

**FATORES AMBIENTAIS MODULADORES DO EFEITO RAMPA DE VENTO ASSOCIADA À BRISA DO NE BRASILEIRO**Natalia C. Fonseca (IC), Arcilan T. Assireu (PQ)<sup>1</sup><sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Instituto de Recursos Naturais**Palavras-chave:** brisa marítima. energia eólica. rampa de vento. rugosidade aerodinâmica**Introdução**

Devido às preocupações ambientais, pelas quais se destacam as mudanças climáticas e as iniciativas a fim de reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), a procura por alternativas mais limpas de geração de energia se fortaleceu. 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. A energia eólica no Brasil se destaca 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.

Nesse cenário, o Nordeste brasileiro concentra mais de 85% da capacidade instalada de energia eólica do país, em especial em áreas costeiras, caracterizada por abrigar os ventos alísios do Atlântico Sul, que são fortes e estáveis. Essa região se destaca pela grande relevância no setor elétrico devido à sua produtividade e estabilidade de geração, mas em contrapartida apresenta desafios relacionados a variações abruptas na velocidade e direção do vento. Um desses fenômenos, localmente conhecido como “**Vento Sul**”, caracteriza-se pela queda súbita da velocidade do vento acompanhada de mudança brusca de direção, ocasionando redução significativa na produção de energia e impactos operacionais em parques eólicos.

A ocorrência desses eventos está fortemente associada às **brisas costeiras**, circulações locais geradas pelo aquecimento diferencial entre terra e mar, que modulam os ventos de superfície e podem intensificar ou atenuar as rampas de vento. Apesar da importância desse efeito para a eficiência e confiabilidade da energia eólica, ainda há escassez de estudos que relacionem diretamente a dinâmica das brisas com o fenômeno das rampas de vento no Nordeste brasileiro.

Esses eventos impactam diretamente a produção eólica, podendo comprometer o fornecimento elétrico, como ocorreu em 15 de agosto de 2023, quando um apagão nacional esteve associado a uma rampa no Nordeste. A origem das rampas está associada principalmente à presença de nebulosidade no início da manhã, que bloqueia a incidência da irradiância solar e atrasa o disparo da brisa marítima, resultando no efeito observado. Esse comportamento pode ser potencializado por outros fatores, como variações atmosféricas locais de temperatura, umidade e cisalhamento vertical. Diante disso, o presente estudo tem como objetivo analisar os fatores ambientais moduladores do efeito rampa de vento associado à brisa no Nordeste brasileiro, a partir da integração de resultados obtidos no projeto EOSOLAR.

**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). Essa área é ideal para investigação, pois apresenta forte influência da brisa marítima e heterogeneidade da superfície (praias, dunas e vegetação de pequeno porte).

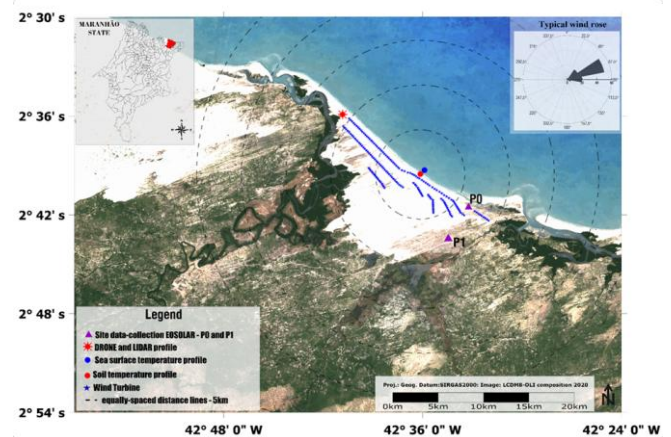


Figura 1 - Região de estudo EOSOLAR. As localizações da turbina são identificadas por pontos azuis. Fonte: Assireu et al.,2022

*“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”*

De acordo com o método micrometeorológico, o perfil de velocidade do vento sob a condição de estratificação neutra da atmosfera é comumente aproximado por uma expressão logarítmica do tipo:

$$U(z) = \frac{U^*}{k} \ln\left(\frac{z}{Z_0}\right) \quad (1)$$

O comprimento de rugosidade  $Z_0$  foi estimado por isolar este termo na equação (1):

$$Z_0 = z e^{-\left(\frac{U(z)K}{U^*}\right)} \quad (2)$$

Em que:  $U^*$  é a velocidade de fricção obtida a partir das torres micrometeorológicas instaladas nos setores em estudo,  $K$  é a constante de Von Karman e  $Z$  e  $Z_0$  são, respectivamente, a altura de referência (3m – altura onde está instalado o anemômetro sônico 3D) e o comprimento de rugosidade. Os valores obtidos pelo método micrometeorológico acima (Eq. 2) foram comparados simultaneamente com os valores de velocidade e direção do vento, a partir dos dados fornecidos por meio do sensor LIDAR (Light Detection and Ranging), modelo Windcube. O mapeamento dos fenômenos de efeito rampa foi realizado considerando os dias com queda abrupta na velocidade do vento, mudança repentina na direção e redução da produção eólica no Complexo Eólico Delta, localizado próximo à área de estudo. Para cada evento, foram confeccionados gráficos comparativos e realizadas análises dos fatores físicos (temperatura, umidade e cisalhamento do vento) nos dias anterior, durante e posterior ao evento.

## Resultados e discussão

### 3.1 Rugosidade e modulação da velocidade do vento

Os dados evidenciaram que a rugosidade atua como um fator ambiental modulador, capaz de alterar significativamente a velocidade do vento. No caso estudado, a mudança na direção do vento provocou redução de aproximadamente 40% na velocidade local, interrompendo temporariamente a produção das plantas eólicas. O aumento da rugosidade em até duas ordens de grandeza reforça como elementos do entorno naturais ou artificiais influenciam diretamente os efeitos de rampa de vento, destacando a importância da caracterização ambiental detalhada em estudos eólicos.

Os valores de rugosidade obtidos pelo método micrometeorológico (Eq. 2) mostraram dependência da direção do vento (Fig. 2).

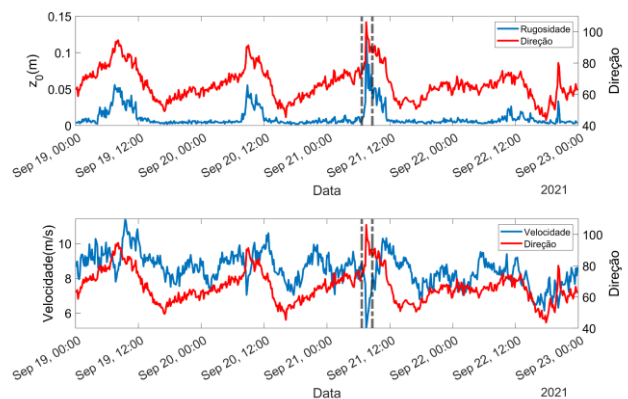


Figura 2 - Dependência da velocidade e  $Z_0$  com a direção do vento

A Figura 3 ilustra a relação entre o tipo de cobertura do solo, a velocidade do vento e a rugosidade superficial ( $Z_0$ ). Observa-se que para ventos entre  $40^\circ$  e  $70^\circ$  o valor de  $Z_0$  é de 0,005 m. Para direções entre  $70^\circ$  e  $90^\circ$ , observa-se um aumento para  $Z_0 = 0,05$  m, enquanto próximo a  $110^\circ$  o valor atinge  $Z_0 = 0,1$  m, associado à presença de turbinas eólicas de 100 m a barlavento. Além disso, a análise espacial evidenciou que o coeficiente de rugosidade ( $Z_0$ ) varia conforme o uso e cobertura do solo, apresentando relação direta com a direção, e influenciando a intensidade dos ventos. Assim, é possível atribuir um valor característico de  $Z_0$  para cada tipologia de cobertura: áreas com superfícies mais homogêneas e que oferecem menor perda de energia do vento por aspectos mecânicos, como dunas e corpos d'água, apresentam valores reduzidos ( $Z_0 = 0,005$  m); formações pioneiras com influência flúvio-marinha possuem valores intermediários ( $Z_0 = 0,05$  m); e os valores mais elevados ( $Z_0 = 0,1$  m) concentram-se principalmente na porção continental, onde a maior densidade de vegetação e os elementos naturais aumentam a rugosidade da superfície. Desse modo, fica evidente que os valores observados de  $Z_0$  estão em concordância com a literatura e com as características típicas das coberturas analisadas, indicando que a modelagem da rugosidade superficial representa adequadamente as condições reais do terreno e do uso do solo na área estudada.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

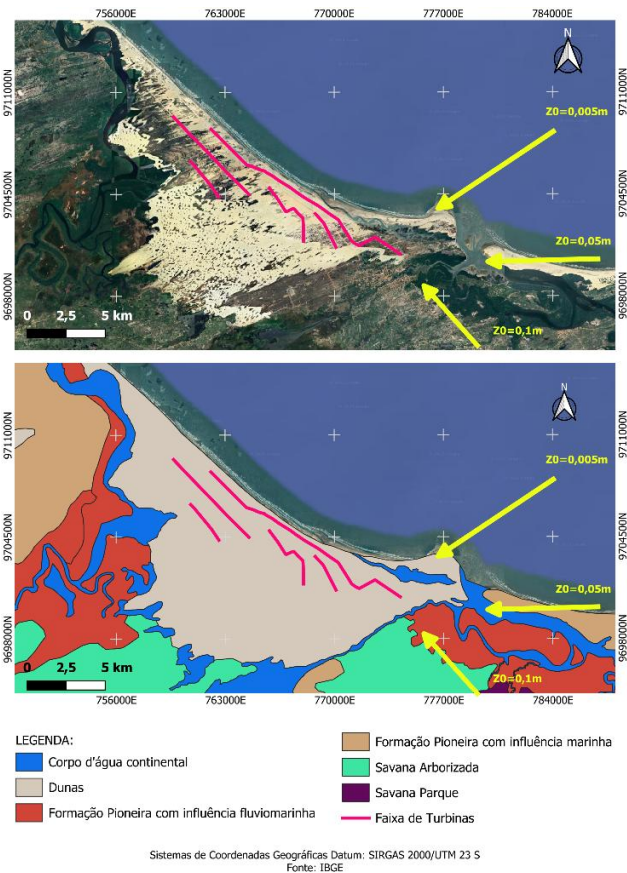


Figura 3 - Relação entre tipo de cobertura do solo, direção do vento e valores do coeficiente de rugosidade ( $Z_0$ ) na área de estudo.

A fim de confirmar toda a análise, a Figura 4 mostra a área de estudo, evidenciando sua heterogeneidade, com variações na densidade da vegetação e na exposição do solo. Como consequência dessas variações, observam-se valores distintos de rugosidade, com  $Z_0$  menores em áreas abertas ou sem obstáculos e aumento gradativo em regiões com vegetação mais densa e outros elementos na superfície, afetando diretamente o escoamento e a intensidade dos ventos.



Figura 4 – Diferentes tipos de cobertura do solo na área de estudo

### 3.2 Parâmetros atmosféricos associados às rampas

As análises dos eventos de rampa evidenciaram padrões consistentes em diversos parâmetros meteorológicos observados nos dias anterior, durante e posterior ao evento. Houve aumentos significativos da umidade relativa próximos às 05h da manhã nos dias de rampa, frequentemente acompanhados de quedas atípicas de temperatura, contrariando a tendência de aquecimento esperada ao amanhecer. Valores negativos de velocidade vertical do vento foram detectados nas alturas das turbinas (80–100 m), indicando movimento descendente do ar, que altera a estabilidade aerodinâmica das pás e pode reduzir a eficiência de geração de energia (Fig.6). Além disso, o cisalhamento do vento apresentou intensificação antes dos eventos, mostrando-se como um indicador precoce da ocorrência de rampas.

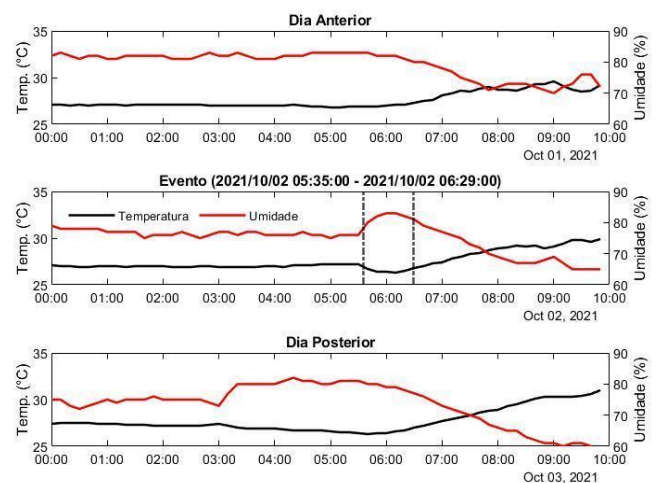


Figura 5 - Temperatura e umidade nos dias anterior, no evento (02/10/2021) e posterior.

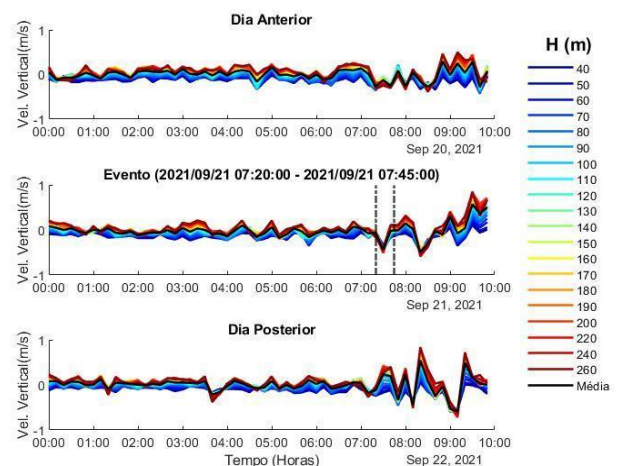


Figura 6 - Velocidade vertical para diferentes alturas nos dias anterior, no evento (21/09/2021) e posterior.

## “Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

### 3.3 Integração dos fatores ambientais

Observa-se que os fenômenos de rampa de vento ocorridos no NE Brasileiro, são resultado da interação dinâmica entre múltiplos fatores ambientais, no qual atuam de maneira combinada para modular a intensidade, direção e duração do fenômeno. Dentre os componentes, se destacam:

- **Brisa marítima:** interage vetorialmente (vetor apontando em direção a costa e perpendicular a esta) com os ventos aliseos (tipicamente de sudeste) o que resulta no vento de NE (do mar para a terra) tão eficiente para a geração de energia eólica.
- **Rugosidade aerodinâmica:** determinada pelo tipo de uso e cobertura do solo, topografia e presença de obstáculos. A rugosidade pode amplificar ou atenuar os efeitos da brisa, dependendo da direção do vento e da extensão continental percorrida, funcionando como um fator ambiental modulador das rampas.
- **Condições atmosféricas locais:** variáveis como temperatura, umidade, cisalhamento e estabilidade atmosférica apresentam comportamentos peculiares nos dias em que ocorrem rampas de vento, não sendo visualizados nos dias que não apresentam esse fenômeno.

### Conclusões

O presente estudo evidenciou que a brisa do Nordeste brasileiro, constitui um fenômeno determinante para a operação e a estabilidade do setor eólico na região. Entre os principais resultados, observou-se que a rugosidade aerodinâmica ( $Z_0$ ) depende fortemente da direção do vento, apresentando variações de até duas ordens de grandeza quando o vento vira de NE para E-SE. A análise também mostrou que é possível atribuir valores característicos de  $Z_0$  a cada tipo de cobertura do solo, refletindo adequadamente as condições físicas do terreno e permitindo estimativas mais precisas da velocidade e direção do vento, essenciais para o planejamento e operação de parques eólicos. Além disso, a presença de dunas e de turbinas situadas a barlavento contribuiu para uma redução de até 40% na velocidade do vento local. Parâmetros atmosféricos como a queda de temperatura, o aumento da umidade, a subsidência do vento vertical e a intensificação do cisalhamento mostraram-se bons

indicadores de curto prazo para a previsão de rampas de vento. A interação entre nebulosidades no período da manhã, a rugosidade da superfície e as condições meteorológicas locais intensifica a ocorrência dessas rampas, o que pode impactar significativamente a geração eólica no Nordeste brasileiro. Os resultados obtidos neste estudo são de grande relevância, pois fornecem subsídios essenciais para otimizar a exploração da energia eólica no Nordeste brasileiro, reduzir riscos de instabilidade elétrica e garantir a segurança e a confiabilidade do suprimento energético na região

### Agradecimentos

Agradecimentos a ANEEL, Gera Maranhão S.A. e Equatorial Energia S.A. (PD-00037-0042/2020), pelo financiamento ao Projeto EOSOLAR. 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 CNPq pela bolsa de Iniciação Científica.

### Referências

- Assireu et al. EOSOLAR Project Assessment of Wind Resources of a Coastal Equatorial Region of Brazil-Overview and Preliminary Results, *Energies*, v.15, pp.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.
- Colin J. and Fraive R. Aerodynamic roughness length estimation from very high-resolution imaging LIDAR observations over the Heihe basin in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010.
- 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.
- Wieringa, J. (1992) ‘Updating the Davenport roughness classification’. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* Vol.41, pp, 357-368.