

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE WEIBULL PARA APLICAÇÕES EÓLICAS EM DUAS REGIÕES DISTINTAS

Wênio Fhará Alencar Borges, wenioborges@hotmail.com^{1, 2}

Alex Maurício Araújo, ama@ufpe.br¹

Augusto Antônio Coutinho Silva, augustoacoutinho@gmail.com¹

Kennethy Rodrigues de Melo, kennethy.rodrigues@gmail.com¹

Eduardo Corte Real Fernandes, eduardocrfenandes@gmail.com¹

Eduardo José Novaes de Menezes, eduardomnovaes@gmail.com¹

Guilherme José Arruda Moura Rocha, guilhermejamr@gmail.com¹

Lucas Iolanda de Andrade, lucas_iolanda@hotmail.com¹

Oyama Douglas Queiroz de Oliveira Filho, oyamadouglas@gmail.com¹

¹Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciência e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Recife-PE, Brasil.

²Instituto Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil.

Resumo: Neste trabalho, o objetivo é determinar os parâmetros de forma (k) e de escala (c), da função densidade de probabilidade de Weibull através de quatro métodos numéricos, conhecidos como método gráfico (MG), método empírico de Justus (MEJ), método empírico de Lysen (MEL) e método do momento (MM) em duas localidades, Gravatá-PE e Osório-RS, sob a influência de dois regimes de ventos. Para isso, será utilizado os dados horários de ventos obtidos através do banco de dados Meteorom, da NASA, no período de 2006 a 2015. Análises estatística serão utilizadas para a determinação do melhor método utilizado na determinação desses parâmetros.

Palavras-chave: Distribuição de Weibull, parâmetros, eólica.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui três principais regiões com um grande potencial de geração de energia eólica, sendo que a maior delas está localizada na região Nordeste, onde o potencial eólico teórico é em torno de 75 GW para uma altura de nacela de turbina eólica a 50m. As outras duas regiões são a Sudeste (com 29,7 GW) e a Sul (com 22,8 GW). Esses valores poderiam dobrar, caso fosse considerado alturas de nacela a 80 e 100m [1]. Os principais regimes de ventos que predominam no Brasil são os alísios, que são ventos que ocorrem entre 0° (linha do equador) e 30° de latitude, e os ventos de oeste, que ocorrem entre 30° e 60° de latitude. As influências desses dois regimes propiciam bons potenciais de geração de energia eólica nas regiões nordeste e sul do país.

A maioria dos estudos relacionados à potência dos ventos se concentra no problema do ajuste de distribuições estatísticas aos dados de velocidade do vento. Dessa forma, foi constatado através de estudos que, para a maioria das ocorrências de vento, a distribuição de Weibull fornece um bom ajuste [2-4].

Nesse trabalho, o objetivo principal é determinar os parâmetros de forma (k) e de escala (c), da função densidade de probabilidade de Weibull através de quatro métodos numéricos, conhecidos como método gráfico (MG), método empírico de Justus (MEJ), método empírico de Lysen (MEL) e método do momento (MM) em duas localidades, Gravatá-PE e Osório-RS, sob a influência de dois regimes de ventos.

2. METODOLOGIA

A distribuição de velocidade de vento é modelada através da função de Weibull, que é uma função de dois parâmetros, cuja função de densidade cumulativa (CDF), Eq. 1, é descrita matematicamente como [5]:

$$F(V) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (1)$$

onde k e c são os parâmetros de forma e escala, respectivamente. O parâmetro de forma determina a forma da curva da distribuição de Weibull. Este revela a regularidade dos ventos, ou seja, quanto maior o valor de k , maior será a regularidade dos ventos em termos de velocidade e mais estreita será a curva de distribuição, já o parâmetro de escala c é o fator característico da distribuição [6].

A função de densidade acumulada indica a probabilidade de se encontrar um valor de velocidade entre 0 e v . Ao multiplicar esse valor pelo número de horas do período em que os dados foram coletados, tem-se a fração do tempo em que a velocidade permaneceu entre os dois valores.

A função densidade de probabilidade (PDF), Eq. 2, é obtida através da integração da função de densidade cumulativa:

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

onde $k > 0$, $V > 0$ e $c \geq 1$.

A velocidade média do vento, Eq. 3, da função de Weibull pode ser obtida através da função gama:

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

Dessa forma, podemos expressar $F(V)$ e $f(V)$, Eq. 4 e Eq. 5, respectivamente, como:

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\Gamma^k\left(1 + \frac{1}{k}\right) \left(\frac{V}{V_m}\right)^k\right] \quad (4)$$

$$f(V) = \left(\frac{k}{V}\right) \left(\frac{V}{V_m}\right)^k \cdot \Gamma^k\left(1 + \frac{1}{k}\right) \cdot \exp\left[-\Gamma^k\left(1 + \frac{1}{k}\right) \left(\frac{V}{V_m}\right)^k\right] \quad (5)$$

Os dados de vento utilizados nesse estudo foram obtidos a partir do banco de dados Meteonorm, da NASA [7]. São dados horários de vento, medidos a 50m de altura. A Tabela 1 mostra a localização geográfica das localidades selecionadas.

Tabela 1. Localização geográfica das cidades estudadas e sua elevação.

Localização	Latitude	Longitude	h (m)
1. Gravatá-PE	08°1' S	35°3' O	447
2. Osório-RS	29°5' S	50°2' O	16

Fonte: Autor, 2018.

2.1. Métodos para determinação dos parâmetros de Weibull

2.1.1. Método gráfico (MG)

O método gráfico é obtido através da função de densidade cumulativa. Se calcularmos o duas vezes o logaritmo da CDF, Eq 6, a mesma se tornará uma equação de primeiro grau, do tipo $y=ax+b$, onde $\ln[-\ln[1-F(v)]]$ está no eixo y e $\ln(v)$ no eixo x , k é a inclinação da reta [8]. A Eq. 6 mostra como obter os coeficientes a e b da reta.

$$\ln[-\ln[1-F(v)]] = k \ln v - k \ln c \quad (6)$$

$$\begin{aligned} k &= a \\ \text{onde: } c &= \exp(-b/a) \end{aligned}$$

2.1.2. Método empírico de Justus (MEJ)

O método empírico de Justus foi introduzido por Justus et al. em 1977. O mesmo apresenta uma solução direta baseada na velocidade média do vento $v_{méd}$ e o desvio padrão σ [8]. Ambos os parâmetros, k e c , são obtidos a partir da Eq. 7:

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1.086} e \quad \bar{v} = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (7)$$

2.1.3. Método empírico de Lysen (MEL)

O método empírico de Lysen foi introduzido por Lysen et al. em 1983. O cálculo do parâmetro de forma k é igual ao do método de Justus (MEJ) com a diferença no cálculo do parâmetro de escala c , Eq. 8 [8].

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1.086} e \quad c = \bar{v} \left(0.568 + \frac{0.433}{k} \right) - \frac{1}{k} \quad (8)$$

2.1.4. Método do momento (MM)

O método do momento foi introduzido por Justus e Mikhail, os mesmos que desenvolveram o método gráfico. Este método é baseado na velocidade média do vento $v_{méd}$ e o desvio padrão σ , entretanto, os parâmetros k e c são encontrados através da solução iterativa das Eq. 9.

$$\bar{v} = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) e \quad \sigma = c \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

2.2. Análise estatística dos diferentes métodos

Duas técnicas estatísticas foram utilizadas a fim de se determinar a precisão dos parâmetros de Weibull entre os dados experimentais/observados e calculados, são eles [7; 9]:

- a) Coeficiente de determinação (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

- b) Raiz do erro quadrático médio (RMSE)

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

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse estudo foram determinados os parâmetros k e c da função densidade de probabilidade de Weibull para as cidades de Gravatá-PE e Osório-RS, a partir de dados horários de velocidade de vento para o período de 2006 a 2015. A máxima velocidade de vento encontrada para Gravatá foi de 11,94 m/s, média de 6,05 m/s e um desvio padrão de 1,27 m/s. Para Osório, a máxima velocidade de vento foi de 17,16 m/s, uma média de 4,92 m/s e um desvio padrão de 2,07 m/s.

A tabela 2 apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação dos quatro métodos numéricos utilizados na determinação dos parâmetros k e c da distribuição de Weibull.

Tabela 2. Valores de k e c para Gravatá-PE.

Métodos	Parâmetros de Weibull	
	k	c (m/s)

MG	5,0105	6,2676
MEJ	5,4290	6,5584
MEL	5,4290	6,5540
MM	5,4575	6,5564

Fonte: Autor, 2018.

A Fig. 1 apresenta o resultado da aplicação do método gráfico para obtenção dos parâmetros k e c para Osório-RS. Os valores de a e b da reta são relacionados de acordo com a Eq. 6, como mostrado anteriormente,

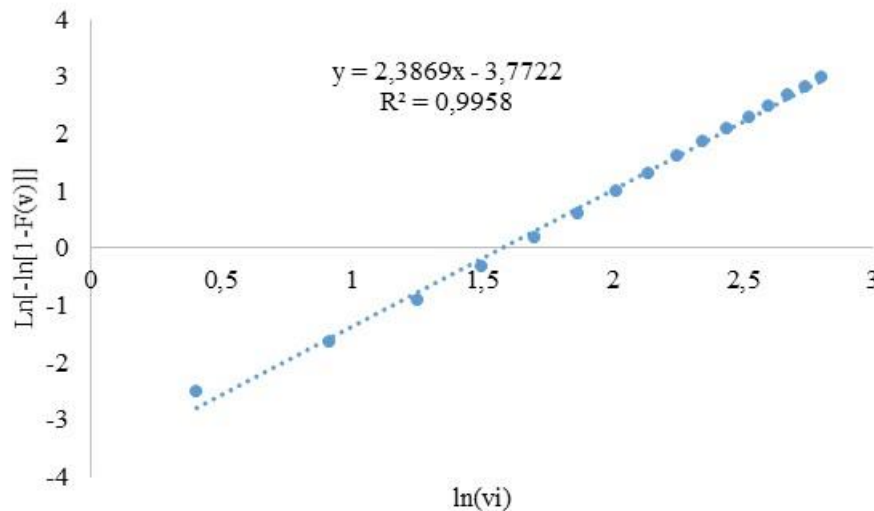


Figura 1. Aplicação do método gráfico para Osório-RS.

Fonte: Autor, 2018.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos a partir dos dados de velocidade de vento para o mesmo período considerado em Gravatá-PE, que foi de 2006 a 2015.

Tabela 3. Valores de k e c para Osório-RS.

Métodos	Parâmetros de Weibull	
	k	c (m/s)
MG	2,3869	4,8568
MEJ	2,5591	5,5364
MEL	2,5590	5,5372
MM	2,5506	5,5369

Fonte: Autor, 2018.

3.1. Análise estatística

As Tabs. 4 e 5 apresentam os parâmetros k e c para Gravatá-PE, com a avaliação de desempenho dos quatro métodos numéricos escolhidos. Ambos os parâmetros, de forma k e escala c , foram obtidos após o ajuste dos dados de vento à distribuição de Weibull.

Tabela 4. Valores de k e c e análise estatística para Gravatá-PE.

Métodos	Parâmetros		Análise estatística			
	k	c (m/s)	R^2	Rank	RSME	Rank
MG	5,01	6,27	0,94489	1	0,02587	1
MEJ	5,43	6,56	0,82108	3	0,04739	3
MEL	5,43	6,55	0,82320	2	0,04711	2
MM	5,46	6,56	0,81981	4	0,04756	4

Fonte: Autor, 2018.

Tabela 5. Valores de k e c e análise estatística para Osório-RS.

Métodos	Parâmetros		Análise estatística			
	k	c (m/s)	R^2	Rank	RSME	Rank
MG	2,39	4,86	0,96434	4	0,01322	4
MEJ	2,56	5,54	0,97739	2	0,01017	2
MEL	2,56	5,54	0,97731	3	0,01019	3
MM	2,55	5,54	0,97753	1	0,01014	1

Fonte: Autor, 2018.

A análise estatística demonstrou que para Gravatá-PE o método gráfico foi o que apresentou o melhor resultado para os parâmetros de Weibull, k e c . Por outro lado, para o caso de Osório-RS, o método gráfico foi o que demonstrou o pior resultado, sendo o método do momento aquele que forneceu o melhor resultado.

4. CONCLUSÃO

Os parâmetros k e c da função densidade de probabilidade de Weibull foram determinados através da aplicação de quatro diferentes métodos, a fim de caracterizar o regime de vento de duas cidades localizadas em duas regiões diferentes sob diferentes regimes de vento. Uma análise estatística determinou qual dos métodos utilizados apresentou os valores de k e c que melhor caracterizam a região. Para Gravatá-PE o método gráfico (MG) apresentou o melhor desempenho de acordo com os dois modelos estatísticos utilizados, já para o segundo caso, Osório-RS, o método do momento (MM) foi o que apresentou o melhor desempenho.

5. REFERÊNCIAS

- Arslan, T., Bulut, Y. M., Yavuz, A. A. Comparative study of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014; 40:820-825.
- Katinas, V.; Marčiukaitis, M.; Gecevičius, G.; Markevičius, A. *Statistical analysis of wind characteristics based on Weibull methods for estimation of power generation in Lithuania*. *Renewable Energy*, v. 113, p. 190-201, 2017.
- Kumaravel, R.; Varun, C.; Sarfudeen, M. *Mixed Weibull Distribution: A Case Study on Ichanda, India*. *Wind Engineering* 2014; 38:613–620.
- Lysen, E.H. 1983. *Introduction to Wind Energy*. 2ª ed. The Netherlands: Consultancy Services Wind Energy Developing Countries.
- Lima, F.J.L.; de Souza Guedes, R.V.; Da Silva, A.P.N.; Da Silva, E.M. *Avaliação do potencial eólico no município de Jaguaruana, litoral Cearense*. *Ciência e Natura - UFSM* 2011; 33(1):101–15.
- Mohammadi, K.; Alavi, O.; Mostafaeipour, A.; Goudarzi, N.; Jalilvand, M. *Assessing different parameters estimation methods of Weibull distribution to compute wind power density*. *Energy Convers Manage* 2016; 108:322–35.
- NASA. <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi>; Acesso em 20/10/2017.
- Pes, M.P.; Pereira, E.B.; Marengo, J.A.; Martins, F.R.; Heinemann, D.; Schmidt, M. *Climate trends on the extreme winds in Brazil*. *Renewable Energy* 2017; 109:110-120.
- Usta, I. *An innovative estimation method regarding Weibull parameters for wind energy applications*. *Energy* 2016; 106:301-314.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DETERMINATION OF WEIBULL PARAMETERS FOR WIND APPLICATIONS IN TWO DIFFERENT REGIONS

Wênio Fhará Alencar Borges, wenioborges@hotmail.com^{1,2}
 Alex Maurício Araújo, ama@ufpe.br¹
 Augusto Antônio Coutinho Silva, augustoacoutinho@gmail.com¹
 Kennethy Rodrigues de Melo, kennethy.rodrigues@gmail.com¹
 Eduardo Corte Real Fernandes, eduardocrfenandes@gmail.com¹
 Eduardo José Novaes de Menezes, eduardomnovaes@gmail.com¹
 Guilherme José Arruda Moura Rocha, guilhermejamr@gmail.com¹
 Lucas Iolanda de Andrade, lucas_iolanda@hotmail.com¹

Oyama Douglas Queiroz de Oliveira Filho, oyamadouglas@gmail.com¹

¹Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciência e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Recife-PE, Brasil.

²Instituto Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil.

Abstract. *In this paper, the objective is to determine the shape (k) and scale (c) parameters of the Weibull probability density function through four numerical methods, known as graphical method (MG), Justus empirical method (MEJ) (MEL), and method of the moment (MM) in two localities, Gravatá-PE and Osório-RS, under the influence of two wind regimes. For that, the hourly wind data obtained through NASA's Météonorm database will be used in the period from 2006 to 2015. Statistical analyzes will be used to determine the best method used to determine these parameters.*

Keywords: *Weibull distribution, parameters, wind.*