

## RAMPA DE VENTO INDUZIDA PELA INTERAÇÃO BRISA E ESCOAMENTO SINÓTICO: EM BUSCA DA PREVISÃO DO PROCESSO

Natalia C. Fonseca<sup>1</sup> (IC), Arcilan T. Assireu (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

**Palavras-chave:** Efeito rampa. Previsão de curto prazo. Energia eólica.

### Introdução

Desde a década de 1970, a procura em adotar fontes de energia alternativas se intensificou, após a ocorrência das crises de petróleo, os países passaram a buscar segurança em relação ao fornecimento de energia. Com o intuito de reduzir a dependência de importação de combustíveis fósseis como carvão e petróleo, visto que são responsáveis pelas emissões de poluentes. Além do mais, a busca por alternativas mais limpas de geração de energia, se fortaleceu devido às preocupações ambientais. Das quais se destacam as mudanças climáticas e os esforços a fim de reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), após a assinatura do Protocolo de Quioto, em 1997. Dessa forma, iniciou-se a transição energética, com investimentos em fontes renováveis e tecnologias limpas. A inserção de energias renováveis na matriz energética mundial, se deu pelo objetivo de minimizar impactos ambientais e também pela busca da diversificação da matriz elétrica. Em termos de fontes de energia alternativas, a energia eólica tem se destacado como uma das fontes mais promissoras, no qual sua eficiência de geração provém de interações entre o vento e a superfície terrestre. Deste modo, destaca-se a energia eólica, devido à excelente qualidade dos ventos e aos grandes investimentos no setor. Em 2023, de acordo com os dados obtidos pelo boletim de energia do governo federal, a capacidade instalada de energia eólica atingiu 22 GW, tornando-se a terceira maior fonte de eletricidade no país e posicionando o Brasil como o sexto colocado no ranking mundial (Ministério de Minas e Energia, 2023). Nesse cenário, o Nordeste se destaca como a região com a maior concentração de parques eólicos, correspondendo a 85% da geração de energia eólica do país. Sendo notável por abrigar os ventos alísios do Atlântico Sul, que são fortes, estáveis e especialmente favoráveis para a geração de energia eólica no país (Lucena, 2019). O projeto EOSOLAR, foi desenvolvido para investigar a variabilidade temporal e espacial dos recursos eólicos e solares na região leste do Maranhão, no Nordeste do Brasil. O objetivo é melhorar a compreensão do comportamento desses recursos energéticos na região.

Durante a campanha do projeto EOSOLAR, identificou-se um fenômeno meteorológico marcado por uma queda repentina na velocidade do vento e uma brusca mudança de sua direção (nomeado efeito rampa), ambas características foram identificadas tanto na estação de superfície quanto pelo perfilador LIDAR (Assireu et al., 2022). As mudanças súbitas nos regimes de vento e a significativa perda de velocidade resultam em uma redução na eficiência das turbinas eólicas. Sendo assim, os efeitos rampa são responsáveis por causar instabilidade e também por colocar em risco a eficiência da operação do sistema, causando deste modo transtornos ao Operador Nacional do Sistema (ONS). A fim de aumentar a qualidade do serviço, no que se diz respeito à segurança de abastecimento e otimização do desempenho econômico, o ONS pode se beneficiar do conhecimento de probabilidade de ocorrência de rampa de vento. Deste modo, previsões acuradas do vento são essenciais para o gerenciamento eficiente de um parque eólico, impactando diretamente a estabilidade e a eficiência da geração de energia. A capacidade de prever com precisão o comportamento dos ventos permite ao Operador Nacional do Sistema (ONS) adotar medidas antecipadas, como o despacho de outras formas de geração de energia, como centrais hídricas, especialmente quando se prevê uma queda abrupta na velocidade do vento, o que pode comprometer a produção eólica e a demanda da população. Um exemplo recente do quais essas previsões seriam essenciais, ocorreu em 15 de agosto de 2023, quando uma extensa interrupção no fornecimento de energia foi causada por um evento rampa, marcado por uma queda abrupta e intensa no regime de ventos no Nordeste brasileiro. Este evento foi estudado detalhadamente por Assireu et al., (2024), que exploraram as causas e consequências deste fenômeno. Dessa forma, no presente trabalho, investigam-se fatores físicos como temperatura, umidade, condição de estabilidade atmosférica e cisalhamento do vento, visando avaliar se algum desses parâmetros pode subsidiar prognósticos de curto prazo para rampas de vento. A pesquisa visa aprimorar as técnicas de previsão de ventos, para reduzir os impactos dos eventos de rampa na geração de energia

eólica, e assegurar a estabilidade do fornecimento de energia elétrica.

**Área de estudo e Metodologia**

A área de estudo compreende a costa leste do Maranhão, próximo aos Lençóis Maranhenses, onde já existe um extenso parque eólico (2.7251°S; 42.6065°W) com mais de 150 turbinas (Fig.1). Este fato norteou a escolha da área de estudo, dando um contexto prático aos resultados gerados nesta pesquisa.

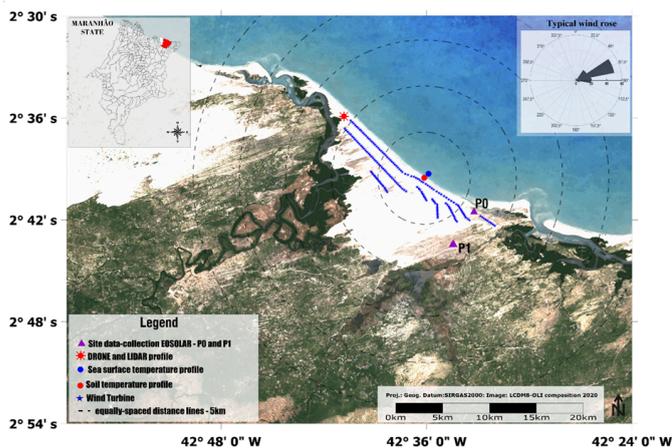


Figura 1 – Região de estudo EOSOLAR. As localizações da turbina são identificadas por pontos azuis.

Os dados utilizados no presente estudo, foram obtidos durante a campanha do Projeto EOSOLAR (Assireu *et al.*,2022), nos quais incluíam medições contínuas de temperatura, umidade, condição de estabilidade atmosférica e cisalhamento do vento. Informações de velocidade e direção do vento, foram coletadas por meio do sensor LIDAR (Light Detection and Ranging ), modelo Windcube. Este equipamento fornece informações dos perfis verticais médios de velocidade e direção do vento em intervalos de 10 minutos, em alturas que variam de 40 a 200 m, a cada 10 m e de 220 a 260 m a cada 20 m. A torre micrometeorológica, foi responsável pelo fornecimento de dados como velocidade e direção do vento, pressão atmosférica, precipitação, temperatura e umidade relativa. O período de análise estendeu-se entre 16 de setembro de 2021 e 08 de novembro de 2021. O mapeamento dos eventos no período de análise, se deu pelos dias em que observaram a ocorrência de queda abrupta na velocidade do vento, mudança repentina na direção do vento e redução da produção eólica no Complexo Eólico Delta, localizado próximo à área de estudo. Atendendo esses critérios e dentro do intervalo temporal considerado, foram identificados 12 eventos de rampa de vento, ocorridos

nas seguintes datas e com seus respectivos horários e duração, apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Datas, horários e duração dos eventos rampas de vento identificados.

<i>Data</i>	<i>Íncio</i>	<i>Fim</i>	<i>Duração</i>
21/09/2021	07:20	07:45	25 minutos
24/09/2021	06:28	07:21	53 minutos'
02/10/2021	05:35	06:29	54 minutos
06/10/2021	05:59	07:01	1 hora e 2 minutos
10/10/2021	06:12	07:18	1 hora e 6 minutos
11/10/2021	07:05	08:00	55 minutos
12/10/2021	06:50	07:35	45 minutos
13/10/2021	05:42	06:28	46 minutos
14/10/2021	04:45	05:23	38 minutos
19/10/2021	06:18	07:31	1 hora e 13 minutos
22/10/2021	06:10	06:54	44 minutos
05/11/2021	05:18	09:00	3 horas e 42 minutos

Com o objetivo de estabelecer condições preditivas dos eventos rampas, após o mapeamento com o auxílio do software MATLAB, foram desenvolvidas rotinas computacionais. Realizou-se a confecção de gráficos comparativos, dos fatores físicos (temperatura, condição de estabilidade atmosférica e cisalhamento do vento), para o dia anterior ao evento, o dia do evento e o dia posterior ao evento. Para os dias que ocorreram rampas de vento em dias consecutivos, utilizou-se como dia anterior e posterior a próxima data que não teve esse fenômeno. Tal metodologia de análise, foi utilizada a fim de permitir a identificação de condições particulares dos eventos rampa, que uma vez reconhecidas podem subsidiar previsões de curto prazo desse fenômeno. Os fatores físicos foram analisados separadamente, e a partir disso realizou-se análises quantitativas e qualitativas destes eventos. Com o intuito de identificar condições comuns, que antecedem o efeito rampa e que

podem ser utilizadas para aprimorar as previsões de curto prazo.

## Resultados e discussão

### 3.1 Gráficos Comparativos

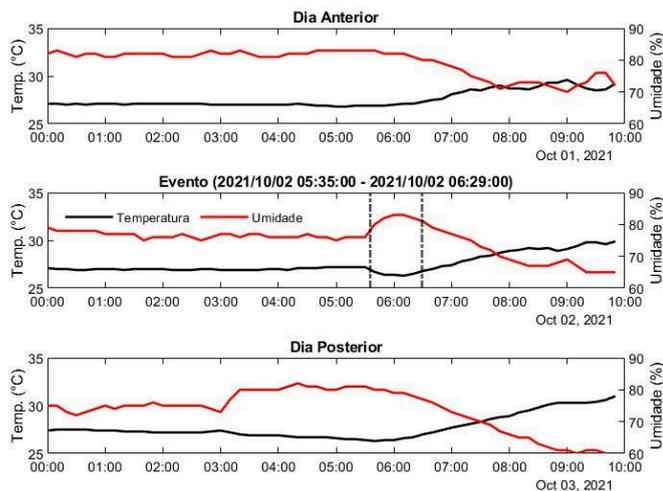


Figura 2. Temperatura e umidade nos dias anterior, no evento (02/10/2021) e posterior.

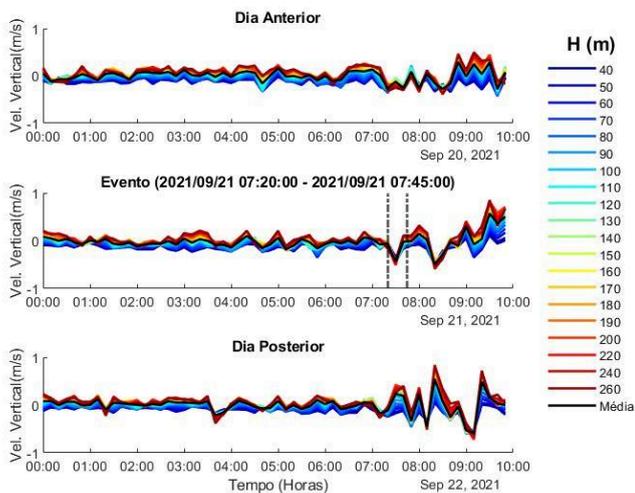


Figura 3. Velocidade vertical para diferentes alturas nos dias anterior, no evento (21/09/2021) e posterior.

### 3.2 Análises

A partir das análises dos gráficos dos fatores físicos (temperatura, umidade, velocidade vertical), nos dias anteriores, durante e posteriores aos eventos de efeito rampa, identificou-se algumas condições comuns associadas a esses eventos (Tabela 2). As condições tratam-se de comportamentos incomuns, que só foram visualizados nos dias do evento, não sendo observadas nos dias anteriores ou posteriores, representando desse

modo uma particularidade das rampas de vento ocorridas no período analisado. Para os parâmetros de temperatura e umidade, identificou-se duas condições, nos parâmetros de velocidade vertical do vento e desvio padrão da velocidade vertical encontrou-se apenas uma condição. A seguir serão descritas as condições e seus respectivos parâmetros.

Tabela 2 – Frequência de detecção de parâmetros meteorológicos associados a eventos rampa.

Parâmetro	Condição	Frequência de Detecção (%)
Temperatura e Umidade	Varição abrupta da Temperatura e Umidade próxima às 03:00 da manhã.	25
Temperatura e Umidade	Aumento da umidade e diminuição da Temperatura próxima às 05h da manhã.	42
Velocidade Vertical do Vento	Velocidade Vertical do Vento Negativa no horário próximo ao evento.	58
Desvio Padrão Velocidade Vertical do Vento	Pico do Desvio Padrão antes do Evento.	50

Ao analisarmos os fatores físicos, temperatura e umidade, observou-se que em 25% dos eventos houve uma variação abrupta, tanto na temperatura quanto na umidade, indicando uma instabilidade atmosférica neste horário. Em 42% dos eventos, ocorreu um aumento significativo na umidade acompanhado de uma diminuição da temperatura, próximo ao horário das 05h da manhã, o que é algo incomum nesse horário visto que com o aquecimento solar, a tendência era de que a umidade diminuísse e não sofresse nenhum aumento, o que é explícito nos dia anterior e posterior, mas não é observado no dia do evento (Fig.2). Esse padrão indica uma correlação entre esses parâmetros atmosféricos e os eventos de rampa. Tratando-se da análise da velocidade vertical do vento, em 58% dos eventos a velocidade vertical do vento apresentou valores negativos, em alturas próximas às das turbinas eólicas. Indicando a

ocorrência de movimento descendente do ar. Ao ser analisado o desvio padrão da velocidade vertical do vento, notou-se que em 50% dos eventos foi identificado um pico no desvio padrão da velocidade vertical do vento, antes dos eventos de rampa. Este aumento na variabilidade, indica uma instabilidade nos padrões de vento vertical, que precede os eventos de rampa.

### Conclusões

Os resultados obtidos oferecem informações valiosas, para compreender o comportamento dos fatores físicos antes do início dos eventos de efeito rampa. No entanto, a análise desses fatores sozinha não é suficiente para prever com precisão esses eventos. Sendo necessário encontrar uma condição universal, e que ocorra de fato em todas as rampas de vento, tratando-se de uma das maiores dificuldades de estudos a respeito das rampas de vento, que possuem o objetivo de prevê-las em um curto prazo. Essa investigação é crucial para possibilitar a implementação de estratégias de mitigação, que garantam a eficiência e a estabilidade da geração de energia eólica. A análise detalhada e contínua dessas condições, tem o potencial de aprimorar os modelos de previsão e contribuir para evitar interrupções no fornecimento de energia. Deste modo, a pesquisa sobre as rampas de vento se tornam essenciais, visto que são poucos e recentes os estudos relacionados a esse fenômeno. Como é observado no âmbito da transição energética, a energia eólica se destaca pelo seu grande potencial de exploração, e enfrenta alguns limites para sua maior consolidação e ampliação na matriz elétrica brasileira. Em razão da intermitência dos ventos, que são incontroláveis e sofrem influência das condições climáticas, causando perturbações no fornecimento de energia dessa fonte a rede elétrica (tensão, frequência, harmônicos), e dificultando o gerenciamento adequado do fluxo de energia pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Assim, há uma necessidade e busca de melhorar cada vez mais a segurança e estabilidade da energia eólica, em que a previsão das rampas de vento são essenciais para essa contribuição e consolidação dessa fonte renovável de energia. Dessa forma, em resposta aos resultados encontrados, uma nova linha de investigação será aberta, utilizando imagens de temperatura do mar e de cobertura de nuvens para verificar se esses novos parâmetros, especialmente durante a madrugada, podem fornecer indicações mais eficazes para a previsão de eventos de efeito rampa.

### Agradecimentos

Os autores são gratos ao CNPq, a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e ao Instituto Nacional em Energias Oceânicas e Fluviais (INEOF) pelo apoio. A primeira autora é grata ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Iniciação Científica.

### Referências

- ASSIREU, A. T et al. EOSOLAR Project: Assessment of Wind Resources of a Coastal Equatorial Region of Brazil—Overview and Preliminary Results. *Energies*, 15(7), 2319. 2022.
- ASSIREU, A. T et al. Sea breeze-driven effects on wind down-ramps: Implications for wind farms along the north-east coast of Brazil. *Energy*, v.294, p. 130804, 2024.
- LUCENA, J. A. Y; LUCENA, K. A. A. Wind energy in Brazil: an overview and perspectives under the triple bottom line. *Clean Energy*, v.3, ed.2, p. 69-84, mar. 2019
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Segundo semestre de 2023 começa com recordes na geração eólica. Gov.br, 2023.