

AJUSTE DA CURVA DE WEIBULL UTILIZANDO MÉTODOS NUMÉRICOS E MÉTODO HEURÍSTICO E CÁLCULO DO POTENCIAL EM ENERGIA EÓLICA

Ana Karolyna Silva Leal, anaksleal@gmail.com¹
Hélio de Paula Barbosa, helio.p.b@hotmail.com¹
Raphael Lima de Paiva, raphaellimap@ufpi.edu.br¹

¹Universidade Federal do Piauí – UFPI, Laboratório de Energias Renováveis – LER, Curso de Engenharia Mecânica, Campus Universitário Ministro Petrônio Portella – Bairro Ininga – CEP: 64049-550 – Teresina-PI, Brasil

Resumo: Para a obtenção de resultados confiáveis para os projetos de geração de energia eólica é necessária uma boa análise e tratamento do recurso eólico, visando à minimização dos erros e a estabilidade dos resultados. Neste trabalho foi realizado o ajuste da curva de Weibull utilizando métodos numéricos e método heurístico para a obtenção de valores estáveis utilizados posteriormente para o cálculo do potencial eólico em Petrolina (PE) e São Martinho da Serra (RS). Foi utilizado o algoritmo de otimização da Busca Harmônica (HS) para a estimativa dos parâmetros, por meio da metodologia Busca Harmônica com Parâmetros Aleatórios (HS-PA), e também foram utilizados dois métodos numéricos, Método Empírico (ME) e Método da Densidade de Potência (MDP). Os parâmetros da distribuição de Weibull foram calculados com dados de ventos fornecidos pelo Sistema de Organização de Dados Ambientais (SONDA). Os resultados das três metodologias foram comparados, utilizando como critérios o Erro Quadrático Médio (RMSE) e o Coeficiente de Correlação (r). O método HS-PA apresentou os resultados mais estáveis, tendo para Petrolina $RMSE = 0,0946405379$ e $r = 0,974776$ e $RMSE = 0,1062522934$ e $r = 0,988998$ para São Martinho da Serra. Os melhores resultados obtidos foram aplicados ao cálculo do potencial eólico por meio da utilização do software EoluSoft, da PUCRS, onde, juntamente com outras características ambientais, foi possível estimar a potencialidade da energia eólica nas duas localidades apresentadas. Para Petrolina, o valor da energia anual gerada encontrado foi 460,71570 MWh e para São Martinho da Serra, o valor foi 86,7586 MWh.

Palavras-chave: Distribuição de Weibull, Busca Harmônica, potencial eólico.

1. INTRODUÇÃO

Para a geração de energia eólica, é importante estudar como se comporta o vento da região a ser explorada para avaliar se o potencial eólico da mesma é viável para a construção de um parque eólico. O cálculo da potência depende dos dados de velocidades do vento, “já que a potência fornecida por aerogeradores é proporcional ao cubo da velocidade do vento no local” (BARBOSA, 2015).

Para a análise desses dados, algumas ferramentas são necessárias. Segundo Lage (2011), a função de Weibull é uma distribuição de probabilidade contínua que leva em consideração o desvio padrão dos dados coletados, sendo este um parâmetro estatístico, do qual traz a informação das incertezas em que ocorrem as velocidades previstas a partir de dados coletados ao longo de um ano.

A distribuição de Weibull é amplamente utilizada nas estimativas de potenciais eólicos devido à precisão na representação das características do vento. Para isso devem ser estimados dois valores: k (fator de forma, adimensional), que define a forma da distribuição e está relacionado com o desvio padrão, e C (fator de escala, em m/s), que define a escala da distribuição e está relacionado com a velocidade média.

Ambos os fatores podem ser determinados por métodos numéricos, como o Método Empírico (ME) e o Método da Densidade de Potência (MDP), e a escolha do melhor método vai depender das características do vento da região. Segundo Barbosa (2015), métodos heurísticos “são largamente utilizados em otimização em problemas de engenharia”, e Nascimento et al. (2015) diz que um método heurístico de otimização que tem se destacado durante os últimos anos é o Algoritmo de Busca Harmônica (HS), que possui a característica de identificar regiões de alto desempenho dentro do espaço de busca em um tempo razoável e foi primeiramente apresentado por Geem, Kim e Loganathan (2001).

A Densidade de Potência Eólica é dependente dos valores determinados por esses métodos, já que varia em função da velocidade do vento e do fator de forma de Weibull, além de ser necessário o conhecimento da densidade do ar.

O Projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) tem como objetivo “implementar uma infraestrutura física e de recursos humanos destinada à montagem e melhoramento da base de dados de superfície necessária ao levantamento dos recursos de energia solar e eólica no Brasil e consequente planejamento de seu uso” (INPE, 2015), e fornece dados ambientais e anemométricos de 20 localidades espalhadas por todo o Brasil. As cidades escolhidas para o desenvolvimento do trabalho foram: Petrolina (Pernambuco) e São Martinho da Serra (Rio Grande do Sul).

Este trabalho mostra a relevância do estudo do potencial eólico no Brasil, colocando o país em destaque mundial na utilização de fontes energéticas limpas para a geração de energia elétrica, utilizando as melhores metodologias disponíveis e buscando a redução das incertezas. Além de fornecer informações que ajudarão trabalhos futuros.

2. METODOLOGIA

Para o ajuste da curva de Weibull foram utilizados dois métodos numéricos (MDP e ME) e o método heurístico de Busca Harmônica (HS-PA), que são apresentados a seguir.

2.1. Método da Densidade de Potência

Este método está relacionado com a média dos dados da velocidade do vento e, segundo Akdag (2009), pode ser definido como:

$$E_{pf} = \frac{\bar{v}^3}{(\bar{v})^3} \quad (1)$$

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

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

Onde E_{pf} é o fator padrão de energia, $\bar{v}^3$ é a velocidade cúbica média e $(\bar{v})^3$ é a velocidade média ao cubo. A função gama (Γ) pode ser definida como:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt \quad (4)$$

2.2. Método Empírico

O Método Empírico é considerado um caso especial do Método do Momento (CHANG, 2011). O Método do Momento, que foi sugerido por Justus et al. (1978), “pode ser utilizado quando a média e o desvio padrão dos dados de velocidade do vento estão em escala disponível”. No Método Empírico, k e C podem ser encontrados por meio de:

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

$$C = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (6)$$

2.3. HS-PA: Busca Harmônica com Parâmetros Aleatórios

A Busca Harmônica tem como objetivo otimizar os parâmetros de Weibull, c e k , a fim de obter o melhor ajuste para a distribuição, seguindo os passos conforme Barbosa (2015) representou na Fig. 1 de um algoritmo.

Na seleção dos parâmetros da Busca Harmônica (HMCR - Taxa de Consideração da Memória Harmônica, PAR - Taxa de Ajuste dos Valores e BW - Largura de Banda), foi utilizada a metodologia da Busca Harmônica com Parâmetros Aleatórios (HS-PA).

A metodologia HS-PA não requer que o usuário do algoritmo encontre um conjunto de valores para os parâmetros que vá fornecer um melhor desempenho do algoritmo, pois os valores de HMCR, PAR_{max} , PAR_{min} , BW_{max} e BW_{min}

variam aleatoriamente ao longo das gerações. Essa metodologia é derivada de duas outras, que são as apresentadas por Mahdavi, Fesanghary e Damangir (2007) e Askarzadeh e Zebajadi (2014).

HMCr, PAR_{max}, PAR_{min}, BW_{max} e BW_{min} são determinados por meio de:

$$HMCr = 0,9 + 0,1\text{rand}(0,1) \quad (7)$$

$$PAR_{\max} = 1 - \left(\frac{\text{rand}(0,1)}{2} \right) \quad (8)$$

$$PAR_{\min} = \left(\frac{\text{rand}(0,1)}{2} \right) \quad (9)$$

$$BW_{\max} = 1 - \left(\frac{\text{rand}(0,1)}{2} \right) \quad (10)$$

$$BW_{\min} = \left(\frac{\text{rand}(0,1)}{2} \right) \quad (11)$$

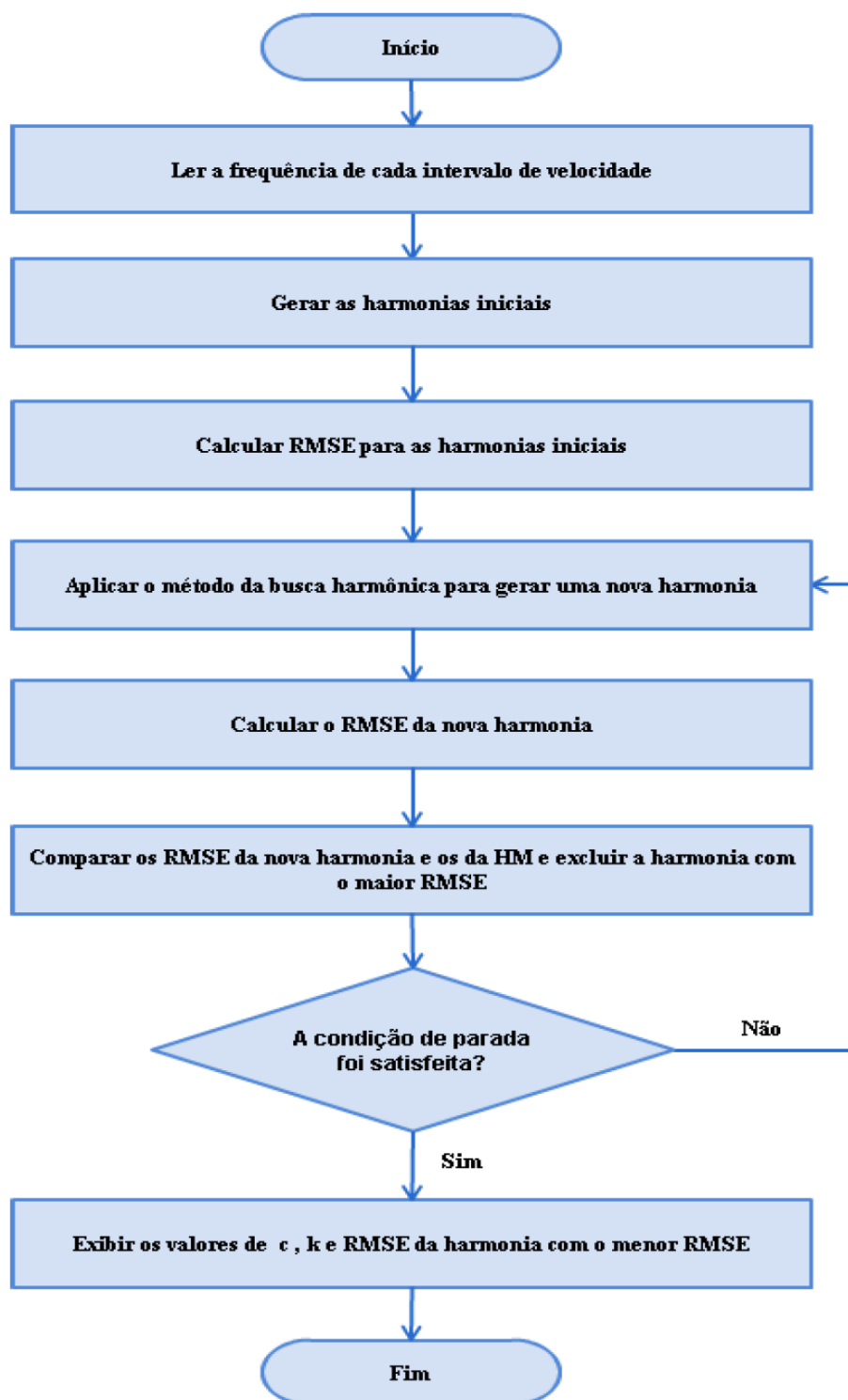


Figura 1. Representação do algoritmo (Barbosa, 2015).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para facilitar a análise final comparativa com os resultados das distribuições de Weibull foi realizado um tratamento de dados que resultou em histogramas para Petrolina e São Martinho da Serra, onde são apresentadas as frequências relativas de ocorrência dos intervalos de velocidades do vento para cada localidade.

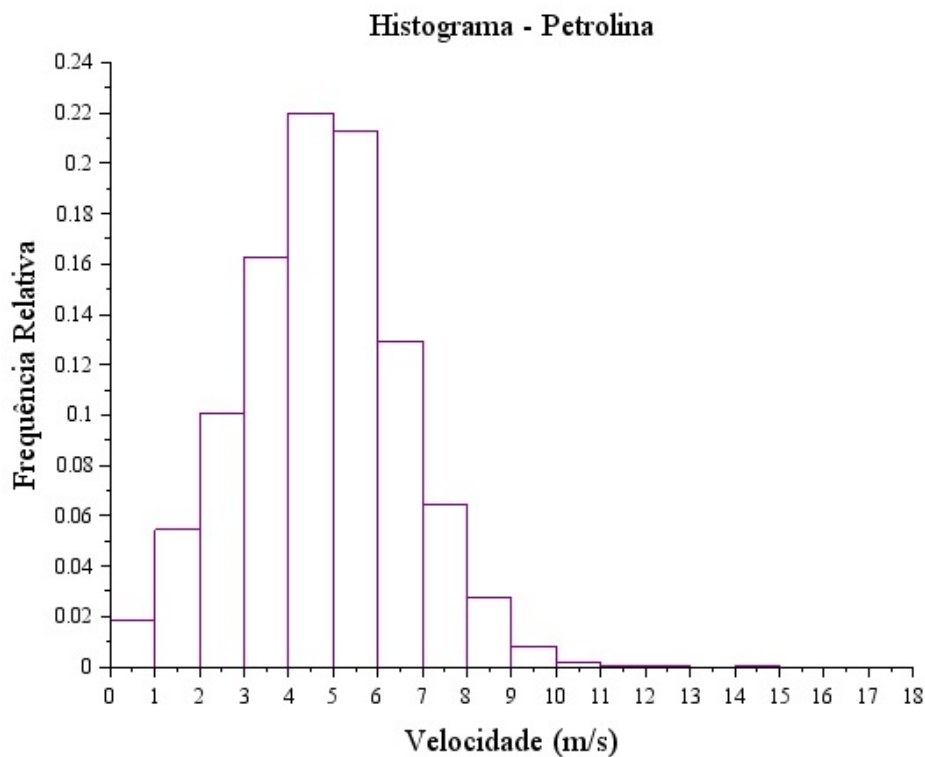


Figura 2. Histograma de Petrolina (Autoria própria, 2017).

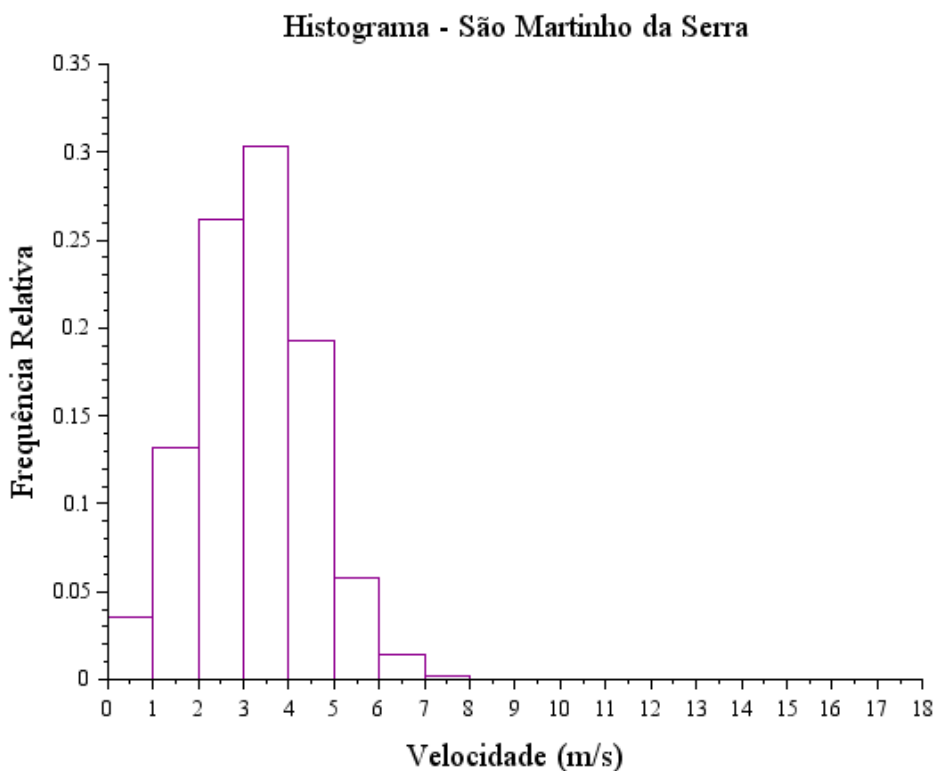


Figura 3. Histograma de São Martinho da Serra (Autoria própria, 2017).

O histograma de Petrolina mostra que o valor médio para a velocidade está próximo a 5 m/s, com pouca dispersão dos dados e o de São Martinho da Serra mostra que o valor está em torno de 3 m/s.

3.1. Resultados

Os parâmetros k e C da distribuição de Weibull, assim como o RMSE (Erro Quadrático Médio) e o r (Coeficiente de Correlação) para Petrolina e São Martinho da Serra foram calculados utilizando os dois métodos numéricos e a

metodologia da Busca Harmônica e são apresentados na Tab. 1 e na Tab. 2. As tabelas apresentam os melhores resultados dos quinze resultados obtidos para cada método e em cada localidade.

Tabela 1. Comparação entre os métodos para Petrolina (Autoria própria, 2017).

Resultados para Petrolina				
Método	k	C(m/s)	RMSE	r
ME	2,83831	5,30913	0,0949746941	0,970466
MDP	2,77725	5,31354	0,0948631633	0,973532
HS-PA	2,75223	4,92346	0,0946405379	0,974776

Tabela 2. Comparação entre os métodos para São Martinho da Serra (Autoria própria, 2017).

Resultados para São Martinho da Serra				
Método	k	C(m/s)	RMSE	R
ME	2,80382	3,62719	0,1109320995	0,977156
MDP	2,74191	3,63018	0,1105107604	0,979730
HS-PA	2,50318	3,22472	0,1062522934	0,988998

Em ambas as localidades, o método heurístico HS-PA representa a melhor solução para o problema, já que possui o menor RMSE (Erro Quadrático Médio) e o maior r (Coeficiente de Correlação) tanto em Petrolina quanto em São Martinho da Serra.

As comparações entre os métodos aplicados podem ser observadas na Fig. 4 e na Fig. 5.

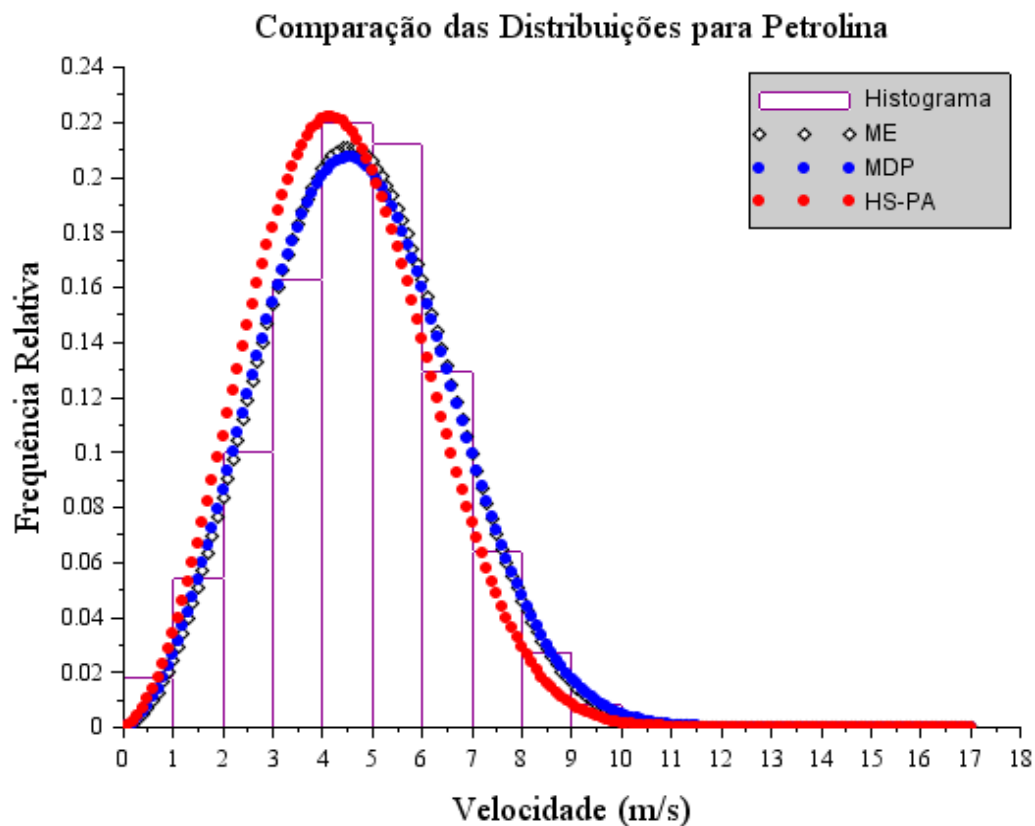


Figura 4. Comparação dos resultados para Petrolina (Autoria própria, 2017).

Devido aos valores semelhantes, a distribuição do ME apresenta-se na Fig.4 quase totalmente sobreposta pela do MDP. E a distribuição correspondente ao método HS-PA se apresenta próxima aos extremos de cada intervalo de velocidade representados pelo histograma, sendo assim a distribuição mais fiel às características de vento de Petrolina. Em São Martinho da Serra acontece o mesmo, como mostra a Fig. 5.

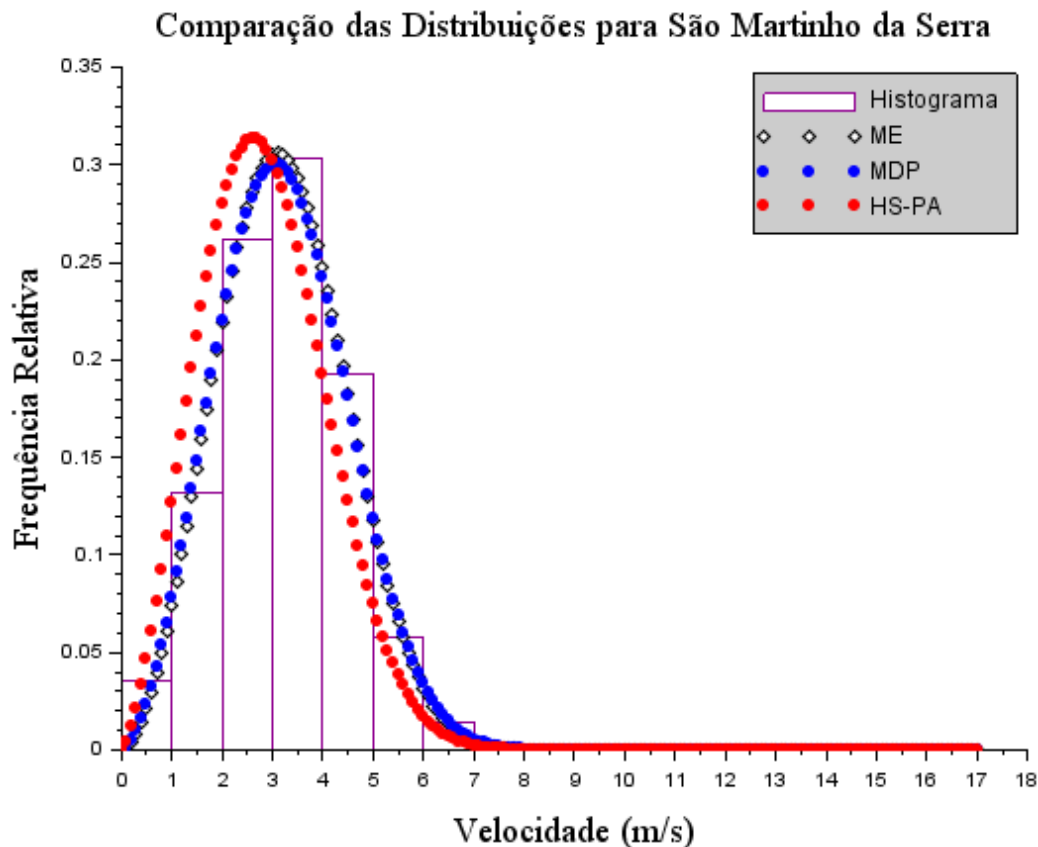


Figura 5. Comparação dos resultados para São Martinho da Serra (Autoria própria, 2017).

3.2. Cálculo do Potencial Eólico

O melhor resultado para cada localidade dos parâmetros obtidos pelas metodologias aplicadas foram utilizados para o cálculo do potencial eólico utilizando o software EoluSoft e os resultados foram comparados. Para o cálculo do potencial eólico é necessário realizar a extrapolação para os dados de velocidades. A extrapolação é necessária já que os dados de vento obtidos pelo Projeto SONDA são da altura de 50 m e para o cálculo do potencial eólico a altura de referência utilizada é de 100 metros, que corresponde a altura desejada de instalação do aerogerador.

Segundo Feitosa et al. (2014), para “a realização dessa etapa é utilizada a Lei de Hellmann”. Essa lei determina a velocidade de vento para um perfil vertical, e é dada por:

$$V_{h_2} = V_{h_1} \times \left[\frac{h_2}{h_1} \right]^\alpha \quad (12)$$

Onde:

h_1 = altura medida pela estação meteorológica

h_2 = altura de interesse;

$V(h_1)$ = velocidade média do vento na altura medida (ms^{-1});

$V(h_2)$ = velocidade medida do vento na altura de interesse (ms^{-1});

α = expoente de altitude de Hellmann (o valor depende da rugosidade do terreno e da estratificação térmica).

Utilizando $k=2,75223$, $C=4,92346$ m/s, uma velocidade média (50 m) igual a 4,73 m/s e uma velocidade média (100 m) de 4,83 m/s é possível calcular o potencial eólico para Petrolina. E para $k=2,50318$, $C=3,22472$ m/s, uma velocidade média (50 m) igual a 3,23 m/s e uma velocidade média (100 m) de 4,3 m/s é possível calcular o potencial eólico para São Martinho da Serra. Para isso é preciso definir alguns parâmetros, como temperatura (CLIMATE-DATA.ORG, 2017) e altitude (INPE, 2015).

O software EoluSoft calcula a energia anual gerada pela turbina Vestas 600k39, que é a turbina disponibilizada com o maior diâmetro de rotor (39 m). Para Petrolina, o valor da energia anual gerada é de 460,71570 MWh, que segundo Ereno (2010) daria para suprir as necessidades energéticas de um ano de mais de 150 residências médias. E para São

Martinho da Serra, o valor da energia anual gerada é de 86,7586 MWh, que segundo Ereno (2010) daria para suprir as necessidades energéticas de um ano de cerca de 40 residências médias.

Figura 6. Interface do EoluSoft (Autoria própria, 2017).

4. CONCLUSÃO

Este trabalho determinou os parâmetros da distribuição de Weibull por meio do método da Busca Harmônica (metodologia HS-PA) utilizando dados de ventos de Petrolina e São Martinho da Serra, e comparou os resultados obtidos aos resultados obtidos por meio dos métodos numéricos (Método Empírico e Método da Densidade de Potência), considerando os valores do RMSE (Erro Quadrático Médio) e do r (Coeficiente de Correlação).

O método HS-PA obteve os menores erros e o melhor coeficiente de correlação entre as variáveis, apresentando, então, os resultados mais estáveis. Os valores ótimos encontrados para Petrolina foram $k = 2,75223$ e $C = 4,92346$ m/s e para São Martinho da Serra foram $k = 2,50318$ e $C = 3,22472$ m/s, utilizando o método HS-PA, com RMSE = 0,0946405379 e $r = 0,974776$ para Petrolina e RMSE = 0,1062522934 e $r = 0,988998$ para São Martinho da Serra.

Os valores ótimos foram aplicados ao cálculo do potencial, juntamente com outras características ambientais, onde Petrolina obteve uma energia anual gerada de 460,71570 MWh e São Martinho da Serra de 86,7586 MWh.

Ambas as gerações de energias são satisfatórias e mostram a potencialidade da energia eólica nas duas localidades estudadas, com destaque para a cidade de Petrolina, no estado do Pernambuco.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio da Universidade Federal do Piauí, sob orientação do Prof. Me. Hélio de Paula Barbosa e incentivos do Prof. Me. Raphael Lima de Paiva. Foi realizado também graças à confiança em Deus e o suporte e amor oferecido por Gracilene Leal, Teresa Leal, Sérgio Leal e Lino Wagner.

6. REFERÊNCIAS

- Akdag, S. A.; Dinler, A. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. Energy Conversion and Management, 50, p. 1761–1766, 2009.
- Askarzadeh, A.; Zebarjadi, M. Wind power modeling using harmony search with a novel parameter setting approach. Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics. [s.l.], v. 135, p.70-75, 2014.

- Barbosa, H. P. Utilização da Busca Harmônica no ajuste da Curva de Weibull em energia eólica. 2015. 69f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- Chang, T. P. Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application. *Applied Energy*, [s.l.], v. 88, n. 1, p.272-282, 2011.
- climate-data.org. Clima: Petrolina. 2017a. Disponível em: < <https://pt.climate-data.org/location/31938/>>. Acesso em: 17 nov. 2017.
- climate-data.org. Clima: São Martinho da Serra. 2017b. Disponível em: < <https://pt.climate-data.org/location/313444/>>. Acesso em: 17 nov. 2017.
- Ereno, D. A força dos ventos. São Paulo: Pesquisa FAPESP, 2010. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2010/11/18/a-forca-dos-ventos/>>. Acesso em: 18 nov. 2017.
- Feitosa, E. O.; Albiero, D.; Praciano, A. C.; Macedo, D. X. S.; Chioderoli, C. A. Simulação do Aproveitamento da Energia Eólica para Irrigação no Distrito de Irrigado Baixo – Acaraú – CE. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*. Brasil: v. 3, p. 65-79, 2014.
- Geem, Z. W.; Kim, J. H.; Loganathan, G. V. A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. v. 76, n. 2. *Simulation*, 2001.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais: Sobre o Projeto SONDA. São José dos Campos: SONDA, 2015. Disponível em: <http://sonda.ccst.inpe.br/infos/sobre_projeto.html>. Acesso em: 26 ago. 2017.
- Justus, C. G; Hargraves, W. R; Mikail, A; Graber, D. Methods for estimating wind speed frequency distributions. *Journal of Applied Meteorology*. Boston: v. 17, n. 3, p. 350 – 353, 1978.
- Lage, C. Distribuição de Weibull. São Paulo: Energia Eólica no Ambiente Urbano – Estudo na UFABC, 2011. Disponível em: <<http://energiaeolicaufabc.blogspot.com.br/2011/11/distribuicao-de-weibull.html>>. Acesso em: 29 abr. 2017.
- Mahdavi, M.; Fesanghary, M.; Damangir, E. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. *Applied Mathematics And Computation*, [s.l.], v. 188, n. 2, p.1567-1579, 2007.
- Nascimento, L. B. P.; Pinto, V. P.; Amora, M. A. B.; Souza, D. A. Busca Harmônica com ajuste adaptativo de parâmetro por meio de Algoritmo Genético aplicada na otimização do projeto LQR. Curitiba: XII Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional, 2015.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ADJUSTING THE WEIBULL CURVE USING NUMERICAL METHODS AND HEURISTIC METHODS AND CALCULATION OF POTENTIAL IN WIND ENERGY

Ana Karolyna Silva Leal, anaksleal@gmail.com¹
Hélio de Paula Barbosa, helio.p.b@hotmail.com¹
Raphael Lima de Paiva, raphaellimap@ufpi.edu.br¹

¹Federal University of Piauí – UFPI, Renewable Energy Laboratory – LER, Bachelor of Mechanical Engineering, University Campus Ministro Petrônio Portella - Neighborhood Ininga – CEP: 64049-550 – Terezina-PI, Brazil

Abstract: To obtain reliable results for wind power generation projects, a good analysis and treatment of the wind resource is required, aiming at minimizing errors and stability of results. In this work, the Weibull curve was adjusted using numerical methods and heuristic method to obtain stable values used to calculate the wind potential in Petrolina (PE) and São Martinho da Serra (RS). The Harmonic Search (HS) optimization algorithm was used to estimate the parameters, using the Harmonic Search with Random Parameters (HS-PA) methodology, and two numerical methods, Empirical Method (ME) and Density Method of Power (MDP). Weibull distribution parameters were calculated using wind data provided by the Environmental Data Organization System (SONDA). The results of the three methodologies were compared, using as criteria the Mean Square Error (RMSE) and Correlation Coefficient (r). The HS-PA method presented the most stable results, with Petrolina RMSE = 0.0946405379 and $r = 0.974776$ and RMSE = 0.1062522934 and $r = 0.988998$ for São Martinho da Serra. The best results were applied to the calculation of the wind potential through the use of the EoluSoft software from PUCRS, where, together with other environmental characteristics, it was possible to estimate the wind power potential in the two localities presented. For Petrolina, the value of the generated annual energy was 460,71570 MWh and for São Martinho da Serra, the value was 86,7586 MWh.

Keywords: Weibull distribution, Harmonic Search, wind potential.