

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS APLICADAS NA ANÁLISE DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DO VENTO

Tamara Géssica Gadelha Medeiros (UFC) - tggmedeiros@gmail.com

Carla Freitas de Andrade (UFC) - cbens2020@gmail.com

Davi Ribeiro Lins (UFC) - davilins@alu.ufc.br

Resumo:

A velocidade e a direção do vento são características importantes para a avaliação do potencial eólico de uma região. Existem diversos modelos estatísticos capazes de descrever o comportamento dessas variáveis, destacando-se a distribuição de Weibull para a velocidade e a distribuição de von Mises para a direção. Seus parâmetros podem ser determinados através de métodos numéricos. Utilizando dados anemométricos de uma localidade no Nordeste, este artigo compara oito métodos aplicados para a velocidade: Método Gráfico, Método da Energia Equivalente, Método dos Momentos, Método Empírico, Método da Energia Padrão, Método da Máxima Verossimilhança, Método da Máxima Verossimilhança Modificado e Método da Energia Padrão Modificado. Além disso, o desempenho de von Mises e a influência da altura nos resultados são analisados. Como meios de avaliar os diferentes modelos, os testes estatísticos Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Erro Médio Absoluto (MAE) e Análise de Variância (R^2) são empregados. Os resultados indicam que o melhor método para Weibull, considerando as características estudadas, é o da Máxima Verossimilhança Modificado. A distribuição de von Mises mostra-se eficiente na análise da direção. Quanto à influência da altura, os modelos apresentaram melhores precisões para alturas mais elevadas. Esse critério também influencia no desempenho do modelo.

Palavras-chave: *Energia Eólica, Distribuição de Weibull, Distribuição de von Mises*

Área temática: *Outras fontes renováveis de energia*

Subárea temática: *Simulação, análise, equipamentos e sistemas de conversão eólica para eletricidade*

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS APLICADAS NA ANÁLISE DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DO VENTO

Tamara Gêssica Gadelha Medeiros – tggmedeiros@gmail.com

Carla Freitas de Andrade – carla@ufc.br

Davi Ribeiro Lins – davilins@alu.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. A velocidade e a direção do vento são características importantes para a avaliação do potencial eólico de uma região. Existem diversos modelos estatísticos capazes de descrever o comportamento dessas variáveis, destacando-se a distribuição de Weibull para a velocidade e a distribuição de von Mises para a direção. Seus parâmetros podem ser determinados através de métodos numéricos. Utilizando dados anemométricos de uma localidade no Nordeste, este artigo compara oito métodos aplicados para a velocidade: Método Gráfico, Método da Energia Equivalente, Método dos Momentos, Método Empírico, Método da Energia Padrão, Método da Máxima Verossimilhança, Método da Máxima Verossimilhança Modificado e Método da Energia Padrão Modificado. Além disso, o desempenho de von Mises e a influência da altura nos resultados são analisados. Como meios de avaliar os diferentes modelos, os testes estatísticos Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Erro Médio Absoluto (MAE) e Análise de Variância (R^2) são empregados. Os resultados indicam que o melhor método para Weibull, considerando as características estudadas, é o da Máxima Verossimilhança Modificado. A distribuição de von Mises mostra-se eficiente na análise da direção. Quanto à influência da altura, os modelos apresentaram melhores precisões para alturas mais elevadas. Esse critério também influencia no desempenho do modelo.

Palavras-chave: Energia Eólica, Distribuição de Weibull, Distribuição de von Mises

1. INTRODUÇÃO

O uso de fontes de energias renováveis está em constante crescimento e, dentre seus diversos ramos, a energia eólica se destaca devido ao seu grande potencial e tecnologia bem consolidada. Contudo, para a exploração deste recurso ser possível em um local, é necessário antes realizar a avaliação do potencial eólico, sendo necessárias longas observações meteorológicas da região. Dentre as principais características observadas, destacam-se a velocidade e a direção do vento, que são variáveis aleatórias sobre as quais dependem os resultados mais precisos sobre o potencial eólico. O Nordeste brasileiro em especial apresenta um grande potencial deste recurso.

A variação dessas características sob um determinado período de tempo pode ser representada por funções de distribuição. Na literatura, são encontrados diversos modelos para a estimação dos parâmetros dessas funções a partir de dados meteorológicos históricos. Desse modo, a distribuição de Weibull é bastante aceita e recomendada para descrever o regime de velocidade dos ventos de um local.

Métodos para a estimação dos parâmetros de Weibull são discutidos por diversos autores, destacando-se o Método Gráfico, Método da Energia Equivalente, Método dos Momentos, Método Empírico, Método da Energia Padrão, Método da Máxima Verossimilhança, Método da Máxima Verossimilhança Modificado e Método da Energia Padrão Modificado.

Além da velocidade do vento, determinar sua direção também é importante, uma vez que influencia na escolha da zona de instalação das usinas eólicas e ainda na instalação das linhas de transmissão (Gugliani et al., 2018). A análise da direção do vento requer a aplicação de funções de distribuição circulares, de modo que, segundo a literatura, a distribuição de dois parâmetros de von Mises é adequada para o estudo da direção do vento.

Dessa forma, este artigo busca estimar e avaliar os métodos citados para a estimação de parâmetros das distribuições de Weibull e de von Mises para a velocidade e para a direção do vento, respectivamente, de uma região localizada no Nordeste do Brasil. Deseja-se observar ainda a influência da altura das medições no desempenho dos métodos.

2. CARACTERÍSTICAS DOS DADOS DE VENTO

A rede Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) fornece dados anemométricos coletados no período entre 2004 e 2011. SONDA é um projeto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais para a implementação

de infra-estrutura física e de recursos humanos destinada a levantar e melhorar a base de dados dos recursos de energia solar e eólica no Brasil.

A rede disponibiliza dados anemométricos de sete localidades no país, das quais quatro estão localizadas no Nordeste. Os dados analisados neste artigo são da estação de São João do Cariri-PB (SJC), localizado na latitude 7°22'54.1"S e longitude 36°31'37.9"O, com uma altitude de 718 m. A Fig. 1 mostra um mapa do Brasil, com a localização da estação sinalizada.



Figura 1 – Mapa do Brasil com localização da estação São João do Cariri.

Os dados foram coletados durante o período de um ano e medidos nas alturas de 25 e 50 metros. Tanto as informações de velocidade quanto as de direção consistem no valor médio medido dentro de um intervalo de dez minutos, sendo este o período de espaçamento entre os dados adquiridos. Para cada análise, foram consideradas, portanto, em torno de 52.000 amostras.

3. MODELOS MATEMÁTICOS

Serão descritas a seguir as formulações matemáticas aplicadas neste artigo para a obtenção de projeções do comportamento dos ventos. Primeiramente, serão abordados os modelos aplicados para a velocidade dos ventos, que consistem na estimação dos parâmetros da distribuição de Weibull através dos métodos numéricos determinísticos, sendo estes: Método Gráfico, Método da Energia Equivalente, Método dos Momentos, Método Empírico, Método da Energia Padrão, Método da Máxima Verossimilhança, Método da Máxima Verossimilhança Modificado e Método da Energia Padrão Modificado. Em seguida, será apresentada a formulação utilizada para a direção dos ventos, na qual é aplicada a distribuição de von Mises cujos parâmetros serão estimados através do Método da Máxima Verossimilhança.

3.1 Distribuição de Weibull e métodos para estimação de seus parâmetros

A distribuição de Weibull é muito utilizada atualmente para descrever distribuições de frequências unimodais, apresentando estimativas satisfatórias para curvas de distribuição de velocidade do vento (Hennessey, 1997). Ela é representada pela função de densidade de probabilidade $f(v)$, Eq. 1, e pela sua função de distribuição acumulada $F(v)$, Eq. 2.

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

$$F(v) = 1 - e^{\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]} \quad (2)$$

As Eq. 1 e Eq. 2 são definidas para $v \geq 0$, $c > 0$ e $k > 0$. v refere-se à velocidade, enquanto k é o parâmetro de forma adimensional da distribuição, controlando sua largura, e c é o parâmetro de escala dado em (m/s), representando seu valor característico (Ghosh, 1999).

3.2 Método Gráfico (MG)

O Método Gráfico, também conhecido com Método dos Mínimos Quadrados, trata-se da estimação dos parâmetros de Weibull graficamente. Ele consiste na linearização Eq. 2, através de dupla transformação logarítmica, resultando assim na Eq. 3. Uma aproximação linear do gráfico do termo $\ln \left[\frac{1}{1-F(v)} \right]$ em função de $\ln v$ é realizada através do método dos mínimos quadrados de Gauss. Desse modo, o coeficiente angular da reta de tendência gerada equivale ao parâmetro k .

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(v)} \right) \right] = k \ln v - k \ln c \quad (3)$$

O parâmetro c pode ser calculado igualando o termo $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(v)} \right) \right]$ a zero.

3.3 Método da Energia Equivalente (MEE)

O desenvolvimento deste método considerou o comportamento dos ventos no Nordeste do Brasil, o qual foi caracterizado pela ocorrência de velocidades próximas do valor médio e pela simetria da distribuição. Desse modo, foi assumido que a frequência relativa de ocorrência de um determinado intervalo de velocidade relaciona-se com os parâmetros k e c de Weibull através da probabilidade de ocorrências do intervalo (Silva, 2003). Nesse sentido, chegou-se à Eq. 4, que permite a estimação do parâmetro k a partir da equivalência entre a densidade de energia da curva teórica e a densidade de energia das observações.

$$\sum_{i=1}^n \left[W_{vi} - e^{-\frac{[(vi-1)(\Gamma+3\Gamma/k)]^{1/3}}{(v_m^3)^{1/3}}}]^k + e^{-\frac{[(vi)(\Gamma+3\Gamma/k)]^{1/3}}{(v_m^3)^{1/3}}}]^k \right] = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{vi})^2 \quad (4)$$

Na Eq. 4, W_{vi} é a frequência de ocorrência da velocidade do vento, n é o número de intervalos de velocidade, vi é o limite superior do i -ésimo intervalo, v_m^3 é a velocidade cúbica média das observações e ε_{vi} é o erro de aproximação do i -ésimo intervalo.

O parâmetro c pode então ser estimado diretamente através da Eq. 5.

$$c = \left[\frac{v_m^3}{\Gamma(1+3/k)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

3.4 Método dos Momentos (MM)

Este método foi proposto por Justus *et al.* (1978) e consiste na comparação dos momentos teóricos de uma distribuição e dos momentos empíricos, estes baseados apenas nos dados de velocidade. Sua modelização baseia-se na iteração da velocidade média do vento, μ ou v_m , e no seu desvio padrão, σ ou dp , caracterizando os momentos de primeira e segunda ordem respectivamente. Desse modo, os momentos teóricos para Weibull são expressos pela Eq. 6 e pela Eq. 7.

$$\mu = c\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (6)$$

$$\sigma = c \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right]^{1/2} \quad (7)$$

Seus equivalentes empíricos são determinados através da Eq. 8 e da Eq. 9, nas quais N é o número de observações da velocidade do vento.

$$v_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n vi \quad (8)$$

$$dp = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (vi - v_m)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

O parâmetro k pode, portanto, ser estimado através da σ/μ . Em seguida, é possível determinar o parâmetro c através da Eq. 10.

$$c = \frac{v_m}{\Gamma(1+1/k)} \quad (10)$$

3.5 Método Empírico (ME)

O Método Empírico trata-se de um caso especial do Método dos Momentos no qual o parâmetro k pode ser determinado através da aplicação direta da Eq. 11. O parâmetro c pode ser determinado, por sua vez, através da Eq. 11.

$$k = \left(\frac{dp}{v_m}\right)^{-1.086} \quad (11)$$

3.6 Método da Energia Padrão (MEP)

O Método da Energia Padrão (Akdag e Dinler, 2009) foi baseado no conceito de densidade de potência, este que depende diretamente do terceiro momento da distribuição de Weibull, $\int_0^{\infty} v^3 f(v) f v$, e, portanto, da média do cubo da velocidade do vento, $\overline{v^3}$. Dessa forma, a Eq. 12 é obtida através da formulação de densidade de potência relacionada com a Eq. 10.

$$E_{pf} = \frac{\overline{v^3}}{(v_m)^3} = \frac{\Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right)}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)^3} \quad (12)$$

Na Eq. 12, E_{pf} é definido como fator de energia padrão. O parâmetro k pode ser estimado a partir da Eq. 12 numericamente, contudo é possível determiná-lo também através da Eq. 13, que se trata de uma aproximação gerada a partir da Eq. 12 e dados da literatura. O parâmetro de escala pode então ser determinado através da Eq. 10.

$$k = 1 + \frac{3.69}{E_{pf}^2} \quad (13)$$

3.7 Método da Energia Padrão Modificado (MEPM)

Este método foi desenvolvido por Gugliani *et al.* (2018) com o objetivo de evitar imprecisões resultantes da aplicação da Eq. 12 na estimação do parâmetro k . Isso é alcançado através de equações mais simples que descrevem curvas de tendência do gráfico de k em função de E_{pf} . O parâmetro de forma de Weibull pode, portanto, ser estimado através da Eq. 14.

$$k = \frac{a_4 E_{pf}^4 + a_3 E_{pf}^3 + a_2 E_{pf}^2 + a_1 E_{pf} + a_0}{b_4 E_{pf}^4 + b_3 E_{pf}^3 + b_2 E_{pf}^2 + b_1 E_{pf} + b_0} \quad (14)$$

Na Eq. 14, os coeficientes a_n e b_n podem ser determinados através do método não linear de mínimos quadrados com o algoritmo Lavenberg-Marquardt. Finalmente, a Eq. 10 pode ser aplicada para estimar o parâmetro c .

3.8 Método da Máxima Verossimilhança (MMV)

Este método busca estimar os parâmetros a fim de maximizar função de probabilidade dos dados analisados, ou seja, aplicado na distribuição de Weibull, os valores de k e c são estimados de modo que os dados observados sejam mais prováveis. A formulação do MMV para a distribuição de Weibull é expressa pelas Eq. 15 e Eq. 16, nas quais v_i representa a velocidade do vento medida em cada intervalo de tempo i e n , o número de observações.

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad (15)$$

$$c = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^k \right)^{\frac{1}{k}} \quad (16)$$

É necessária a aplicação de iterações numéricas para a resolução da Eq. 15, o que aumenta a dificuldade do método. Uma vez que o parâmetro de forma tenha sido determinado, c pode ser calculado pela Eq. 16.

3.9 Método da Máxima Verossimilhança Modificado (MMVM)

Este método pode ser aplicado quando os dados estão disponíveis na forma de distribuição de frequência. Desse modo, os parâmetros de Weibull podem ser estimados através das Eq. 17 e Eq. 18. Contudo, assim como o Método da Máxima Verossimilhança, essas equações necessitam serem solucionadas através de iterações numéricas.

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i) f(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k f(v_i)} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i) f(v_i)}{f(v \geq 0)} \right]^{-1} \quad (17)$$

$$c = \left(\frac{1}{f(v \geq 0)} \sum_{i=1}^n v_i^k f(v_i) \right)^{\frac{1}{k}} \quad (18)$$

Nas Eq. 17 e Eq. 18, $f(v_i)$ é a frequência relativa da velocidade do vento no intervalo i , v_i é a velocidade do vento no mesmo intervalo e $f(v \geq 0)$ é a probabilidade da velocidade do vento ser maior ou igual a zero.

3.10 Distribuição de von Mises

A distribuição de von Mises é circular e contínua, sendo conhecida como a distribuição análoga à Normal para dados circulares. Considerando uma variável aleatória θ , ela é caracterizada por dois parâmetros, sendo μ o parâmetro de localização ou direção média no círculo e κ , medida de concentração ao redor de μ . Sua função de densidade de probabilidade é expressa pela Eq. 19 como uma série das funções de Bessel, $I_0(\kappa_j)$.

$$vM(\theta; \mu_j, \kappa_j) = \frac{1}{2\pi I_0(\kappa_j)} \exp [\kappa_j \cos(\theta - \mu_j)] \quad (19)$$

A Eq. 19 está definida para $0 \leq \theta \leq 2\pi$ e para $\kappa \geq 0$. A função Bessel $I_0(\kappa_j)$ de primeiro tipo de ordem zero pode ser expressada pela Eq. 20.

$$I_0(\kappa_j) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(\kappa_j \cos \theta) d\theta = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{(\kappa_j)^2} \left(\frac{\kappa_j}{2}\right)^{2k} \quad (20)$$

Neste artigo, o método da Máxima Verossimilhança é aplicado para a estimação dos parâmetros da distribuição de von Mises.

4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Com o objetivo de avaliar o desempenho dos métodos estatísticos aplicados para os dados de direção e velocidade do vento, foram aplicados os testes estatísticos Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Erro Médio Absoluto (MAE) e Análise de Variância (R^2). Esses testes são descritos a seguir.

4.1 Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)

O RMSE é calculado a partir da Eq. 21. Ao aplicá-lo, supõe que os erros são imparciais e seguem uma distribuição normal, possibilitando, portanto, uma imagem completa da distribuição de erros (Chai e Draxler, 2014).

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Na Eq. 21, n é o número de observações, y_i é a frequência relativa das observações e x_i é a frequência obtida do método utilizado.

O teste trata-se de uma análise de previsão, de modo que, quanto maior o valor do RMSE, maior é a capacidade do método de realizar projeções futuras (Sousa, 2011).

4.2 Erro Médio Absoluto (MAE)

O MAE mede magnitude média dos erros entre os dados observados e os previstos. Neste teste, todos os erros possuem o mesmo peso, como pode ser observado na Eq. 22.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (22)$$

Considerando que não são aplicados pesos aos erros no cálculo do MAE, este teste pode ser mais imparcial que o RMSE, uma vez que, neste último, erros maiores influenciam mais o resultado final. Desse modo, o MAE será menor ou igual ao RMSE.

4.3 Análise de Variância (R^2)

A análise de variância, também conhecido como coeficiente de determinação, R^2 , fornece uma medição do quão bem os resultados observados são replicados pelo modelo baseado na frequência relativa de observações, y_i , na frequência do método, x_i e na velocidade média do vento, z_i .

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - z_i)^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - z_i)^2} \quad (23)$$

O valor de R^2 deve encontrar-se entre 0 e 1, de modo que, quanto mais próximo de 1, mais adequado é o método.

Contudo, para a aplicação deste teste, os dados devem ser de origem qualitativa ou quantitativa, os grupos devem ser independentes, a variável aleatória deve ser contínua e o teste deve ser paramétrico (Sousa, 2011).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os parâmetros da distribuição de Weibull, para projeção da velocidade do vento, e da distribuição de von Mises, para a projeção da direção do vento, foram estimados através dos métodos descritos na seção 3. A fim de determinar qual método é o mais adequado, considerando as características dos ventos estudados, foram aplicados os testes de análise descritos na seção 4. Os resultados obtidos são apresentados nesta seção.

5.1 Estimação dos parâmetros de Weibull

Foram aplicados oito métodos numéricos determinísticos para a estimação dos parâmetros de Weibull com o objetivo de obter projeções da velocidade do vento com o uso de dados da estação de São João do Cariri. Essas projeções são ilustradas na Fig. 2, que apresenta os histogramas dos dados observados da velocidade do vento. Foram acrescentadas ainda as curvas da função de densidade de probabilidade de Weibull na qual os parâmetros estimados foram aplicados.

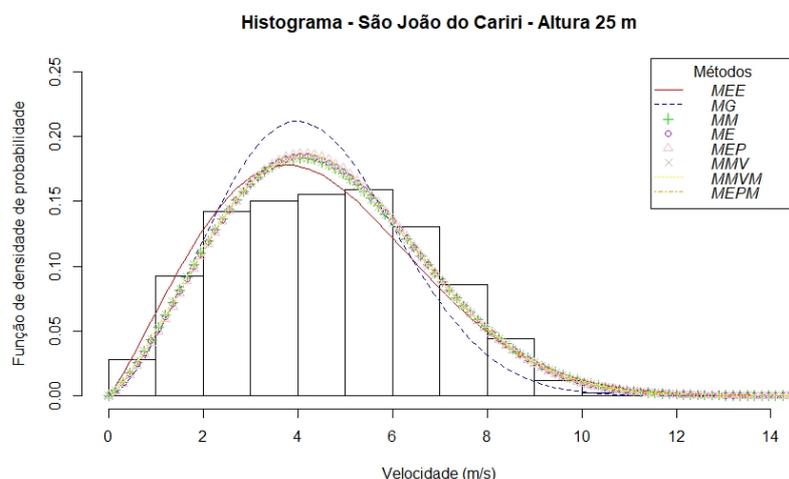


Figura 2(a) – Histograma da velocidade do vento para 25 m de altura com as curvas da função de probabilidade de Weibull cujos parâmetros foram estimados por oito métodos.

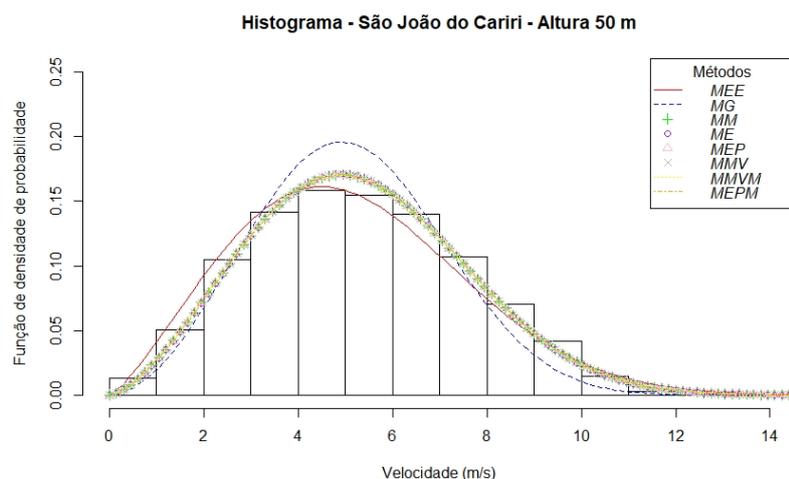


Figura 2(b) – Histograma da velocidade do vento para 50 m de altura com as curvas da função de probabilidade de Weibull cujos parâmetros foram estimados por oito métodos.

A partir da Fig. 2 é possível observar que a maioria dos métodos apresenta resultados semelhantes, as exceções sendo o Método Gráfico e o Método da Energia Equivalente. O primeiro apresenta uma discrepância maior em relação ao histograma, de modo que se pode assumir que possui o maior erro.

Sobre a diferença de altura das estações, percebe-se que os métodos proveram melhores projeções para a estação a 50 metros. Para a estação mais baixa, os métodos não foram capazes de acompanhar o pico do histograma, que é mesmo acentuado.

A Tab.1 e a Tab. 2 apresentam os valores dos parâmetros estimados e dos testes associados para a estação de 25 metros de altura e de 50 metros respectivamente. Permitem uma melhor avaliação do desempenho dos métodos que apresentaram comportamento semelhante no gráfico.

Tabela 1 – Parâmetros estimados da distribuição de Weibull os testes análise associados para altura de 25 m.

MÉTODOS	PARÂMETROS		TESTES		
	k	c	RMSE	MAE	R ²
MEE	2,145699	5,05578	0,014553	0,011531	0,9479501
MG	2,553345	4,848904	0,026144	0,018712	0,8852654
MM	2,322083	5,198824	0,013181	0,00999	0,9603102
ME	2,339819	5,19828	0,013489	0,010136	0,9590037
MEP	2,371117	5,19721	0,01409	0,010398	0,9563177
MMV	2,315291	5,188769	0,01324	0,009976	0,9599284
MMVM	2,298182	5,187442	0,01301	0,009877	0,9608221
MEPM	2,371117	5,19721	0,01409	0,010398	0,9563177

Tabela 2 – Parâmetros estimados da distribuição de Weibull os testes análise associados para altura de 50 m.

MÉTODOS	PARÂMETROS		TESTES		
	k	c	RMSE	MAE	R ²
MEE	2,268036	5,814439	0,009044	0,00736	0,9759157
MG	2,844903	5,735729	0,01645	0,012279	0,9463773
MM	2,531891	5,983706	0,005199	0,003917	0,9929647
ME	2,545046	5,98288	0,005462	0,004105	0,9923069
MEP	2,531306	5,983743	0,005188	0,003912	0,9929922
MMV	2,540696	5,981009	0,0054	0,004052	0,992463
MMVM	2,513472	5,974015	0,005015	0,003847	0,9933983
MEPM	2,531306	5,983743	0,005188	0,003912	0,9929922

Através das Tab. 1 e Tab. 2 pode-se observar que a maior parte dos métodos resulta em valores semelhantes para os parâmetros, explicando a superposição das curvas na Fig. 2. Desse modo, o desempenho relativo dos métodos pode ser avaliado apenas através dos testes de análise.

Segundo o critério dos três testes, o Método da Máxima Verossimilhança Modificado mostra-se como o mais adequado à estimação dos parâmetros de Weibull.

Vale observar que o Método da Verossimilhança apresentou um bom desempenho para 25 metros de altura, sendo o segundo melhor critério de acordo com o MAE e terceiro melhor considerando RMSE e R². Contudo, para 50 m, ele mostrou-se apenas como o quinto melhor segundo os três testes. O contrário ocorre com o Método da Energia Padrão, que apresenta um bom desempenho para a altura de 50 metros, contudo para 25 m ele é apenas o quinto melhor.

Nota-se ainda que o Método da Energia Equivalente não apresentou um desempenho, contrário ao que esperava-se, tendo em vista que o método foi desenvolvido considerando as características dos ventos na região Nordeste.

Quanto aos testes utilizados, em quase todos os casos não divergência entre os resultados, de modo que a ordem de desempenho para os métodos manteve-se a mesma segundo cada ferramenta de análise.

5.2 Estimação dos parâmetros de von Mises

Com o objetivo de obter projeções para a direção do vento, foi aplicado o Método da Máxima Verossimilhança para estimar os parâmetros da distribuição circular de von Mises. A Fig. 3 mostra os histogramas das direções (em radianos) para os dados nas alturas de 25 e 50 metros com as curvas da distribuição de von Mises. Pode-se observar que as direções em ambos os casos concentram-se entre 2,5 e 3 radianos.

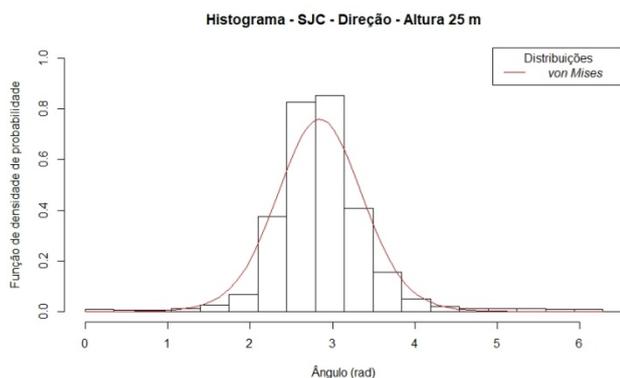


Figura 3(a) - Histograma da direção do vento para 25 m de altura com a curva da distribuição de von Mises

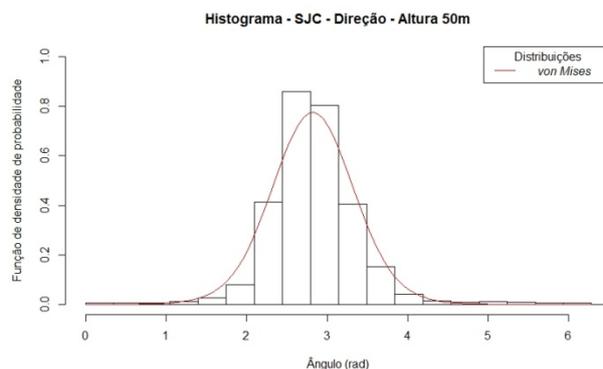


Figura 3(b) - Histograma da direção do vento para 50 m de altura com a curva da distribuição de von Mises

Na Fig. 3 é possível a distribuição de von Mises é capaz de acompanhar a tendência do histograma de direções, ainda que não possua grande precisão nos picos.

Tabela 3 – Parâmetros estimados da distribuição de von Mises e testes análise associados.

DISTRIBUIÇÃO DE VON MISES					
ALTURA	PARÂMETROS		TESTES		
	μ	κ	RMSE	MAE	R ²
25 m	2,845687	3,920216	0,05236	0,031532	0,950056
50 m	2,821293	4,06821	0,04536	0,025827	0,963595

A partir dos resultados, observa-se que a distribuição obteve um melhor desempenho para a altura de 50 m, com um μ em torno de 2,8 e κ em torno de 4.

6. CONCLUSÃO

Neste artigo são comparados oito métodos para estimar os parâmetros da distribuição de Weibull para a região de São João do Cariri, na Paraíba. Dentre estes, o método gráfico mostrou-se o mais impreciso, apresentando erros consideráveis em relação aos dados observados, com uma diferença de 13,2% e 11,1% para o parâmetro k e 4,0% e 6,5% para o parâmetro c em relação ao melhor resultado, para 25 e 50 metros respectivamente. O melhor desempenho, por sua vez, foi do Método da Máxima Verossimilhança Modificado.

Quanto à direção do vento, a distribuição de von Mises apresentou-se como um modelo aceitável para a análise de direção. Ainda assim, erros relativamente consideráveis entre a distribuição e os valores observados desse modo encorajam o estudo de distribuições mais flexíveis, como, por exemplo, a de Kato-Jones, que possui quatro parâmetros (Kato e Jones, 2015).

No geral, alturas mais elevadas apresentaram melhores resultados segundo os três testes. Além disso, a altura mostrou-se um fator significativo na determinação do método a ser utilizado para análise de velocidade. Para alturas mais baixas, o Método da Máxima Verossimilhança apresentou maior eficiência, com valores melhores para os três testes estatísticos, enquanto para alturas mais elevadas, o desempenho do Método da Energia Padrão destacou-se positivamente, avaliação baseada também nos testes. A altura influencia também na análise de direção, de modo que a distribuição de von Mises é mais precisa para alturas mais elevadas, apresentando diferenças nos testes da ordem de 0,01.

Agradecimentos

Os autores são gratos aos colegas e professores que auxiliaram e guiaram na realização desta pesquisa, assim como à equipe do projeto SONDA por manter acessível as informações meteorológicas utilizadas neste artigo.

REFERÊNCIAS

- Akdag, S.A., Dinler, A., 2009. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications, *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, pp. 1761-1766.
- Chai, T., Draxler, R. R., 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature, *Geosci. Model Dev.*, vol. 7, pp. 1247–1250.
- Ghosh, A., 1999. A FORTRAN program for fitting Weibull distribution and generating samples, *Computers and Geosciences*, vol. 25, pp. 729-738.
- Gugliani, G. K., Sarkar, A., Ley, C., Mandal, S., 2018. New methods to assess wind resources in terms of wind speed, load, power and direction, *Renawble Energy*, vol. 129, pp. 168-182.
- Hennessey, J. P., 1977. Some aspects of wind power statistics, *Journal of applied meteorology*, vol. 16, n. 2.
- Justus, C.G., Hargraves, W.R., Mikhail, A., Graber, D., 1978. Methods for estimating wind speed frequency distribution, *J. Appl. Meteorol*, vol. 17, pp. 350-353.
- Kato, S., Jones, M. C., 2015. A tractable and interpretable four-parameter family of unimodal distributions on the circle, *Biometrika*, vol. 102, pp. 181-190.
- Ozawa, m. T., 2017. Aplicação de parâmetros da distribuição de Weibull na análise do potencial energético de um microgerador eólico em cidades do estado do Paraná, Trabalho de conclusão de curso, UTFPR, Ponta Grossa.
- Silva, G. R., 2003. Características de vento da região nordeste: análise, modelagem e aplicações para projetos de centrais eólicas, Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife.
- Sousa, R. C., 2011. Análise e comparação de sete métodos numéricos utilizados na determinação dos parâmetros da curva de Weibull aplicados aos dados de velocidade do vento coletados na cidade de Paracuru e Camocim-CE, Dissertação de Mestrado, UFC, Fortaleza.

EVALUATION OF METHODS OF ESTIMATION OF STATISTICAL DISTRIBUTION PARAMETERS APPLIED IN SPEED AND WIND DIRECTION ANALYSIS

Abstract. *Wind speed and direction are important criteria for assessing the wind potential of a region. There are several statistical models capable of describing the behavior of these variables, highlighting the Weibull distribution for wind speed and the von Mises distribution for wind direction. Its parameters can be determined by numerical methods. Using anemometric data from a Northeast location in Brazil, this article compares eight methods applied for wind speed: Graphical Method, Equivalent Energy Method, Method of Moments, Empirical Method, Energy Pattern Factor Method, Maximum Likelihood Method, Modified Maximum Likelihood Method and Modified Energy Pattern Factor Method. In addition, von Mises performance and the influence of height on the results are analyzed. As means of evaluating the different models, the statistical tests Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE) and Analysis of Variance (R^2) are employed. The results indicate that the best method for Weibull, considering the characteristics studied, is the Modified Maximum Likelihood Method. The von Mises distribution is efficient in the direction analysis. Regarding the influence of height, the models presented better precision for higher heights. This criterion also influences the models' performances.*

Key words: *Wind Energy, Weibull Distribution, von Mises distribution*