

COMPRIMENTO DE RUGOSIDADE NA REGIÃO COSTEIRA PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE E DE MEDIDAS DE VENTO VIA LIDAR E TORRE MICROMETEOROLÓGICA.

Natalia Cristina da Fonseca¹ (IC), Arcilan Trevenzoli Assireu (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: — Comprimento de rugosidade, Energia eólica, Imagens de satélite, LIDAR, Sensoriamento remoto

Introdução

Este artigo é uma contribuição do Projeto “EOSOLAR: Prospecção dos recursos eólicos em uma região equatorial brasileira”, que consiste num esforço multi-instrumental e multi-institucional, baseado em perfilamento remoto do vento usando LIDAR e torres micrometeorológicas, para estudar a camada limite atmosférica influenciada pela transição terra-água e mudanças abruptas de rugosidade, típicas de regiões costeiras. O comprimento de rugosidade (Z_0) é uma variável essencial para a prospecção do potencial eólico. Vários formalismos para derivar este parâmetro podem ser encontrados na literatura, mas como antecipado por vários autores, pesquisas ainda são necessárias para obtenção mais acurada deste parâmetro. Estimativas de Z_0 a partir de perfis de vento medidos pelo Light Detection and Ranging (LIDAR), torres micrometeorológicas e a partir de imagens de satélite serão apresentados neste trabalho. Uma comparação entre estes valores para três setores com rugosidades diferentes representativas de terrenos cobertos por areia, grama e vegetação rasteira são discutidos. Os resultados indicam uma evidente dependência da rugosidade com a direção do vento. O conhecimento das características aerodinâmicas locais é fundamental para descrever, modelar e prever o comportamento dos ventos e da turbulência em diferentes escalas e ao longo da altura. Na camada limite atmosférica, a camada que está em contato ou sofre influência da superfície terrestre, o escoamento das massas de ar tem comportamento distinto ao longo de sua extensão vertical. Considerando esta variação vertical do vento, o relevo, em termos aerodinâmicos, é descrito pelos parâmetros de rugosidade, relacionados com a forma, altura, densidade de distribuição dos elementos na superfície, dentre outras variáveis, que determinam a eficiência de uma área da superfície para transformar a energia do vento médio em movimento turbulento nas baixas camadas [1]. Numa forma geral o coeficiente de rugosidade pode ser classificado em quatro categorias de terreno [1]: categoria 1 abrange superfícies de lago e oceano; categoria 2 considera superfícies terrestres

abertas com obstáculos suaves; categoria 3 abrange áreas com obstruções como construções e árvores com altura em torno de 10 m enquanto a categoria 4 considera áreas urbanas ou florestas com árvores mais altas. Este trabalho foca em área enquadrada na categoria 2, pois abrange regiões planas cobertas com areia, dunas e, em alguns casos, coberta por vegetação baixa e algumas casas. Um dos atributos aerodinâmicos utilizados para parametrizar a rugosidade do terreno é o comprimento característico da rugosidade (Z_0) que, formalmente corresponde à altura a partir do solo onde a velocidade do vento é igual a zero, considerando um perfil vertical cuja variação apresente comportamento logarítmico com a altitude. Porém, a mensuração desta variável é ainda considerada difícil e desprovida de consenso metodológico [2]. Dois métodos são os mais usuais para as estimativas do comprimento da rugosidade: o morfométrico e o micrometeorológico. O método micrometeorológico baseia-se em medidas de vento ou turbulência para determinar parâmetros aerodinâmicos onde se inclui relações teóricas derivadas de perfis logarítmicos de vento. Os métodos morfométricos têm como vantagem a possibilidade de obtenção de estimativas sem a necessidade de torres e instrumentações instaladas no campo. Porém, apresentam como principal limitação o fato de seu respaldo teórico ser baseado em relações empíricas construídas sob condições idealizadas em túnel de vento. Assim, a validação dos métodos morfométricos é etapa importante para a melhor compreensão da relação funcional dos atributos de terreno para os regimes de ventos locais. O presente trabalho busca fazer uma primeira comparação entre métodos morfométricos (a partir de imagens de satélite) e micrometeorológicos (a partir de torre micrometeorológica e LIDAR), aplicados sobre 03 regiões representativas da paisagem tipicamente encontrada em regiões costeiras das regiões tropicais e equatoriais do Brasil (Fig.1).

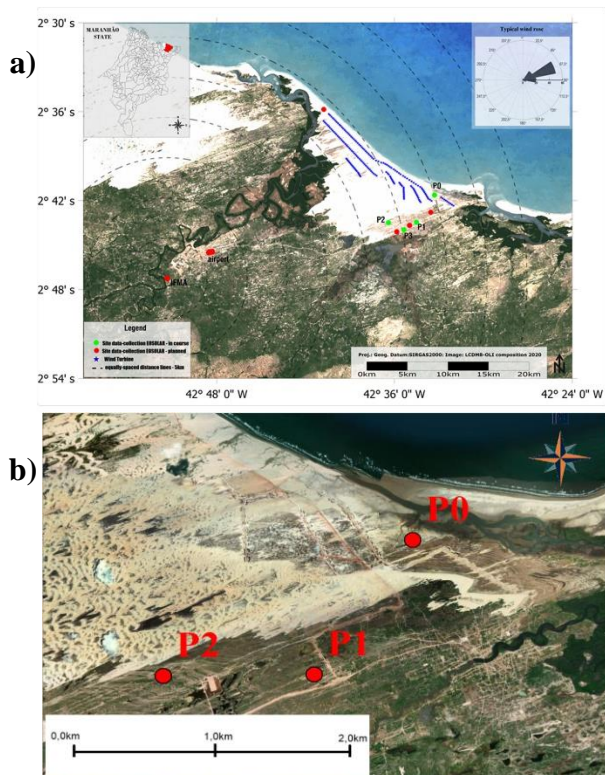


Figura 1 – (a) Imagem Landsat da área de estudo; (b) Setores estudados e respectivos tipos de superfície. Região correspondente aos pequenos lençóis maranhenses, município de Paulino Neves, MA. FONTE: Assireu et al. (2022).

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. Este fato norteou a escolha da área de estudo, dando um contexto prático aos resultados gerados aqui. As análises, que envolveram dados entre setembro e novembro de 2021, são baseadas no método micrometeorológico. Pelo 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 [3]:

$$U(z) = \frac{U_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

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

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

$$u_* = \left[\left(\overline{u'w'}\right)^2 + \left(\overline{v'w'}\right)^2 \right]^{1/4} \quad (3)$$

Onde: U^* é a velocidade de fricção obtida a partir das torres micrometeorológicas instaladas nos setores em

estudo (Eq.3) [6], 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 avaliados pelo método anemométrico acima (Eq. 2) foram comparados com os respectivos valores levantados a partir da inspeção de imagens de satélite dos sítios onde estavam cada torre e correspondente classificação da rugosidade na Tabela 1 proposta por [4]. Maiores detalhes sobre a metodologia utilizada aqui, vide Assireu et al. (2022) [5].

Tabela 1 – Comprimento de rugosidade estimado a partir da classificação do terreno em imagens de satélite [4].

| Categoria Terreno | Classe | Superfície | Tipo de Cobertura | Z_0 (m) |
|-------------------|--------|--------------|--|-----------|
| 1 | 1 | Mar | Mar aberto, fetch de pelo menos 5 km | 0,0002 |
| 1 | 2 | Lisa | Planície úmida, neve, pouca vegetação, sem obstáculos | 0,005 |
| 2 | 3 | Aberta | Terreno plano: grama e poucos obstáculos e isolados | 0,03 |
| 3 | 4 | Semi Aberta | Plantação baixa: grandes obstáculos ocasionais | 0,1 |
| 3 | 5 | Rugosa | Plantações altas: obstáculos espalhados | 0,25 |
| 3 | 6 | Muito rugosa | Arbustos, árvores baixas: numerosos obstáculos | 0,5 |
| 4 | 7 | Fechada | Cobertura regular com grandes obstáculos (área suburbana, florestas) | 1,0 |
| 4 | 8 | Caótica | Centro da cidade com construções altas e baixas | > 2 |

Resultados e discussão

3.1- Resposta do escoamento a diferentes atributos de terreno

A evolução temporal da velocidade média do vento (V), velocidade de fricção (U^*) e calor sensível (SH) (Fig. 2), mostra diferença perceptível para essas variáveis entre os pontos P1 e P0, mas que co-oscilam de forma muito coerente. A intensidade do vento em P0 durante os períodos de maior (menor) vento é em média 20% (50%) maiores do que em P1. Considerando que a distância

entre estes pontos, em linha reta, não passa de 2 km (Fig. 1), e ainda que as velocidades de fricção e calor sensível são maiores em P1, abrem a possibilidade dessas variações serem devido a efeitos relacionados a rugosidade (cobertura) do terreno do que apenas pelo efeito da maior maritimidade em P0. Esses parâmetros entre P1 e P2 (não mostrado), praticamente iguais, reforçam a possibilidade da rugosidade ser a responsável por esses comportamentos. Note que é perceptível a diferença do atributo superfície entre P0 e P1 (Fig. 1) enquanto essa é imperceptível entre P1 e P2 (não mostrado).

3.2 - Coeficiente de rugosidade e dependência com a direção do vento

Os valores de rugosidade pelo método micrometeorológico (Eq. 2) para P0, P1, e P2 (Fig. 3), com valores centrados, respectivamente, em 0,005m, 0,05m e 0,3m, indicam, pela Tabela 1: i) planície úmida e terreno sem vegetação e obstáculos; ii) terreno plano com grama e poucos obstáculos isolados e; iii) plantações altas e obstáculos espalhados. Uma coincidência bastante alta entre a rugosidade pelo método micrometeorológico e pelo método visual (Tab. 1) pôde, pois, ser observada (Fig. 1). Outro aspecto que indica a boa consistência do método micrometeorológico, é a relação desta com a direção do vento (Fig. 4a), de onde se observa que, para direções de vento entre 40 e 70 graus, Z0 apresenta valor igual a 0,005, compatível com o previsto para terrenos sem vegetação e obstáculos (Tab. 1). Observa-se também que para direções do vento entre 70 e 90 graus, observa-se mudança de uma ordem de grandeza de Z0, com este assumindo valores da ordem de 0,05 (Fig. 4a). Estes valores, estimados pelo método micrometeorológico, também mostram coerência com aqueles propostos pelo método geométrico que prevê terreno plano com grama e poucos obstáculos, confirmado pela Figura 4b. Impressionante ainda é a rugosidade estimada pelo método micrometeorológico para ventos próximos a 110 graus, que aumentou, novamente, de uma ordem de grandeza (Fig. 4a). Note que, para essa direção, existem turbinas eólicas de 100 m de altura a barlavento do ponto em análise (Fig. 4b). Esse giro na direção no vento levou à redução de cerca de 40% na intensidade do vento com interrupção, inclusive, da geração eólica das plantas ali instaladas [5]. Portanto, esse aumento de rugosidade em 100 vezes ($Z_0 = 0,1$) quando comparado para os ventos predominantemente de NE, devido ao efeito da presença das turbinas (4b), tem impacto determinante para o aproveitamento eólico local, visto que a resultante perturbação foi registrada pelos dados do LIDAR até 100 m [5]. Esse valor de Z0 apresentou, novamente, boa aderência com o previsto na Tabela 1, a qual prevê grandes obstáculos ocasionais, que no presente caso é

representado pelas turbinas. Valores surpreendentes para Z0 (~ 0,3), observados durante o vento predominante de NE, e que a princípio causou desconfiança nestes autores, pois pelo critério nível “cobertura de solo” não se justificavam, levou a uma conclusão muito importante: uma duna com aproximadamente 20 m de altura localizada a barlavento (~ 2,5 km) na direção ~ NE de P2 (Fig. 5) é a responsável pelo valor de rugosidade obtido pelo método micrometeorológico, mostrando novamente, a robustez deste método.

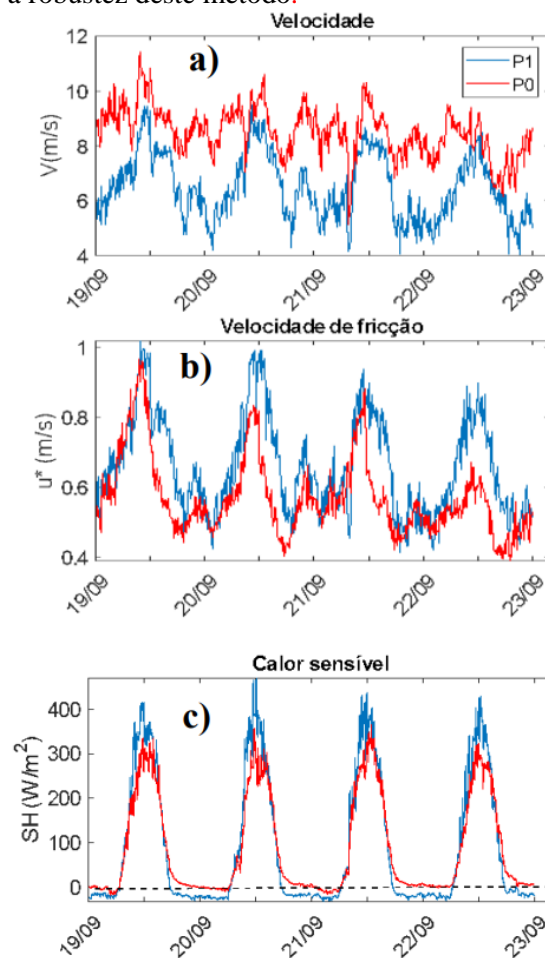


Figura 2 – Comparação entre os pontos P1 e P0 da velocidade do vento (a), velocidade de fricção (b) e fluxo de calor sensível (c).

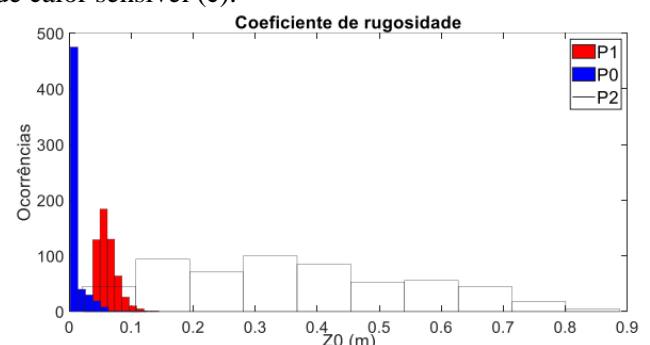


Figura 3 – Coeficiente de rugosidade pelo método micrometeorológico para P0, P1 e P2.

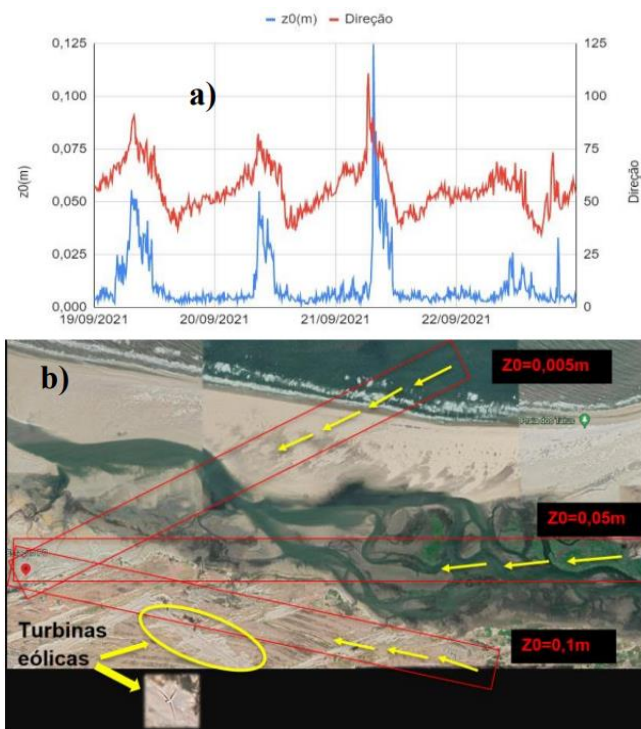


Figura 4 – Dependência do Z_0 com a direção do vento (a) e respectivas correspondências com a realidade de cobertura do solo (b), para o ponto P0.

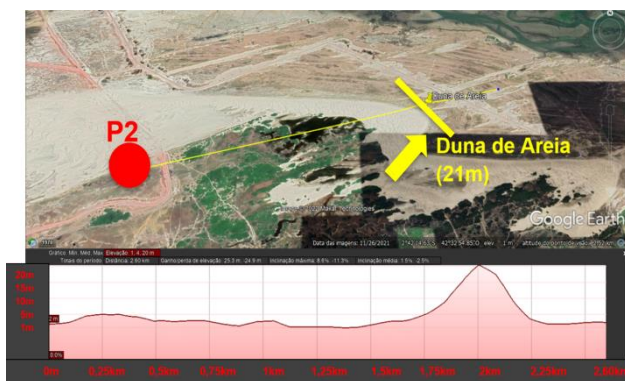


Figura 5 – Influência do relevo para a rugosidade no ponto P2

Conclusões

Uma comparação entre o coeficiente de rugosidade (Z_0), obtido a partir de dados de torre micrometeorológica, e o método que leva em conta a estimativa da rugosidade a partir da inspeção de atributos de cobertura do solo em imagens de satélite e associação com tabela empírica proposta em literatura da área indicou excelente ajuste entre os métodos. Embora os três pontos analisados apresentem distância máxima em linha reta igual a 2,0 km, uma importante e surpreendente heterogeneidade nos parâmetros de rugosidade foi constatado. Valores muito

baixo de rugosidade, típicos de terreno plano e sem vegetação ($Z_0=0,005$ m), passando por valores correspondentes a terreno plano com grama de poucos obstáculos ($Z_0=0,05$ m) até valores relativos a plantação baixa e grandes obstáculos ocasionais ($Z_0=0,1$ m) foram observados. Embora o método micrometeorológico utilizado seja, a rigor, aplicável em condições de atmosfera neutra, os resultados indicaram um desempenho confiável também em condições de instabilidade/estabilidade, com os valores respondendo à direção do vento, como esperado. Os resultados indicaram que, a despeito da distância pequena entre os pontos estudados, as velocidades medidas simultaneamente entre pares de estação, mostram ventos menos intensos para aquelas que apresentaram maiores valores de rugosidade. Outro aspecto relevante observado é que uma duna de aproximadamente 20 m de altura a barlavento de um dos pontos foi o responsável pelo elevado e variado valor de rugosidade observado.

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

- [1] Holmes J.D. (2001) "Winds Load of Structures", Spon Press
- [2] Grimmond, C.S.B.; Oke, T.R. Aerodynamic properties of Urban Areas Derived from Analysis of surface form. J. Appl. Meteorol., 38, 1262-1292, 1998.
- [3] 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.
- [4] Wieringa, J. (1992) "Updating the Davenport roughness classification". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol.41, pp, 357-368.
- [5] Assireu et al. EOSOLAR Project Assesment of Wind Resources of a Coastal Equatorial Region of Brazil-Overview and Preliminary Results, Energies, v.15, pp.2319, 2022
- [6] Pimenta et al. Characterization of wind resources of the east coast of Maranhão, Brazil, Energies, v.16, pp.5555, 2023.