

COMPARAÇÃO DE TRÊS MÉTODOS NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL APLICADA À VELOCIDADE DO VENTO EM CIDADES COSTEIRAS DE ALAGOAS, BRASIL

José Antonio Guarienti^{1*}, Aleska K. Almeida², Ayrton R. O. Ferreira¹, Armando Menegati Neto¹, Sarah R. Durães¹, Henrique A. D. Heck¹, Paulo V. F. Lopes¹, Leidiane S. Marques¹, Isabel Kaufmann de Almeida³

1. Estudante da Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (FAENG-UFMS)
2. Pesquisadora da FAENG-UFMS
3. Professora da FAENG-UFMS - Orientadora

Resumo

Para a análise do potencial de produção de energia eólica de uma região diversos fatores são verificados, um deles é o comportamento da velocidade do vento. Esse comportamento pode ser representado por uma função densidade de probabilidade. O presente estudo trata da comparação e análise dos métodos da máxima verossimilhança, empírico e da densidade de potência, na determinação dos parâmetros da distribuição de Weibull aplicados à dados de velocidade do vento. Os parâmetros de forma k e de escala c são determinados com base nos dados de velocidade horária do vento, fornecidos pelo INMET, das cidades de Coruripe e Maceió, região costeira do estado de Alagoas, Brasil. Para analisar a eficiência dos métodos são utilizados os testes estatísticos (erro quadrático médio) RMSE e (coeficiente de determinação) R^2 . Os resultados apresentados indicam a maior eficiência do método empírico para a cidade de Coruripe e a maior eficiência do método da máxima verossimilhança para a cidade de Maceió.

Palavras-chave: Parametrização; Testes estatísticos; Potencial eólico.

Introdução

Visando o equilíbrio entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental, são cada vez maiores os investimentos em fontes de energia renováveis, destacando-se, entre elas, a energia eólica. Dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) demonstram que, em dezembro de 2018 no Brasil, a energia eólica representou 9% da matriz elétrica brasileira e dentro de pouco tempo passará a ser a segunda fonte mais representativa.

Conforme CRESEB (2001), as áreas reconhecidamente importantes para o aproveitamento do potencial eólico no Brasil compreendem os litorais Nordeste e Sul. Em 2018, os três maiores estados brasileiros em capacidade instalada de energia eólica são os nordestinos Rio Grande do Norte, Bahia e Ceará, nesta ordem, evidenciando o elevado potencial eólico da região. Alagoas é o único estado da região Nordeste que ainda não possui um parque eólico instalado.

Para análise mais precisa do potencial de produção de energia eólica é imprescindível que se conheça o comportamento da velocidade do vento. Tal característica pode ser representada por uma função densidade de probabilidade, sendo a distribuição de Weibull a mais usada e recomendada para determinar o potencial de energia eólica (Carta et al., 2009; Celik e Kolhe, 2013).

Tendo em vista avaliar o comportamento da distribuição da velocidade do vento no litoral do estado de Alagoas, no presente trabalho são comparados os métodos da máxima verossimilhança, empírico e da densidade de potência na determinação dos parâmetros da distribuição de Weibull aplicada às séries históricas de velocidades do vento dos municípios de Coruripe e Maceió, litoral de Alagoas.

Metodologia

Para a análise probabilística foram utilizados dados anemométricos de velocidade do vento de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponibilizados em formato de série temporal em resolução de uma hora e medidos a uma altura de dez metros de altura. A relação das estações e suas respectivas localizações são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Informações sobre as cidades.

Cidade	Latitude	Longitude	Anos de medição	Quantidade de dados horários
Coruripe	-10,128482	-36,286348	2008 - 2018	86929
Maceió	-9,551168	-35,770195	2003 - 2018	119611

Com base nos dados, a distribuição de Weibull pode ser descrita como uma função de densidade de probabilidade $f(v)$ e uma função de distribuição cumulativa $F(v)$, determinada pelas equações 1 e 2 (Seguro e Lambert, 2000; Akdag e Dinler, 2009; Rocha et al., 2012):

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (v > 0) \quad (\text{eq.1})$$

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (v > 0) \quad (\text{eq.2})$$

Onde k é o parâmetro de forma da distribuição de Weibull (adimensional), c é o parâmetro de escala da distribuição de Weibull (nas unidades da velocidade do vento) e v é a velocidade do vento.

Para estimar os parâmetros de Weibull os seguintes métodos foram utilizados.

Método da máxima verossimilhança

Neste método são requeridos cálculos iterativos, sendo os parâmetros k e c determinados de acordo com as equações 3 e 4 (Seguro e Lambert, 2000; Akdag e Dinler, 2009; Rocha et al., 2012).

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad (\text{eq.3})$$

$$c = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^k \right)^{\frac{1}{k}} \quad (\text{eq.4})$$

Onde n é o número de observações realizadas e v_i é a velocidade do vento medida no intervalo.

Método empírico

O método empírico é considerado uma variação do método dos momentos, onde os parâmetros de Weibull k e c são dados pelas equações 5 e 6 (Rocha et al., 2012).

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1,086} \quad (\text{eq.5})$$

$$\bar{v} = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (\text{eq.6})$$

Onde \bar{v} é a velocidade média do vento, σ é o desvio padrão dos dados observados de velocidade do vento e a função gama é definida na equação 7.

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt \quad (\text{eq.7})$$

Método da densidade de potência

O método da densidade de potência está relacionado aos dados médios da velocidade do vento e é definido pelas equações 8, 9 e 10 (Akdag e Dinler, 2009; Rocha et al., 2012).

$$E_{pf} = \frac{\bar{v}^3}{(\bar{v}^3)} \quad (\text{eq.8})$$

$$k = 1 + \frac{3,69}{(E_{pf})^2} \quad (\text{eq.9})$$

$$\bar{v} = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (\text{eq.10})$$

Onde E_{pf} é o fator de energia padrão.

Análise estatística

Para analisar a eficiência dos métodos utilizados, foram realizados os testes estatísticos erro do desvio padrão médio (RMSE) (eq. 11) e coeficiente de determinação (R^2) (eq.12) (Akdag e Dinler, 2009; Rocha et al., 2012).

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{eq.11})$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{eq.12})$$

Onde N é o número total de intervalos, y_i é a frequência das observações, x_i é a frequência de Weibull e \bar{y} é a média dos valores de y .

Resultados e Discussão

A partir dos dados de velocidade do vento das cidades de Coruripe e Maceió, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para cada cidade, foram calculados os parâmetros de Weibull, através dos métodos da máxima verossimilhança, empírico e da densidade de potência, com os respectivos resultados das análises de R^2 e RMSE (Tabela 2).

Tabela 2 – Comparação dos métodos para as diferentes cidades.

Cidade	Método	k (---)	c (m/s)	RMSE	R^2
Coruripe	Máx. Verossimilhança	2,001495663	2,658057244	0,029862477	0,926030710
	Empírico	1,994742241	2,650104387	0,029726999	0,926700342
	Densidade de potência	2,011091172	2,650491240	0,030105664	0,924821058
Maceió	Máx. Verossimilhança	1,664964752	3,022629034	0,034534227	0,829202058
	Empírico	1,692016737	3,020397325	0,035374837	0,820785949
	Densidade de potência	1,735256831	3,025379307	0,036777449	0,806292533

O método empírico apresentou resultados mais satisfatórios ao parametrizar a distribuição de Weibull para os dados da cidade de Coruripe. Tal resultado é evidenciado pelo valor mais baixo de RMSE e valor mais alto de R^2 obtidos. Da mesma forma, o método da máxima verossimilhança mostrou-se ser o mais eficiente para Maceió. De acordo com Seguro e Lambert (2000), o valor de k situa-se no intervalo de 1,5 a 3, dependendo da variabilidade do vento. Ainda segundo os autores, valores menores de k correspondem a ventos mais variáveis (mais tempestuosos). Dessa forma, constata-se que a cidade de Maceió apresenta ventos mais tempestuosos.

Conclusões

Neste estudo, ao analisar a eficiência de três métodos na parametrização da distribuição de Weibull para dados de velocidade do vento de duas cidades costeiras do estado de Alagoas, é possível obter as seguintes conclusões:

Para a cidade de Coruripe o método empírico foi mais eficiente ao estimar os parâmetros da distribuição de Weibull.

Para a cidade de Maceió o método da máxima verossimilhança foi mais eficiente ao estimar os parâmetros da distribuição de Weibull.

A cidade de Maceió apresenta ventos mais tempestuosos que a cidade de Coruripe.

Referências bibliográficas

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília, 2001. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>. Acesso em: 02 Mar. 2019.

AKDAĞ, Seyit A.; DINLER, Ali. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. **Energy conversion and management**, v. 50, n. 7, p. 1761-1766, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. Energia eólica chega a 14,71 GW de capacidade instalada Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/noticias/energia-eolica-chega-a-1471-gw-de-capacidade-instalada/>>. Acesso em: 25 Fev. 2019.

CELIK, Ali N.; KOLHE, Mohan. Generalized feed-forward based method for wind energy prediction. **Applied Energy**, v. 101, p. 582-588, 2013.

CARTA, Jose A.; RAMIREZ, Penelope; VELAZQUEZ, Sergio. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: Case studies in the Canary Islands. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 13, n. 5, p. 933-955, 2009.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br>> Acesso em: 27 fev. 2019.

SEGURO, J. V.; LAMBERT, T. W. Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, v. 85, n. 1, p. 75-84, 2000.

ROCHA, Paulo Alexandre Costa et al. Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. **Applied Energy**, v. 89, n. 1, p. 395-400, 2012.