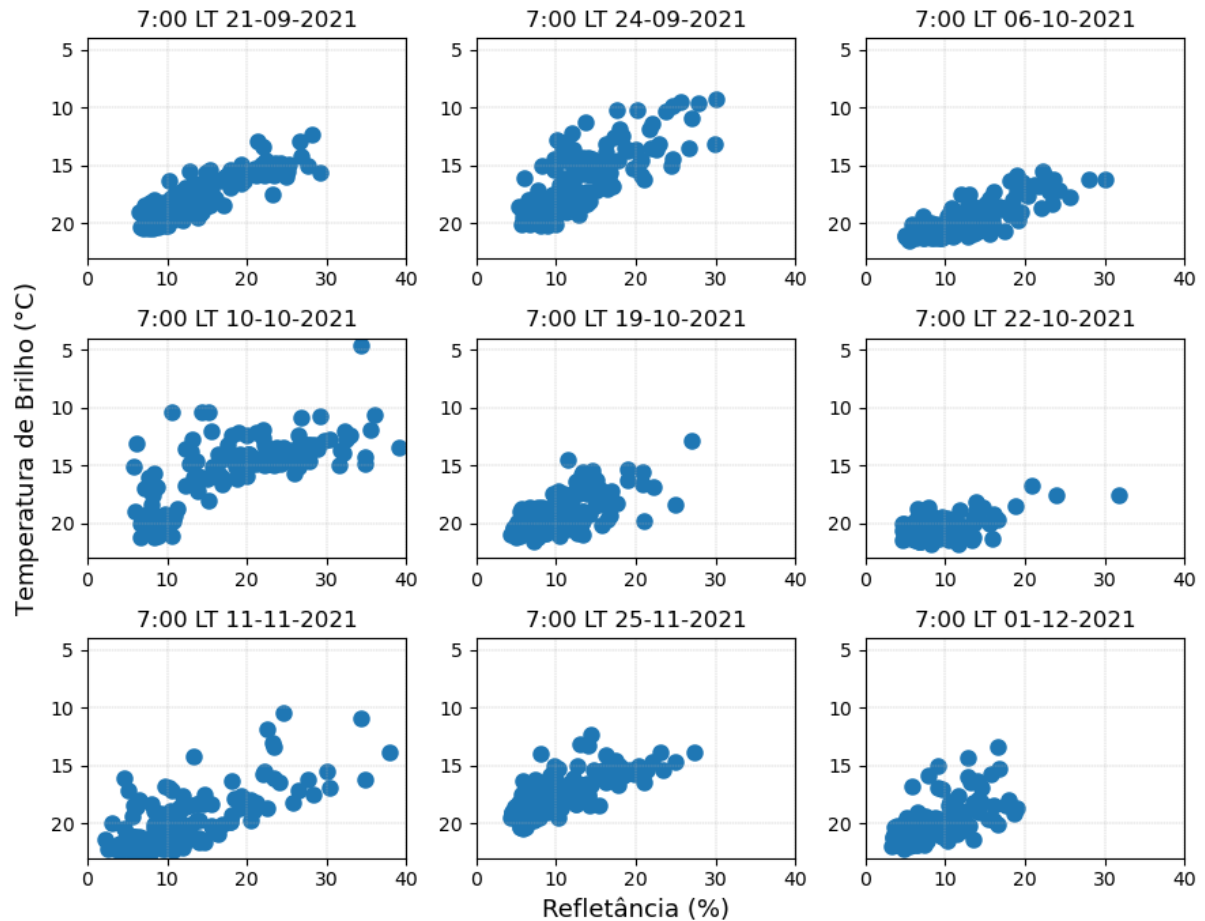


Figura 17 – Refletância (%) e temperatura de brilho (°C) sobre a região dos eventos registrados às 07 LT a partir de matrizes de dados obtidas pelo satélite GOES-16. FONTE: Autoria própria.

A Figura 17 apresenta uma análise da refletância e temperatura de brilho dos nove registros apresentados anteriormente na Figura 12, através do canal visível e IR do GOES-16, focalizando-se na classificação das nuvens no local para o horário das 7:00 LT.

É possível identificar consistentemente que a faixa de temperatura de brilho em todos os casos se manteve aproximadamente entre 10 e 20 °C a uma refletância entre 5 e 30%, indicando fortemente a presença predominante de nuvens do tipo estratocúmulos (StCu), corroborando com análises anteriores. Tais nuvens são caracterizadas pela aparência em camadas ou aglomerados, comumente associados a céus parcialmente nublados ou cobertos. Essas nuvens tendem a se formar em altitudes médias a baixas na atmosfera, exibindo uma estrutura

relativamente uniforme e com uma densidade moderada (J.O. AYOADE, 2003). Portanto, a temperatura de brilho na faixa analisada sugere a presença de nuvens StCu em altitudes intermediárias no local, não alcançando as camadas mais altas da atmosfera, indicando também uma quantidade moderada de partículas de água ou gelo, refletindo uma quantidade significativa, mas não excepcional, da luz solar para o horário em questão.

5. CONCLUSÃO

Este estudo avaliou as características sinóticas de eventos atípicos responsáveis pela abrupta diminuição da velocidade dos ventos e a interrupção da geração de energia no complexo eólico OMEGA registrados no ano de 2021 a partir de torres meteorológicas. Para tal análise, dados meteorológicos provenientes de reanálise do ERA5, LIDAR e imagens de satélite do GOES-16 foram utilizados. Dessa forma, foi possível destacar a interação da brisa terrestre e marítima, prevista para os eventos, e a nebulosidade presente no local. Tal análise se mostrou uma boa aproximação para explicar a queda súbita de intensidade e mudança de direção dos ventos observadas na região. O gradiente de temperatura relativamente mais tênue nos dias dos eventos, conforme observado nos dados do ERA-5, se mostra também um indicador importante para futuras análises de demais eventos registrados.

A influência recíproca entre a brisa marítima, um dos principais mecanismos responsáveis pela advecção e formação de nuvens na área de estudo, e a ocorrência de convecção e formação de nuvens em regiões vizinhas se destaca como um aspecto de significativa relevância na dinâmica atmosférica local. A presença de nuvens estratocúmulus durante as primeiras horas da manhã, quando posicionadas de forma a bloquear a radiação solar, atrasam o início da brisa marítima, comparado aos dias em que não se tem a presença dessa banda de nebulosidade no horário dos eventos. Esse atraso acarretou a mudança no padrão do vento a níveis mais baixos, resultando em um desvio do fluxo dos ventos na região, que normalmente sopram do nordeste, para uma direção leste-sudeste.

Os resultados demonstram que é de suma importância identificar os principais padrões sinóticos durante os dias em que ocorrem os chamados efeito rampa em parques eólicos, pois demonstra ser fundamental na formulação de ferramentas para

prever tais eventos com antecedência. Uma abordagem multidisciplinar é crucial para criar sistemas elétricos mais resilientes e eficientes, capazes de lidar com os desafios que os eventos de rampa de energia eólica apresentam, fornecendo subsídios valiosos para a manutenção e o desempenho eficiente dos sistemas eólicos na região.

6. REFERÊNCIAS

- ASSIREU, A. T. et al. EOSOLAR Project: assessment of wind resources of a coastal equatorial region of Brazil—Overview and preliminary results. **Energies**, v. 15, n. 7, 2022.
- ATKINS NT, WAKIMOTO RM, WECKWERTH TM. Observations of the sea-breeze front during CaPE. **Part II: DualDoppler and Aircraft Analysis, Monthly Weather Review**, p. 944–969, 1995.
- BRITO COSTA, G.; FERNANDO, R.; FONSECA LYRA, D. A. Análise dos padrões de vento no estado de alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2012.
- CORREIA DE MARCHI, A. et al. Estudo climatológico da velocidade e direção do vento através dos dados de reanálises para o estado de alagoas. **Sociedade brasileira de agrometeorologia**, 2009.
- CORRÊA, W., CARVALHO, M. W. L., & MENDES, T. J. Atualização da classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado do Maranhão. **Revista brasileira de climatologia**, n. 32, p. 517–543, 2023.
- DE QUEIROZ, R.; ALMEIDA. Modelagem de uma turbina eólica em escala reduzida e controle da velocidade de rotação via planicidade diferencial. **Universidade De Brasília Faculdade De Tecnologia**, 2016.
- FERREIRA, A. G.; GIOVANNI, N.; MELLO, S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.
- FERREIRA, C., GAMA, J., MATIAS, L., BOTTERUD, A., WANG, J., & PORTO, I. A survey on wind power ramp forecasting. **U.S. Department of energy office of scientific and technical information**, 2011.
- HARA, Y.; HARA, K.; HAYASHI, T. Moment of inertia dependence of vertical axis wind Turbines in pulsating winds. **International Journal of Rotating Machinery**, v. 2012, 2012.
- J.O. Ayoade. Introdução a Climatologia para os Trópicos. **Rio de Janeiro; Bertrand Brasil**, 4ª Edição, 1996.
- KALVERLA, P. C. et al. An observational climatology of anomalous wind events at offshore meteomast IJmuiden (North Sea). **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 165, p. 86–99, 2017.
- KOUSKY, V. E. Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 108, n. 4, p. 488-498. 1980.
- LUCENA, J. D. A. Y.; LUCENA, K. Â. A. Wind energy in Brazil: An overview and perspectives under the triple bottom line. **Clean Energy Oxford University Press**, 2019.

McPhaden, M. J.; Zebiak, S. E.; Glantz, M. H. ENSO as an integrating concept in earth science. **Science**, v. 314, p. 1740–1745, 2006.

NNOCENTINI, V. Simulação numérica da brisa marítima: testes de sensibilidade e efeito de parametrizações de transportes turbulentos. 1981. **Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo**, 1981.

PARSONS, B., MILLIGAN, M., ZAVADIL, B., BROOKS, D., KIRBY, B., DRAGOON, K., ... & CALDWELL, J. Grid impacts of wind power: a summary of recent studies in the United States. **Wind Energy**, v. 7, p. 87-108, 2004.

REN21. Renewables Global Status Report. **Documento eletrônico. Disponível em:** < https://www.ren21.net/reports/global-status-report/?gclid=Cj0KCQjwjryjBhD0ARIsAMLvnF8XAvbMRF1b_cAjfPeRpYQP7SutJt5XxUxAPaVM7IjT4g-Ok1_YPiEaAl5MEALw_wcB>. Acesso em: 24 maio 2023, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e Estados. **Disponível em:** <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ma.html>. Acesso em: 25 ago. 2023, 2022.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; ARMANDO, R. P.; FREITAS, C.; MARTINS, D.; MILLER, G. Causas da semi-aridez do sertão nordestino. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, 2016.

Schmit, T. J., P. Griffith, M. M. Gunshor, J. M. Daniels, S. J. Goodman, and W. J. Lehair. A Closer Look at the ABI on the GOES-R Series. **Meteor. Soc.**, 98, 681–698, 2017.

SILVA, B. B.; ALVES, J. J. A.; CAVALCANTI, E. P.; DANTAS, R. T. Potencial eólico na direção predominante do vento no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira Agrícola e Ambiental**, v. 6, p. 431-439, 2002.

SILVA, G. K.; SANTOS, C. S.; SILVA, M. V. M.; ALVES, J. M. B.; BARBOSA, C. S. S.; FREIRE, C. O. F.; ALCÂNTARA, C. R.; SOMBRA, S. S. Estudo dos padrões de ventos offshore no litoral do ceará utilizando dados estimados pelo produto de satélites BSW. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 32, p. 579-690, 2017.

SIMPSON, J. E. Sea Breeze and Local Winds. **Cambridge University Press**; First Edition. 1994.

SEVLIAN, R. E RAJAGOPAL, R. (2012). Wind power ramps: Detection and statistics. **2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA**, p. 1-8, 2012.

WANG, Q., YU, Z., YE, R., LIN, Z., & TANG, Y. (2019). An ordered curtailment strategy for offshore wind power under extreme weather conditions considering the resilience of the grid. **IEEE Access**, v. 7, p. 54824-54833, 2019.

XU, C., WEI, Z., HE, C., & WANG, H. (2014). Risk assessment of wind power ramp event considering time-sequence characteristic. **2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Hong Kong, China**, p. 1-6, 2014.

YANG, I. (2019). Data-Driven Distributionally Robust Stochastic Control of Energy Storage for Wind Power Ramp Management Using the Wasserstein Metric. **Energies**, v. 12, p. 4577, 2019.