

## Revisão de Métodos de Estimativa do Comprimento de Rugosidade Aerodinâmica para Fins de Obtenção de Energia Eólica

Natália P. Saraiva\* Erika T. I. Barbosa\*\* Francisco L. A. Neto\*\*\*  
Clóvis B. M. Oliveira\*\*\*\* Osvaldo R. Saavedra†

\* Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, MA, (e-mail: saraiva.natalia@discente.ufma.br).

\*\* Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, MA, (e-mail: erika.thays@discente.ufma.br).

\*\*\* Laboratório de Meteorologia Aplicada, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, (e-mail: falbuquerque@gmail.com).

\*\*\*\* Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, MA, (e-mail: clovis.oliveira@ufma.br).

† Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, MA, (e-mail: o.saavedra@ieee.org).

**Abstract:** In this article, is proposed to identify the methods for estimating aerodynamic roughness length ( $z_0$ ) best suited to feasibility studies for the construction of wind farms. For that, a systematic review is carried out to filter the latest works that apply different methods to find  $z_0$  values. Identifying  $z_0$  for a specific surface is important to simulate the vertical wind profile and mechanical and turbulent fluxes estimation in the atmospheric surface layer. Must be considered those factors in viability studies for a wind farm, therefore impacting the calculation of energy efficiency. Morphometric and micrometeorological methods are listed, besides presenting works that have developed tables with  $z_0$  optimal values for different types of land. In the end, situations are presented in which each method has better applicability.

**Resumo:** Neste artigo, se propõe identificar os métodos de estimativa de comprimento de rugosidade aerodinâmica ( $z_0$ ) mais adequados a estudos de viabilidade para construção de parques eólicos. Para tal, foi realizada uma revisão sistemática com o intuito de filtrar os trabalhos mais recentes que aplicam diferentes metodologias para encontrar valores de  $z_0$ . A identificação do  $z_0$  para uma superfície específica é importante para simular o perfil vertical do vento e estimar fluxos mecânicos e turbulentos na camada superficial da atmosfera. Esses fatores devem ser considerados em um estudo de viabilidade de um parque eólico, pois causam impacto no cálculo da eficiência energética. São listados os métodos morfométricos e micrometeorológicos, além de apresentar os trabalhos que desenvolveram tabelas com valores ótimos de  $z_0$  para diferentes tipos de terrenos. Ao final são apresentadas as situações em que cada método tem melhor aplicabilidade.

**Keywords:** Aerodynamic Roughness Length; Vertical Wind Profile; Atmospheric Boundary Layer; Displacement Height; Systematic Review.

**Palavras-chave:** Comprimento de Rugosidade Aerodinâmica; Perfil Vertical do Vento; Camada Limite Atmosférica; Deslocamento do Plano Zero; Revisão Sistemática.

### 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a capacidade eólica *onshore* apresentou um crescimento de 59% (Council, 2021) no mundo, e no Brasil, esta fonte energética corresponde a 10,8% da matriz energética (ABEEólica, 2021). Obter energia elétrica a partir dos ventos é uma forma renovável de energia que

\* Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001, Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Equatorial Energia e GeraMaranhão.

depende fortemente das condições geográficas e meteorológicas da região em que se pretende implementar um parque eólico. E para tal, o comportamento do vento na camada limite atmosférica (CLA), região onde se localizam os aerogeradores, é o parâmetro mais importante (Petersen et al., 1997). Stull (1988) define a CLA como a porção da atmosfera que é influenciada pela superfície e sua espessura é variável tanto no tempo quanto no espaço.

A variação da velocidade do vento horizontal com a altura acima do solo, chamada de cisalhamento vertical do vento, é relevante na caracterização do recurso eólico por impactar diretamente na produtividade de uma turbina

eólica e influenciar em sua vida útil. Este cisalhamento vertical do vento está diretamente relacionado com a estabilidade atmosférica e a rugosidade da superfície do terreno (Manwell et al., 2011). A rugosidade descreve o quão eficaz uma superfície é em transformar a energia do vento médio, que passa sobre ela, em um movimento turbulento na CLA (Davenport et al., 2000).

Davenport (1960) aponta a importância do efeito da rugosidade da superfície para uma avaliação precisa do perfil vertical do vento e a conceitua como “o efeito de arrasto estatístico cumulativo de muitas obstruções no vento”. Stull (1988), ao relatar a dependência da rugosidade com os fluxos superficiais, constata que a turbulência mais acentuada ocorre sob superfícies mais rugosas.

Devido à dificuldade em se alcançar um valor de rugosidade local para aplicar em modelos de CLA, Davenport et al. (2000) descreveram a necessidade de utilizar medidas de perfis de vento para encontrar o comprimento de rugosidade aerodinâmica ( $z_0$ ). Quando estas medições não são realizadas, estes valores são alcançados por comparação, observando as características da superfície e aplicando valores já obtidos para terrenos semelhantes em outras localidades.

O presente trabalho revisa diferentes métodos e suas aplicações, encontrados na literatura, para o cálculo do  $z_0$ , com o intuito de apurar qual o mais adequado para ser aplicado a um estudo de potencial eólico para a costa leste do estado do Maranhão (Brasil). Para tal, foi realizada uma revisão sistemática, em que foram selecionados os trabalhos mais recentes sobre o assunto, a partir de 2010, e investigados quais métodos e aplicações estes utilizaram.

É importante citar que esta pesquisa não incluiu trabalhos que empregaram um comprimento de rugosidade específico em função do aquecimento da superfície ( $z_{0t}$  térmico), que corresponde ao aumento ou diminuição da rugosidade em função das forçantes verticais de células convectivas que atuam junto à superfície.

A seguir será apresentada uma breve explanação do conceito do parâmetro  $z_0$ , com intuito de mostrar sua importância no comportamento do perfil vertical do vento. A sessão seguinte aborda as etapas do método da revisão aplicada neste estudo e uma análise bibliométrica sobre os artigos mais citados e sua importância. Mais adiante, os métodos utilizados pelos trabalhos selecionados são apresentados junto a sua respectiva aplicação. E por fim, uma discussão expõe o aproveitamento de cada método para aplicação na região de interesse.

## 2. COMPRIMENTO DE RUGOSIDADE AERODINÂMICA ( $Z_0$ )

A característica da superfície, como a vegetação típica, construções e corpos d'água são amostras de elementos que determinam a rugosidade do solo de uma determinada região (Troen and Petersen, 1989). Superfícies d'água, como lagos, rios e oceanos apresentam baixa rugosidade, ao contrário de áreas urbanas, por exemplo. A rugosidade é comumente medida em função de seu tamanho e distribuição (Pinto, 2013) e, usualmente, parametrizada por uma escala de comprimento. A maioria dos estudos assumem uma rugosidade uniforme dentro de uma área especificada,

como se o terreno apresentasse uma superfície homogênea. No entanto, a rugosidade deve ser considerada para cada direção do vento, no caso de terrenos com superfícies heterogêneas (Smith, 2014).

Para compreender o conceito do  $z_0$  é importante entender o comportamento logarítmico do vento com a altura. Partindo próximo do solo, onde a velocidade do vento se torna zero pelo arrasto de fricção, a tendência é aumentar logaritmicamente com a altura. A distância entre a altura em que a velocidade do vento é igual a zero e a superfície é definida como  $z_0$  (Fig. 1). Por este parâmetro ser medido a partir da velocidade do vento em diferentes alturas, o adjetivo “aerodinâmico” é utilizado (Stull, 1988).

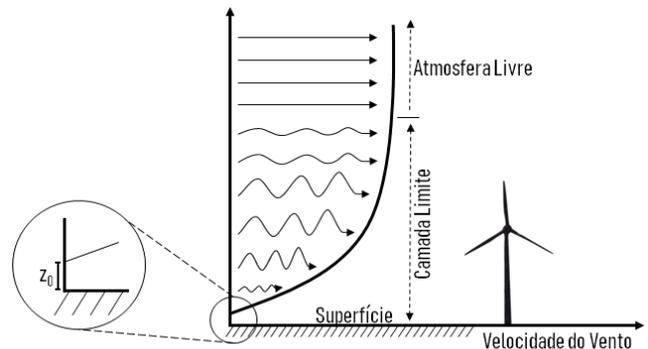


Figura 1. Perfil vertical da velocidade do vento. O comprimento da rugosidade aerodinâmica ( $z_0$ ) é a altura onde a velocidade do vento é nula. Adaptado de Martins et al. (2008).

Em condições atmosféricas neutras é possível determinar o  $z_0$  a partir da extrapolação do perfil vertical da velocidade do vento até onde ele se torna zero, veja (1). Foken (2017) observa que a aplicação deste método se limita a pequenos comprimentos de rugosidade. Em função disto não podem ser escolhidas alturas muito baixas, que podem estar abaixo de  $z_0$ , nem muito altas, onde o perfil exponencial não seria mais aplicável (atmosfera livre, Fig. 1).

$$z_0 = \frac{z - d}{\exp\left(\frac{k\bar{u}}{u_*}\right)}, \quad (1)$$

sendo  $\bar{u}$  a velocidade média do vento ( $m/s$ ) na altura ( $z - d$ ), e  $k \approx 0,4$  é a constante adimensional de von Karman, determinada experimentalmente.  $d$  é o deslocamento do plano zero ( $m$ ), que é a altura do solo ao topo dos elementos de rugosidade individuais, quando estão muito próximos uns dos outros, atuando como se a superfície se deslocasse para esta altura, por exemplo altura da copa das árvores em uma floresta fechada (Stull, 1988).  $u_*$  é a velocidade de fricção ( $m/s$ ) que depende do estado turbulento da atmosfera. Esta pode ser definida pelo fluxo vertical do momento horizontal,  $\tau$ , que determina como os ventos horizontais se comportam com a altura e por  $\rho$ , que é a densidade do ar:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}. \quad (2)$$

O perfil vertical do vento e  $u_*$  estão intimamente relacionados à turbulência no ar (Landberg, 2016), o que

explica a parametrização em (1) onde que as variáveis  $z_0$  e  $d$  são fixadas para uma determinada localidade e  $k$  é uma constante. Então pode-se depreender que  $z_0$  é governado pela razão exponencial entre o vento médio e a velocidade de fricção. Valores típicos de  $u_*$  são zero, durante ventos calmos, 0,5 m/s durante ventos moderados e 1 m/s durante ventos fortes (Stull, 1988).

### 3. MÉTODO DA PESQUISA

Para a investigação das metodologias aplicadas no cálculo do  $z_0$ , foi realizada uma revisão sistemática, em que se aplicam etapas pré-definidas para a seleção de trabalhos a serem estudados, descritas a seguir.

#### 3.1 Levantamento Bibliográfico

Revisões sistemáticas adotam um procedimento que seja objetivo, científico e replicável, com o intuito de minimizar tendências na pesquisa de trabalhos sobre um determinado tema (Tranfield et al., 2003). Sampaio and Mancini (2007) concluem que o conhecimento do processo deste tipo de revisão auxilia na compreensão do assunto.

A literatura referente à aplicação do parâmetro  $z_0$  é, em sua maioria, direcionada para uma dada localidade com uma determinada cobertura do solo. Em seu trabalho sobre a importância da rugosidade nas ciências da terra, Smith (2014) reitera que os métodos para avaliar a rugosidade foram desenvolvidos independentemente, para diferentes abordagens. Resultando em uma ampla literatura sobre diferentes métodos e aplicações para o cálculo do comprimento de rugosidade. Neste contexto, a aplicação da revisão sistemática visa minimizar a possibilidade de determinados trabalhos relevantes não serem contemplados nesta pesquisa, em que se pretende incluir estudos dos mais diferentes tipos de superfície.

Esta revisão foi realizada em duas etapas, uma para a seleção e outra para a filtragem dos artigos (Fig. 2). Na primeira etapa, oito bases de banco de dados bibliográficos foram utilizadas para efetuar as buscas (*IEEE Xplore*, Portal de Periódicos CAPES/MEC, *Scielo*, *ScienceDirect*, *Springer*, *Taylor & Francis*, *Web of Science*<sup>TM</sup> e *Wiley Online Library*) e foi realizada uma busca avançada a partir de dois grupos de palavras-chave. Após a exclusão dos repetidos em ambas etapas, foram selecionados 443 artigos. Na segunda etapa, os filtros aplicados resultaram na seleção dos 40 artigos (Fig. 2).

Foram escolhidos dois grupos de palavras-chave na primeira etapa. No primeiro foram utilizados “*roughness length*”, “*aerodynamic*” e “*method*” em qualquer lugar do artigo, mais “*roughness*” no título. O segundo grupo continha as expressões “*aerodynamic roughness length*” em qualquer lugar do artigo e “*roughness*” no título.

#### 3.2 Análise Bibliométrica

Após a seleção dos artigos, conduziu-se uma análise bibliométrica utilizando o VOSviewer<sup>®</sup>, um *software* criado para construção e visualização de mapas bibliométricos. A Fig. 3 exibe um mapa de visualização em rede, que reproduz os periódicos mais cocitados pelos artigos selecionados na sessão anterior. Apenas o nome do primeiro

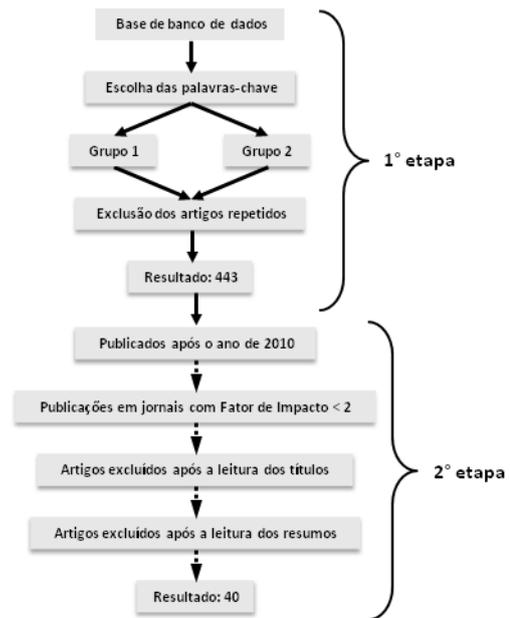


Figura 2. Descrição das etapas da revisão sistemática adotadas.

autor aparece na imagem. Uma distância pequena entre os nomes aponta uma relação mais forte entre os trabalhos e o tamanho do círculo determina o número de documentos e citações efetuadas (Van Eck and Waltman, 2020).

A partir das informações bibliográficas dos artigos disponíveis pela plataforma *Web of Science*<sup>TM</sup>, o *software* listou 1864 artigos cocitados. Na Fig. 3, apresentam-se os 14 trabalhos que foram citados mais de sete vezes. Os três artigos mais citados foram: Lettau (1969) com 15 citações, Stull (1988) com 11 e Raupach (1994) com 10.

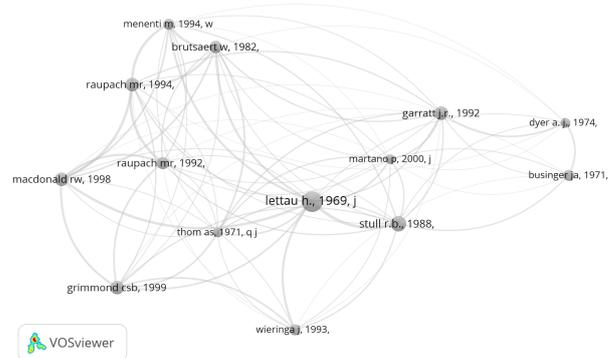


Figura 3. Mapa de cocitação dos 14 artigos mais citados (visualização em rede)

Os primeiros autores dos trabalhos mais citados são de grande relevância no estudo da CLA. O método desenvolvido no trabalho de Lettau (1969) é muito utilizado por meteorologistas e engenheiros para estimar a rugosidade da superfície (Macdonald et al., 1998). A obra de Stull (1988) é citada por Garratt (1994), em sua revisão sobre a CLA, como um dos textos mais avançados que tratam de aspectos especializados da CLA e vasta informação sobre o assunto. O trabalho de Raupach (1994), até os dias atuais, auxilia nos estudos das características de arrasto

de superfícies rugosas, especialmente por afetarem a erosão eólica (Garratt et al., 2020).

#### 4. MÉTODOS DE ESTIMATIVA DO COMPRIMENTO DE RUGOSIDADE AERODINÂMICA

Muitos trabalhos, em que o foco não está no cálculo do parâmetro  $z_0$ , utilizaram a fórmula do perfil vertical do vento (1) para encontrá-lo. É o caso de Li and Liu (2021) que investigaram o comportamento do escoamento após uma mudança abrupta da rugosidade da superfície; e de Hu et al. (2020) que aplicaram algoritmos de aprendizado de máquina a partir de dados da base global FLUXNET2015 (Fluxdata Portal, 2022) e do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo do satélite Terra (The EOS Flagship, 2022). Para condições de estabilidade neutra, Weligepolage et al. (2012b) utilizou (1) para uma floresta de coníferas na região central da Holanda.

Outros autores, empregaram (1) limitada à CLA em condições de estabilidade neutra, que vem a ser (3) para qualquer condição de estabilidade da camada superficial investigada através do parâmetro de estabilidade de Monin-Obukhov ( $z/L$ ) (Lv and Dong, 2012; Yu et al., 2016; Nelli et al., 2020).

Chen et al. (1993) descreveram detalhadamente a aplicação de parâmetros de estabilidade para a definição do  $z_0$  também usando (3), sendo citado por Li et al. (2021), Zhang et al. (2016) e Zhang et al. (2013). O primeiro utilizou dados sensor MODIS e observações de turbulência atmosférica *in situ*, na região do Planalto do Tibete, China, o segundo desenvolveu uma parametrização do  $z_0$  para superfícies planas com vegetação curta e o terceiro fez uma comparação dos valores de  $z_0$  para diferentes condições de estabilidade na região ao norte da China.

$$z_0 = \frac{z}{\exp\left(\frac{ku}{u_*} + \phi_m\right)}, \quad (3)$$

nesta equação em que  $\phi_m$  é uma função de  $z/L$  que é a forma integral do perfil logarítmico para diferentes condições de estabilidade (Chen et al., 1993). Para uma atmosfera neutra  $z/L = 0$ , em condições estáveis  $z/L > 0$  e instáveis  $z/L < 0$  (Stull, 1988).

Para estimar a rugosidade da superfície marinha em uma região costeira, a relação de Charnock (1955) (4) é uma das mais utilizadas (Peña and Gryning, 2008). He et al. (2021) a aplicaram para uma análise observacional baseada em medições de LIDAR (*Light Detection and Ranging*), a bordo de uma plataforma *offshore* na região costeira de Hong Kong, enquanto Bahamonde and Litrán (2019) a empregaram para desenvolver um método para estimar a produção anual de energia de uma turbina eólica *offshore*.

$$z_0 = \alpha_c \frac{u_*^2}{g}, \quad (4)$$

no qual  $g$  é a aceleração gravitacional e  $\alpha_c$  é o coeficiente de Charnock, que foi obtido através de dados experimentais a partir da idade da onda ( $\xi$ ), que é a razão entre a celeridade da onda ( $c_{ph}$ ) e  $u_*$ . Em sua pesquisa, Charnock (1955)

utilizou o valor para  $\alpha_c \approx 0,015$ , e Foreman and Emeis (2010) sugerem 0,018 a partir de uma reanálise de um grande número de estudos da literatura. Hara et al. (2004), encontrou valores entre 0,008 a 0,02 para intervalos de velocidade do vento entre 10 e 45  $m/s$ . Para ventos entre 10 e 20  $m/s$ , as literaturas citadas concordam em um valor do coeficiente de Charnock em torno de 0,018. Ondas jovens e em crescimento ( $\xi < 28$ ) necessitam de mais energia do vento, aumentando a rugosidade, enquanto ondas antigas ( $\xi > 28$ ) precisam de muito menos energia e, portanto, sua rugosidade é significativamente menor (Petersen et al., 1997).

Para verificar os impactos nos fluxos de energia e temperatura da superfície da terra em áreas de pastagem e florestas na China, Yuan et al. (2021) utilizaram um modelo específico de superfície da terra (*Land Surface Models - LSMs*) e, para o cálculo do  $z_0$  e  $d$ , aplicou-se o esquema semi-empírico baseado no Índice de Área Foliar (*Leaf Area Index - LAI*) desenvolvido por Choudhury and Monteith (1988), veja (5).

$$z_0 = \begin{cases} z_{0s} + 2.8hX^{1/2}, & \text{for } 0 \leq X \leq 0.2 \\ 0.3h \left(1 - \frac{d}{h}\right), & \text{for } 0.2 < X \leq 2 \end{cases} \quad (5)$$

$$d = h [\ln(1 + X^{1/6}) + 0.03 \ln(1 + X^6)]$$

onde  $X = 0,2LAI$ ;  $h$  é a altura do dossel e  $z_{0s}$  é a rugosidade da superfície em solo nu. Choudhury and Monteith (1988) elaboraram essa relação entre  $z_0$  e  $LAI$ , para aplicar resistência aerodinâmica no cálculo de um modelo de balanço de calor para superfícies homogêneas.

A metodologia de Raupach (1994) (6) foi utilizada na bacia de Heihe, China, por Faivre et al. (2017) e Colin and Faivre (2010) para avaliar alguns modelos baseados na geometria da vegetação e por Chen et al. (2015) que combinou dados de sensoriamento remoto e medições *in situ*.

$$z_0 = h \left[ \left(1 - \frac{d}{h}\right) \exp\left(-k \frac{u}{u_*} + \Psi_h\right) \right] \quad (a)$$

$$\frac{u_*}{u} = \min \left[ (C_S + C_R \lambda_f)^{0,5}, \left(\frac{u_*}{u}\right)_{max} \right] \quad (b) \quad (6)$$

$$d = h \left[ 1 - \frac{1 - \exp(-(C_{dl} 2 \lambda_f)^{0,5})}{(C_{dl} 2 \lambda_f)^{0,5}} \right] \quad (c)$$

em (6.a),  $\Psi_h = 0,193$  é uma função de influência da rugosidade da subcamada. Em (6.b),  $C_S = 0,003$  é o coeficiente de arrasto para uma superfície livre de obstáculos,  $C_R = 0,3$  é o coeficiente de arrasto para um obstáculo isolado e  $(u_*/u)_{max}$  é um valor constante (0,3), quando  $\lambda_f < \lambda_{f(max)}$ , sendo  $\lambda_f$  o índice de área frontal definido pela razão entre a área frontal (perpendicular ao fluxo) sobre a área total coberta por elementos de rugosidade.  $C_{dl} = 7,5$  em (6.c), é um parâmetro livre (Raupach, 1994).

O método desenvolvido por Raupach (1994) é semiempírico e morfológico, adequado para localidades com vegetação esparsa, baixa topografia e áreas urbanas nas redondezas (Shen et al., 2022).

Weligepolage et al. (2012a) testaram quatro modelos morfométricos, para alimentar dois modelos digitais de altura do dossel (*Canopy Height Model* - CHM). Porém, seus resultados mostraram que o método de Raupach (1994) apresentou melhor desempenho.

O intuito de Kent et al. (2017) foi encontrar os valores de  $z_0$  e  $d$  considerando vegetação junto a edificações, desenvolvendo o método morfométrico de Macdonald et al. (1998), descrito em (7).

$$z_0 = h \left[ \left( 1 - \frac{d}{h} \right) \exp \left( - \left( 0,5 \frac{C_D}{k^2} \left( 1 - \frac{d}{h} \right) \lambda_f \right)^{-0,5} \right) \right]$$

$$d = h [1 + A^{-\lambda_p} (\lambda_p - 1)] \quad (7)$$

onde  $C_D$  é coeficiente de arrasto de obstáculo. O valor de  $A$  controla a convexidade da curva e quando  $A = 1$ ,  $d/h = \lambda_p$  que é um caso limite.  $\lambda_p$  é a razão entre a área plana dos obstáculos e a área do lote (Macdonald et al., 1998).

O trabalho de Macdonald et al. (1998) aprimora o método de Lettau (1969), que é limitado a densidades de elementos de baixa rugosidade, inserindo o parâmetro  $C_D$ . Pode ser aplicado a superfícies heterogêneas, regiões urbanas (Li et al., 2017) e elementos ásperos de diferentes densidades que possuem edifícios dispostos uniformemente com arestas e cantos retos (Shen et al., 2022).

Alguns trabalhos escolheram não aplicar e nem desenvolver uma metodologia para o cálculo do  $z_0$ . É o caso de autores que construíram uma tabela com faixas ótimas para valores de  $z_0$  para serem aplicadas a um determinado tipo de superfície. Montero et al. (2018) fizeram método para a criação de uma tabela de valores de  $z_0$  e  $d$ , para seu estudo na ilha de Gran Canaria (Espanha). Sua tabela compreende vários tipos de solos e foi aplicada a um modelo de vento *downscaling*.

Com o intuito de substituir os valores padrão de  $z_0$  aplicados no modelo de qualidade do ar WRF/Chem (*Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry*), Shen et al. (2020) propuseram uma atualização baseada nos valores pré-definidos por vários autores e métodos para diferentes categorias de superfície, também a partir da construção de uma tabela.

A confecção de tabelas também é um método utilizado para a obtenção de valores ótimos de  $z_0$  a partir das características da superfície. Davenport (1960) confeccionou uma tabela baseada em fotografias e descrições das estações anemométricas, para seu estudo da estrutura da velocidade do vento. Wieringa (1992) apresentou um estudo para a atualização da classificação de Davenport (1960). Anos mais tarde, Davenport et al. (2000) realizaram uma atualização dessa tabela a fim de torná-la mais confiável e abranger uma quantidade maior de superfícies.

Huq and Rahman (2018) revisaram três tipos de métodos de obtenção do  $z_0$  em seu trabalho para aplicar a um modelo de coberturas urbanas. O primeiro é o método morfométrico, onde cita Macdonald et al. (1998). O segundo é baseado no cálculo do  $C_D$ . E no terceiro, eles utilizam uma

relação, já estabelecida por outros autores, desenvolvida a partir de métodos anemométricos ( $z_0 \approx h/10$  e  $d \approx 2h/3$ ).

Cheng et al. (2019), em um estudo de caso para a ilha de Taiwan, e Han et al. (2015), para uma pesquisa em três pontos no planalto Tibetano, utilizaram o comprimento de rugosidade aerodinâmica efetiva ( $z_{0\text{eff}}$ ), que é uma média ponderada dos comprimentos de rugosidade individuais que compõem o terreno heterogêneo (Fiedler and Panofsky, 1972).

Barnéoud and Ek (2020) derivaram  $u_*$  e  $z_0$  a partir da regressão linear de  $u$  (velocidade do vento), como variável dependente, versus  $\ln(z)$ , como variável independente, minimizando os desvios de  $u$ . Estes autores verificaram que a aplicação do método dos mínimos quadrados ordinários, por um lado minimizam os desvios de  $\ln(z)$ , no entanto, superestima sistematicamente os valores  $u_*$  e  $z_0$ .

Vários autores já descreveram métodos para a determinação do  $z_0$ , e de acordo com Grimmond and Oke (1999), estes podem ser divididos em duas categorias principais. A dos métodos morfométricos, que necessitam do conhecimento das características da superfície, como a geometria e a distribuição dos elementos de rugosidade (Macdonald et al. 1998; Raupach 1994; Choudhury and Monteith 1988). E os métodos micrometeorológicos (ou anemométricos), que utilizam medições *in situ* de parâmetros aerodinâmicos, como vento e turbulência (Chen et al. 1993; Charnock 1955). Enquanto outros elaboraram tabelas para encontrar os valores de  $z_0$  para diferentes tipos de superfícies (Davenport et al. 2000; Wieringa 1992; Davenport 1960).

Diante dos métodos apresentados, a Tabela 1 apresenta um resumo contemplando os principais parâmetros necessários e suas aplicações dos métodos apresentados nesse estudo.

Tabela 1. Métodos de parametrização do  $z_0$  com parâmetros de entrada e aplicações.

Referencias	Parâmetros	Aplicações
Charnock (1955)	Celeridade e velocidade do vento em 3D.	Superfície marinha e região costeira.
Choudhury and Monteith (1988)	LAI e altura da vegetação.	Aplicado em escalas regionais.
Chen et al. (1993)	Velocidade do vento em 3D.	Onde medições da velocidade do vento são realizadas em, pelo menos, um único nível.
Raupach (1994)	Altura dos obstáculos; e índice de área frontal.	Para áreas de vegetação esparsa com pequenos declives da topografia
Macdonald et al. (1998)	Altura dos obstáculos; coeficiente de arrasto; e densidade de área plana dos obstáculos.	Para superfícies heterogêneas e regiões urbanas.

A escolha de uma metodologia deve está relacionada tanto a sua região de aplicação quanto à disponibilidade dos recursos, para obtenção dos parâmetros necessários no cálculo do  $z_0$ . Para fins de obtenção de energia eólica, a aplicação do método deve estar voltada para a região do vento predominante, na área de estudo.

## 5. DISCUSSÕES

A ideia principal deste trabalho foi listar as metodologias mais usadas para a obtenção do parâmetro  $z_0$ . É intenção dos autores que essas possam ser aplicadas para estimativa da geração energética no planejamento de parques eólicos. Considerando os trabalhos selecionados, após a uma revisão sistemática, foram obtidos os métodos mais recentemente usados.

Os métodos morfométricos são mais adequados para o levantamento desse parâmetro em grandes áreas, não havendo a necessidade de ir a campo. Podem ser alcançados a partir de índices (por exemplo, de área foliar e de área frontal) obtidos através da observação visual do terreno, imagens aéreas ou por técnicas de sensoriamento remoto.

Os métodos micrometeorológicos, também chamados de aerodinâmicos, não têm a necessidade de caracterizar a superfície. Os valores de  $z_0$  são encontrados a partir da medida da velocidade do vento em três dimensões. Podem não caracterizar o  $z_0$  de toda área de estudo, apenas a direção do vento predominante utilizada na análise. A principal desvantagem em relação a outros métodos é o custo elevado de manutenção e operação para a instalação das torres anemométricas.

A elaboração de tabelas também foram consideradas nesse trabalho como um método para encontrar valores ótimos de  $z_0$ . Alguns autores buscam, em outras bibliografias, valores ou intervalos que já foram utilizados para aplicar a uma determinada característica da superfície.

O conceito do  $z_{0\text{eff}}$  não foi detalhado nesse trabalho por não ser adequado em estudos para a implementação de parques eólicos, uma vez que ele considera uma média do  $z_0$  encontrado para vários setores, diminuindo a importância da região com a direção do vento predominante.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a colaboração e o suporte do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Energias Oceânicas e Fluviais (INEOF), Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Equatorial Energia e GeraMaranhão.

## REFERÊNCIAS

ABEEólica (2021). INFOVENTO 21. Library Catalog: abeeolica.org.br.

Bahamonde, M.I. and Litrán, S.P. (2019). Study of the energy production of a wind turbine in the open sea considering the continuous variations of the atmospheric stability and the sea surface roughness. *Renewable Energy*, 135, 163–175. doi:10.1016/j.renene.2018.11.075.

Barnéoud, P. and Ek, N. (2020). On the Application of Linear Regression to Surface-Layer Wind Profiles for Deducing Roughness Length and Friction Velocity. *Boundary-Layer Meteorology*, 174(2), 327–339. doi:10.1007/s10546-019-00479-8.

Charnock, H. (1955). Wind stress on a water surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 81(350), 639–640. doi:10.1002/qj.49708135027.

Chen, J.Y., Wang, J.M., and Mitsuaki, H. (1993). An independent method to determine the surface roughness length. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 17(1), 21–26. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1993.01.03.

Chen, Q., Jia, L., Hutjes, R., and Menenti, M. (2015). Estimation of Aerodynamic Roughness Length over Oasis in the Heihe River Basin by Utilizing Remote Sensing and Ground Data. *Remote Sensing*, 7(4), 3690–3709. doi:10.3390/rs70403690.

Cheng, F.Y., Lin, C.F., Wang, Y.T., Tsai, J.L., Tsuang, B.J., and Lin, C.H. (2019). Impact of Effective Roughness Length on Mesoscale Meteorological Simulations over Heterogeneous Land Surfaces in Taiwan. *Atmosphere*, 10(12), 805. doi:10.3390/atmos10120805.

Choudhury, B.J. and Monteith, J.L. (1988). A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 114(480), 373–398. doi:10.1002/qj.49711448006.

Colin, J. and Faivre, R. (2010). Aerodynamic roughness length estimation from very high-resolution imaging LIDAR observations over the Heihe basin in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(12), 2661–2669. doi:10.5194/hess-14-2661-2010.

Council, G.W.E. (2021). GWEC| GLOBAL WIND REPORT 2021.

Davenport, A.G. (1960). Rationale for Determining Design Wind Velocities. *Journal of the Structural Division*, 86(5), 39–68. doi:10.1061/JSDEAG.0000521.

Davenport, A., Grimmond, C., Oke, T., and Wieringa, J. (2000). Estimating the roughness of cities and sheltered country. *15th conference on probability and statistics in the atmospheric sciences/12th conference on applied climatology, Asheville, NC, American Meteorological Society*, 96–99.

Faivre, R., Colin, J., and Menenti, M. (2017). Evaluation of Methods for Aerodynamic Roughness Length Retrieval from Very High-Resolution Imaging LIDAR Observations over the Heihe Basin in China. *Remote Sensing*, 9(1), 63. doi:10.3390/rs9010063.

Fiedler, F. and Panofsky, H.A. (1972). The geostrophic drag coefficient and the 'effective' roughness length. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 98(415), 213–220. doi:10.1002/qj.49709841519.

Fluxdata Portal (2022). FLUXNET2015 Dataset. URL <https://fluxnet.fluxdata.org/data/fluxnet2015-dataset/>.

Foken, T. (2017). *Micrometeorology*. Springer Berlin Heidelberg, New York, NY.

Foreman, R.J. and Emeis, S. (2010). Revisiting the Definition of the Drag Coefficient in the Marine Atmospheric Boundary Layer. *Journal of Physical Oceanography*, 40(10), 2325–2332. doi:10.1175/2010JPO4420.1.

Garratt, J. (1994). Review: the atmospheric boundary layer. *Earth-Science Reviews*, 37(1-2), 89–134. doi:10.1016/0012-8252(94)90026-4.

Garratt, J., Fernando, H., Hicks, B., and Wilczak, J. (2020). Contributions of PA Taylor, L Mahrt, JJ Finnigan, MR Raupach to Boundary-Layer Meteorology: 1970–2020. *Boundary-Layer Meteorology*, 177(2-3), 153–167. doi:10.1007/s10546-020-00555-4.

Grimmond, C.S.B. and Oke, T.R. (1999). Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. *Journal of Applied Meteorology*

- logy, 38(9), 1262–1292. doi:10.1175/1520-0450(1999)038<1262:APOUAD>2.0.CO;2.
- Han, C., Ma, Y., Su, Z., Chen, X., Zhang, L., Li, M., and Sun, F. (2015). Estimates of effective aerodynamic roughness length over mountainous areas of the Tibetan Plateau. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(689), 1457–1465. doi:10.1002/qj.2462.
- Hara, T., Belcher, S., Ginis, I., and Moon, I. (2004). Air-Sea Momentum Flux at High Winds. In *Meeting Amer Meteor Soc*.
- He, Y., Fu, J., Chan, P.W., Li, Q., Shu, Z., and Zhou, K. (2021). Reduced Sea-Surface Roughness Length at a Coastal Site. *Atmosphere*, 12(8), 991. doi:10.3390/atmos12080991.
- Hu, X., Shi, L., Lin, L., and Magliulo, V. (2020). Improving surface roughness lengths estimation using machine learning algorithms. *Agricultural and Forest Meteorology*, 287, 107956. doi:10.1016/j.agrformet.2020.107956.
- Huq, P. and Rahman, A. (2018). Optimizing the Determination of Roughness Parameters for Model Urban Canopies. *Boundary-Layer Meteorology*, 168(3), 497–515. doi:10.1007/s10546-018-0352-8.
- Kent, C.W., Grimmond, S., and Gatey, D. (2017). Aerodynamic roughness parameters in cities: Inclusion of vegetation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 169, 168–176. doi:10.1016/j.jweia.2017.07.016.
- Landberg, L. (2016). *Meteorology for wind energy: an introduction*. Wiley, Chichester, West Sussex. OCLC: 951808975.
- Lettau, H. (1969). Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, 8(5), 828–832. Publisher: JSTOR.
- Li, A., Zhao, W., Mitchell, J.J., Glenn, N.F., Germino, M.J., Sankey, J.B., and Allen, R.G. (2017). Aerodynamic Roughness Length Estimation with Lidar and Imaging Spectroscopy in a Shrub-Dominated Dryland. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 83(6), 415–427. doi:10.14358/PERS.83.6.415.
- Li, M., Liu, X., Shu, L., Yin, S., Wang, L., Fu, W., Ma, Y., Yang, Y., and Sun, F. (2021). Variations in surface roughness of heterogeneous surfaces in the Nagqu area of the Tibetan Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(5), 2915–2930. doi:10.5194/hess-25-2915-2021.
- Li, W. and Liu, C.H. (2021). On the Flow Response to an Abrupt Change in Surface Roughness. *Flow, Turbulence and Combustion*. doi:10.1007/s10494-021-00281-y.
- Lv, P. and Dong, Z. (2012). Aerodynamic roughness length of sandy beds and gravel beds. *Environmental Earth Sciences*, 67(6), 1663–1668. doi:10.1007/s12665-012-1607-1.
- Macdonald, R., Griffiths, R., and Hall, D. (1998). An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmospheric Environment*, 32(11), 1857–1864. doi:10.1016/S1352-2310(97)00403-2.
- Manwell, J.F., McGowan, J.G., and Rogers, A.L. (2011). *Wind energy explained: theory, design and application*. Wiley, Chichester, 2. ed., repr. with cor edition. OCLC: 767938986.
- Martins, F.R., Guarnieri, R.A., and Pereira, E.B. (2008). O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30, 1304–1. Publisher: SciELO Brasil.
- Montero, G., Rodríguez, E., Oliver, A., Calvo, J., Escobar, J.M., and Montenegro, R. (2018). Optimisation technique for improving wind downscaling results by estimating roughness parameters. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 174, 411–423. doi:10.1016/j.jweia.2018.01.011.
- Nelli, N.R., Temimi, M., Fonseca, R.M., Weston, M.J., Thota, M.S., Valappil, V.K., Branch, O., Wulfmeyer, V., Wehbe, Y., Al Hosary, T., Shalaby, A., Al Shamsi, N., and Al Naqbi, H. (2020). Impact of Roughness Length on WRF Simulated Land-Atmosphere Interactions Over a Hyper-Arid Region. *Earth and Space Science*, 7(6). doi:10.1029/2020EA001165.
- Petersen, E.L., Mortensen, N.G., Landberg, L., Højstrup, J., and Frank, H.P. (1997). *Wind power meteorology*. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- Peña, A. and Gryning, S.E. (2008). Charnock’s Roughness Length Model and Non-dimensional Wind Profiles Over the Sea. *Boundary-Layer Meteorology*, 128(2), 191–203. doi:10.1007/s10546-008-9285-y.
- Pinto, M.d.O. (2013). *Fundamentos de energia eólica*. Grupo Gen - LTC, Rio de Janeiro. OCLC: 857059243.
- Raupach, M.R. (1994). Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index. *Boundary-Layer Meteorology*, 71(1-2), 211–216. doi:10.1007/BF00709229.
- Sampaio, R.F. and Mancini, M.C. (2007). Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, 11, 83–89. Publisher: SciELO Brasil.
- Shen, C., Shen, A., Cui, Y., Chen, X., Liu, Y., Fan, Q., Chan, P., Tian, C., Wang, C., Lan, J., Gao, M., Li, X., and Wu, J. (2022). Spatializing the roughness length of heterogeneous urban underlying surfaces to improve the WRF simulation-part 1: A review of morphological methods and model evaluation. *Atmospheric Environment*, 270, 118874. doi:10.1016/j.atmosenv.2021.118874.
- Shen, C., Shen, A., Tian, C., Zhou, S., Zhu, L., Chan, P., Fan, Q., Fan, S., and Li, W. (2020). Evaluating the impacts of updated aerodynamic roughness length in the WRF/Chem model over Pearl River Delta. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 132(3), 427–440. doi:10.1007/s00703-019-00698-1.
- Smith, M.W. (2014). Roughness in the Earth Sciences. *Earth-Science Reviews*, 136, 202–225. doi:10.1016/j.earscirev.2014.05.016.
- Stull, R.B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*. Atmospheric sciences library. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht ; Boston.
- The EOS Flagship (2022). Terra. URL <https://terra.nasa.gov/>. Publisher: 610 WebDev.
- Tranfield, D., Denyer, D., and Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British journal of management*, 14(3), 207–222. Publisher: Wiley Online Library.
- Troen, I. and Petersen, E.L. (eds.) (1989). *European wind atlas*. Risø National Laboratory, Roskilde. Medium: Verschiedene Materialien.

- Van Eck, N.J. and Waltman, L. (2020). VOSviewer manual. *Leiden: Univeriteit Leiden*, 1–53.
- Weligepolage, K., Gieske, A., and Su, Z. (2012a). Surface roughness analysis of a conifer forest canopy with airborne and terrestrial laser scanning techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1), 192–203. doi:10.1016/j.jag.2011.08.014.
- Weligepolage, K., Gieske, A., van der Tol, C., Timmermans, J., and Su, Z. (2012b). Effect of sub-layer corrections on the roughness parameterization of a Douglas fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 162-163, 115–126. doi:10.1016/j.agrformet.2012.04.017.
- Wieringa, J. (1992). Updating the Davenport roughness classification. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41(1-3), 357–368. doi:10.1016/0167-6105(92)90434-C.
- Yu, M., Wu, B., Yan, N., Xing, Q., and Zhu, W. (2016). A Method for Estimating the Aerodynamic Roughness Length with NDVI and BRDF Signatures Using Multi-Temporal Proba-V Data. *Remote Sensing*, 9(1), 6. doi:10.3390/rs9010006.
- Yuan, X., Hamdi, R., Ochege, F.U., De Maeyer, P., Kurban, A., and Chen, X. (2021). Assessment of surface roughness and fractional vegetation coverage in the CoLM for modeling regional land surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 303, 108390. doi:10.1016/j.agrformet.2021.108390.
- Zhang, Q., Yao, T., and Yue, P. (2016). Development and test of a multifactorial parameterization scheme of land surface aerodynamic roughness length for flat land surfaces with short vegetation. *Science China Earth Sciences*, 59(2), 281–295. doi:10.1007/s11430-015-5137-z.
- Zhang, Q., Yao, T., Yue, P., Zhangf, L., and Zeng, J. (2013). The influences of thermodynamic characteristics on aerodynamic roughness length over land surface. *Acta Meteorologica Sinica*, 27(2), 249–262. doi:10.1007/s13351-013-0209-5.