

## Análise de dados anemométricos de Belo Jardim

### RESUMO

**Marcos Roberto Bombacini**  
[bombacini@utfpr.edu.br](mailto:bombacini@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

**Rosângela Aparecida Botinha Assumpção**  
[rosangelaa@utfpr.edu.br](mailto:rosangelaa@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

**Roberto Marafon Leandro**  
[reandro@alunos.utfpr.edu.br](mailto:reandro@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

**Luiz Henrique Tomassoni Piccinin**  
[luiz.2001@alunos.utfpr.edu.br](mailto:luiz.2001@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

No presente trabalho foram analisados dados anemométricos da cidade de Belo Jardim, Pernambuco, obtidos do Projeto SONDA. A velocidade do vento, nas alturas de 25m e 50m, foi modelada a partir da distribuição de probabilidade de Weibull. Dessa maneira, verificou-se que, para a altura de 50 metros, os ventos se mostraram mais intensos e constantes em comparação com a altura de 25 metros. Ademais, ressalta-se que os valores obtidos comprovaram que o fator de forma permaneceu entre 1,4 e 3,9, em ambas as alturas, validando-se, assim, matematicamente, o estudo realizado. Além disso, o método de análise utilizado nesse trabalho se mostrou possível de ser aplicado, em dados de alguma região escolhida, no estudo da viabilidade de instalação de turbinas eólicas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelos matemáticos. Ventos - Velocidade. Energia eólica. Estimativa de parâmetros. Potencial eólico.

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Conforme a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), no Brasil, a energia eólica alcançou a marca de 15 gigawatt (GW) em capacidade instalada - no total são 601 parques eólicos, com 7 mil aerogeradores - aumentando-se, dessa maneira, a relevância dessa matriz elétrica nacionalmente.

A energia eólica é vantajosa tanto para quem consome como para quem gera, pois, o vento é uma fonte inesgotável, natural e renovável, de energia. Ademais, as usinas eólicas são inofensivas ao meio ambiente e se implementam facilmente junto às pastagens e agricultura, dispensando, assim, desapropriações ou deslocamento da população. Nesse viés, em razão da falta de disputa de espaço e por fornecer energia elétrica, as usinas eólicas auxiliam na fixação da indústria.

Dessa forma, visando-se construir ou instalar aerogeradores, mostra-se necessária a avaliação do potencial eólico de uma região para se especificar a quantidade, modelo e viabilidade, de turbinas eólicas a serem instaladas, buscando-se, então, o melhor aproveitamento da energia gerada com o menor custo possível.

O objetivo deste trabalho foi realizar a modelagem de registros anemométricos - das velocidades do vento - da cidade de Belo Jardim, Pernambuco, a qual faz parte do projeto SONDA, para avaliar o potencial eólico desta região, pois, ela apresenta altitude próxima à altitude da cidade de Toledo, Paraná, e conforme Pereira, 2016, a altitude influencia nesses valores.

## METODOLOGIA

O projeto SONDA se pauta em pesquisas de clima e meteorologia e objetiva à articulação de um sistema de coleta de dados ambientais úteis, e precisos, para serem utilizados por órgãos envolvidos na geração de energia, principalmente, renováveis baseadas em solar ou eólica.

Assim, esse projeto disponibiliza, de forma online e gratuita, dados radiométricos, meteorológicos e anemométricos, de diferentes localidades brasileiras, que podem ser utilizados para, por exemplo, pesquisa de viabilidade de energia eólica em uma localidade específica.

A escolha dos dados da cidade de Belo Jardim se deu devido ao fato da sua altitude (718 metros) ser a mais próxima da altitude de Toledo, Paraná, (760 metros). Ademais, como esse trabalho se pauta em uma análise anemométrica visando o estudo futuro de geração de energia eólica, considera-se apenas os valores das velocidades do vento. Então, não se evidencia necessário o apego a outros fatores, por exemplo os climáticos, na escolha de local. Dessa forma, utilizando-se o software R (2019), foram analisados os dados do mês de agosto do ano de 2005 (os dados foram coletados de dez em dez minutos).

Além disso, a função de distribuição de probabilidade que se denota gratificadamente moldável às diversas variações do vento é a distribuição Weibull, afinal, conforme Santos (2015, p. 17), esta função "{...}" permite o cálculo do fator de capacidade e da energia prospectada no local de cada amostra de vento ". Esta função de densidade de probabilidade se ilustra abaixo:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

Nesse sentido,  $f(v)$  é a função de Densidade de Probabilidade de Weibull,  $k$  é o fator de forma, adimensional, e  $c$  é o fator de escala, em m/s.

Essa função se mostra válida quando  $k > 1$  e  $c > 0$ . Caso  $v < 0$  a função assume valor Zero.

Segundo Santos (2015, *apud* Silva, 2003) os valores de forma e de escala são calculados com base nos dados anemométricos coletados e ambos interferem na forma da distribuição. Além disso, o fator de escala depende do fator de forma, fazendo, assim, impossível a análise individual dos parâmetros. Nesse sentido, o fator de forma  $k$ , por exemplo, representa, à distribuição, a taxa de constância dos ventos. Assim, quanto maior o valor dessa unidade mais uniformes são os ventos. Em contraste, o fator de escala  $c$  ilustra um aumento na disparidade dos ventos proporcionalmente ao próprio valor.

Segundo Santos, 2015, uma das maneiras de cálculo do fator de forma se expressa através da equação abaixo:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (2)$$

Sendo  $\sigma$  o desvio padrão e  $\bar{v}$  a velocidade média dos dados coletados.

Conforme Santos (2015, *apud* Salvador, 2012), se o valor de  $k$  for compreendido entre 1,4 e 3,9, mostra-se possível a aplicação dos valores no estudo do potencial eólico.

Como apresentado por Santos (2015, *apud* Almeida, 2006), ao se conhecer a média e o desvio padrão de velocidade do vento dos dados anemométricos coletados, pode-se calcular o fator de escala  $c$  usando a equação abaixo:

$$c = \frac{(\bar{v})}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (3)$$

Foram realizadas análises descritivas da variável velocidade do vento e a modelagem da distribuição de probabilidade Weibull utilizando a linguagem R (2019).

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva da velocidade do vento (m/s) em 25m e 50m de altura. Observa-se que a velocidade média e a mediana foram superiores na altura de 50m, porém, a variabilidade foi menor (desvio padrão).

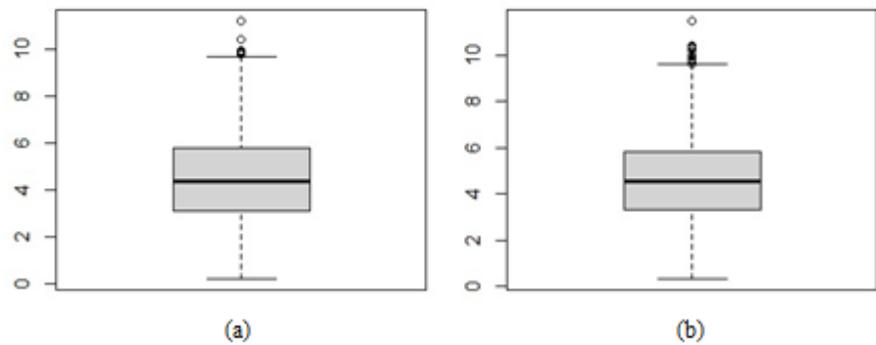
Tabela 1 – Estatística descritiva da velocidade do vento (m/s)

Altura	25 metros	50 metros
Média	4,480	4,622
Desvio Padrão	1,808	1,747
Variância	3,258	3,053
Mínimo	0,190	0,330
Máximo	11,21	11,49
Mediana	4,380	4,530

Fonte: Autoria própria (2020).

Na Figura 1, se observam os *boxplots* da velocidade do vento a 25m e a 50m. Em ambos, a distribuição dos dados é simétrica, todavia, com a presença de pontos discrepantes de valores elevados da velocidade do vento.

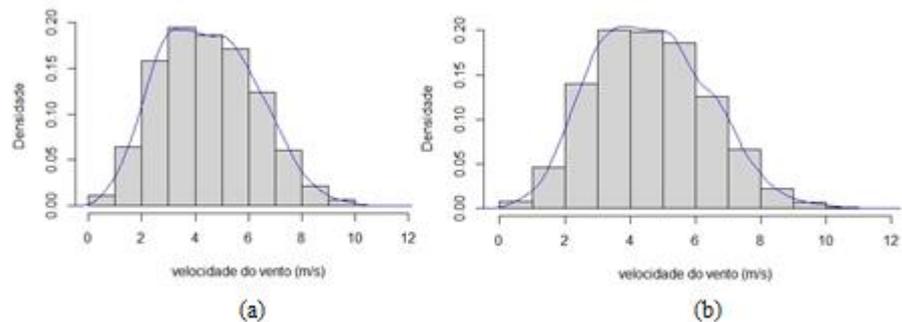
Figura 1 - *Boxplots* da (a) velocidade do vento a 25m e (b) velocidade do vento a 50m.



Fonte: Autoria própria (2020).

A partir da Figura 2 é possível observar a simetria e a presença de cauda mais alongada a direita na distribuição da velocidade do vento a 25m e a 50m.

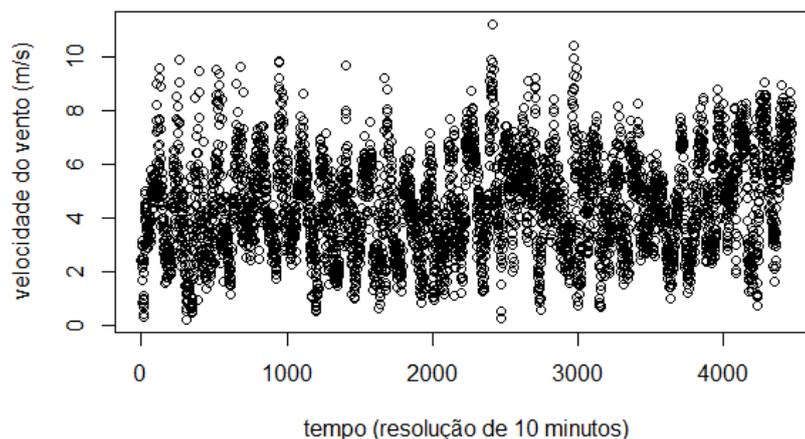
Figura 2 – Histogramas da (a) densidade da velocidade do vento a 25m e (b) densidade da velocidade do vento a 50m.



Fonte: Autoria própria (2020).

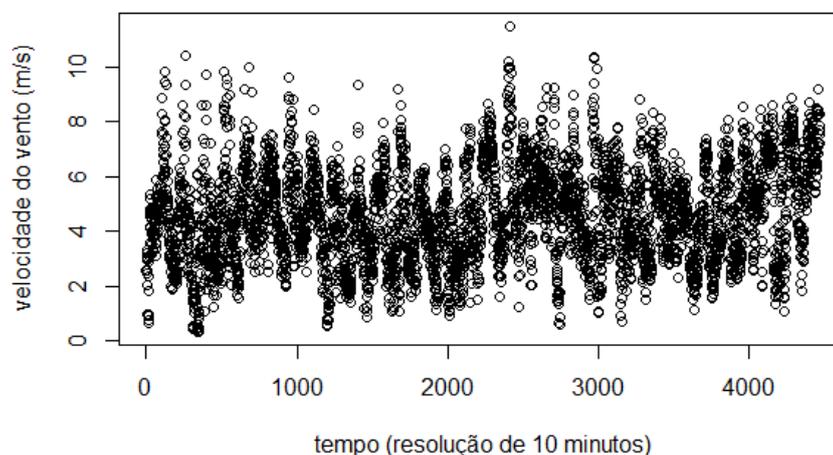
Nas Figuras 3 e 4 estão os diagramas de dispersão da velocidade do vento ao longo do tempo com resolução de 10 minutos a 25m e a 50m, respectivamente. Ambos apresentaram características parecidas com oscilações da velocidade do vento ao longo do tempo.

Figura 3 - Diagrama de dispersão da velocidade do vento a 25m.



Fonte: Autoria própria (2020).

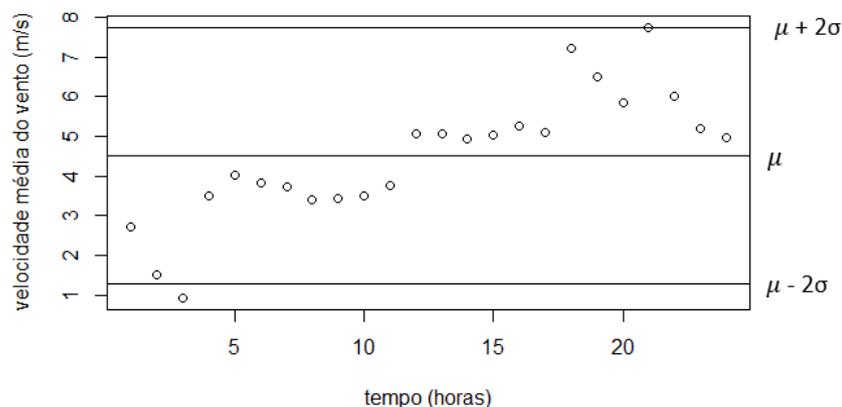
Figura 4 - Diagrama de dispersão da velocidade do vento a 50m.



Fonte: Autoria própria (2020).

Também foram construídos os diagramas das Figuras 5 e 6 com o intuito de analisar a velocidade média do vento em resolução de 60 minutos (1 hora) durante as 24 horas do dia. A linha central do diagrama corresponde à média da velocidade do vento ( $\mu$ ), enquanto que as linhas laterais correspondem a média mais ou menos dois desvios padrões ( $\mu \pm 2\sigma$ ).

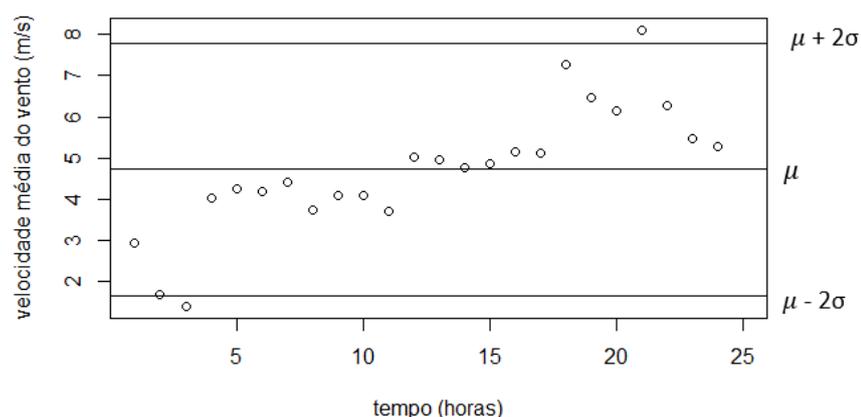
Figura 5 – Diagrama de dispersão da velocidade média do vento por hora a 25m.



Fonte: Autoria própria (2020).

Em ambos se observa uma queda da velocidade do vento nas três primeiras horas do dia, de forma que às 3h ocorreu a velocidade média mínima. De 4h a 11h se evidencia uma estabilidade da velocidade média abaixo da média geral ( $\mu$ ), contrastando-se, dessa maneira, com o período das 12h às 17h, onde os ventos estavelmente se mostravam acima da média geral ( $\mu$ ). Das 18h até às 24h ocorre uma oscilação acima da média geral, sendo que a média da velocidade do vento às 21h é a máxima do dia. Na Figura 6 a média da velocidade às 3h encontra-se abaixo da linha de menos dois desvios padrões ( $\mu - 2\sigma$ ) e às 21h encontra-se acima de dois desvios padrões ( $\mu + 2\sigma$ ).

Figura 6 – Diagrama de dispersão da velocidade média do vento por hora a 50m.



Fonte: Autoria própria (2020).

O modelo de distribuição de probabilidade Weibull foi ajustado aos dados e os parâmetros de forma e escala são apresentados na Tabela 2. Tanto a estimativa do fator de forma ( $k$ ) quanto do fator de escala ( $c$ ) para 25m foram inferiores aos respectivos fatores obtidos a 50m.

Conforme afirma Santos (2015, *apud* Salvador, 2012) como os valores obtidos para o fator de forma ( $k$ ) estão compreendidos entre 1,4 e 3,9 existe potencial eólico.

Tabela 2 – Estimativa dos fatores de forma e escala.

Altura	25 metros	50 metros
Fator de forma (k)	2,676	2,871
Fator de escala (c)	5,037	5,185

Fonte: Autoria própria (2020).

## CONCLUSÃO

A análise dos dados permitiu verificar como é o comportamento da velocidade do vento ao longo do dia em intervalos de 10 minutos e em intervalos de 60 minutos. Também se constatou que as características do vento a 25m e a 50m são as mesmas, porém a 50m os valores são superiores. Como as estimativas do fator de forma (k) em ambas as alturas se contemplaram entre 1,4 e 3,9, confirma-se a viabilidade da instalação do sistema de energia eólica. Além disso, esse estudo de caso conferiu o conhecimento necessário para a aplicação de um método a valores anemométricos futuramente coletados em Toledo, Paraná, possibilitando, gradativamente, o estudo sobre a viabilidade da instalação de turbinas eólicas nessa região.

## REFERÊNCIAS

ABEEólica, [s.d.], disponível em [http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual\\_2018.pdf](http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Boletim-Anual_2018.pdf). Acesso em: 07/10/2020.

COPEL, **Eólica**. disponível em:  
<https://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F301DC3A7702B129303257405005C2FDB>. Acesso em: 01/09/2020.

PEREIRA, M. V. R. **Impacto da altura de aerogeradores sobre a velocidade do vento, energia, efeito de esteira e intensidade de turbulência: estudos de caso em três projetos eólicos localizados no Brasil**. 2016. (Programa de pós-graduação em engenharia mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em:  
<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/134892/000988356.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 07/10/2020.

R Core Team (2019). **The R Project for Statistical Computing**. Disponível em:  
<https://www.r-project.org>. Acesso em: 02/09/2020.

SANTOS, P. M. D. **Procedimento para prospecção de potencial eólico com auxílio de sistemas de informação geográfica**. 2015. (Programa de pós graduação em engenharia de energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. Disponível em:  
[https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/332/dissertacao\\_santos4\\_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/332/dissertacao_santos4_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 02/09/2020.

SONDA, **Estação de Belo Jardim**, [s.d.], Disponível em:  
<http://sonda.ccst.inpe.br/basedados/belojardim.html>. Acesso em: 02/09/2020.