

MODELAGEM DE VELOCIDADE DO VENTO USANDO CADEIA DE MARKOV DE PRIMEIRA ORDEM PARA A CIDADE DE BARBALHA-CE

Fábio Sandro dos Santos¹, Taciana Araújo da Silva¹, Jader da Silva Jale¹, Tatijana Stosic¹

¹Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

RESUMO: Nos dias atuais é cada vez mais necessária a utilização de fontes alternativas para a geração de energia elétrica. Nesse contexto, a energia eólica ganha evidência, por se tratar de uma fonte limpa, renovável e abundante. O objetivo do presente trabalho é analisar o potencial eólico da cidade de Barbalha-CE. Assim, analisamos uma série temporal de velocidade do vento (em *m/s*) desta cidade, disponibilizada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Utilizamos o modelo de cadeia de Markov de primeira ordem, o qual é amplamente empregado na literatura para dados de velocidade do vento. De acordo com a matriz de probabilidade de transição e as estatísticas descritivas, encontramos que a região apresenta velocidade aceitável para geração de energia eólica, considerando aerogeradores de pequeno porte.

PALAVRAS-CHAVE: Potencial Eólico, Processo Markoviano, Energia Renovável.

WIND SPEED MODELING USING FIRST-ORDER MARKOV CHAIN FOR THE CITY OF BARBALHA-CE

ABSTRACT: Nowadays it is increasingly necessary to use alternative sources for the generation of electric energy. In this context, wind energy gains evidence because it is a clean, renewable and abundant source. The objective of this work is to analyze the wind potential of the city of Barbalha-CE. Thus, we analyze a time series of wind velocity (in *m/s*) of this city, made available by the National Institute of Meteorology (INMET). We use the first-order Markov chain model, which is widely used in the literature for wind speed data. According to the transition probability matrix and the descriptive statistics, we find that the region presents an acceptable speed for generating wind energy, considering small wind turbines.

KEYWORDS: Wind Power, Markovian Process, Renewable Energy.

INTRODUÇÃO

As energias provenientes de fontes renováveis têm ganhado destaque no cenário mundial e o Brasil possui notoriedade nesse setor, uma vez que sua geração de energia elétrica advém, em partes, de fontes renováveis como biomassa e eólica. Entretanto, o Brasil ainda é muito dependente das usinas hidroelétricas. Esse fato tem gerado transtornos à população, como racionamentos e apagões, devido à escassez de chuvas de algumas regiões (BEZERRA, 2015).

A energia eólica tem se mostrado bastante competitiva no Brasil, que atualmente é o oitavo no *ranking* de capacidade instalada de energia eólica segundo o *Global Wind Energy Council* (2017), sendo o Nordeste a região com maior potencial eólico, apresentando velocidade média dos ventos entre as maiores do país (SANTOS, F. S. et al., 2019). Em 2017, a fonte eólica chegou a suprir 60% da energia nordestina que teve seu abastecimento afetado pela seca. O Estado do Ceará é o terceiro no *ranking* brasileiro com 1.950,46 MW de capacidade instalada, contando com 75 parques (ABEÉOLICAA, 2018).

Dado o grande potencial eólico da região Nordeste e por ser afetada pela falta de chuvas, o estudo e modelagem da velocidade dos ventos é

essencial para auxiliar na tomada de decisões sem maiores riscos e enfatizar a relevância da fonte eólica, ressaltando que se trata de uma fonte limpa, abundante e disponível (BEZERRA, 2015).

O crescimento constante da utilização de energia eólica como fonte de eletricidade levou a um aumento de estudos acerca dos métodos capazes de detectar com melhor precisão o potencial gerador de um local (CARAPELUCCI; GIORDANO, 2013). Diversos estudos utilizaram modelos de cadeia de Markov, tais como: análise de precipitação (JALE et al., 2019), crescimento urbano (LE GALLO; CHASCO, 2008) e velocidade do vento (SAHIN; SEN, 2001, D'AMICO; PETRONI; PRATTICO, 2013).

Neste trabalho foi usado o modelo de Markov de primeira ordem para analisar dados horários de velocidade do vento de uma estação meteorológica da cidade de Barbalha, localizada na região metropolitana do Cariri Cearense, a qual detém partes da Chapada Nacional do Araripe que comporta o maior parque eólico do Brasil, com capacidade instalada de 359 MW (ABEÉOLICAA, 2018). Devido à proximidade de Barbalha com parques eólicos em produção, este trabalho tem como objetivo investigar o seu potencial para geração de energia eólica.

MATERIAL E MÉTODOS

Dados

Nesta pesquisa foram utilizados dados horários de velocidade do vento da estação meteorológica localizada nas coordenadas geográficas de longitude 39°18'7"W, latitude 7°18'18"S e altitude 409,03 m, na cidade de Barbalha-CE, no período entre 10/04/2017 e

09/04/2018. Os dados foram obtidos no *site* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2018). Toda a análise foi realizada usando o pacote *markovchain* (SPEDICATO et al., 2016) com o auxílio do *software* R (R Core Team 2018). O gráfico da Figura 1 também foi gerado através desse *software*.

Figura 1. Localização da Região do estudo – Barbalha – CE.



Cadeia de Markov

Cadeia de Markov é um processo estocástico, em que os valores possíveis da variável aleatória são denominados estados.

Isto significa que, se uma variável aleatória X está no estado i_k , e no instante $k - 1$ esteve no estado i_{k-1} , então (RUIZ-CRUZ; DIAZ-GONZALEZ, 2018):

(1)

$$P(X_k = i_k | X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_{k-1} = i_{k-1} = i_{k-1}) = p(X_k = i_k | X_{k-1} = i_{k-1}) = p_{i_{k-1}, i_k}.$$

Se $p_1(k), p_2(k), \dots, p_n(k)$ são as probabilidades dos n estados e $p_{ij}(k)$ a probabilidade de transição do estado i para o

estado j , no tempo t , as cadeias de Markov podem ser escritas no formato matricial, como segue (GARCIA; GONGADZE, 2018):

$$\begin{bmatrix} p_1(k+1) \\ \vdots \\ p_n(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11}(k) & \dots & p_{1n}(k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1}(k) & \dots & p_{nn}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1(k) \\ \vdots \\ p_n(k) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Em que a matriz

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11}(k) & \dots & p_{1n}(k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1}(k) & \dots & p_{nn}(k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

é chamada de matriz de probabilidade de transição.

Observando a equação (4), as probabilidades de transição em um passo são

independentes da variável ao longo do tempo, sendo assim, a cadeia de Markov tem probabilidade de transição estacionária. Ou seja, os elementos da matriz P_{ij} são independentes entre as observações e a

probabilidade condicional do estado i para o estado j é dada por

$$P_{ij} = P(X_{n+1} = j | X_n = i). \quad (4)$$

Após os cálculos das probabilidades acumuladas, o estado na nova série, gerada pelos processos anteriores, é convertido em um valor de velocidade do vento com um certo gerador de número aleatório (TANG; BROUST; TSUI, 2015).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise deste trabalho inicialmente foi feita uma exploração das medidas descritivas da série de velocidade do vento em Barbalha, no estado do Ceará. Ao observar a Tabela 2, podemos verificar que Barbalha apresenta velocidade mínima de 0,10 m/s, máxima de

6,30 m/s e média de 1,63 m/s. Esses valores podem estar relacionados à localização da estação meteorológica, uma vez que o município se encontra em uma região de baixa altitude, aos pés da Chapada do Araripe, fazendo com que a velocidade média do vento seja reduzida.

De acordo com a Tabela 2, o coeficiente de variação da série de velocidade do vento é de 56,50%. Portanto, a variabilidade em torno da média é alta, indicando que a velocidade do vento tem alta dispersão em relação à média.

Tabela 2. Principais estatísticas descritivas para dados horários de velocidade do vento no município de Barbalha–CE.

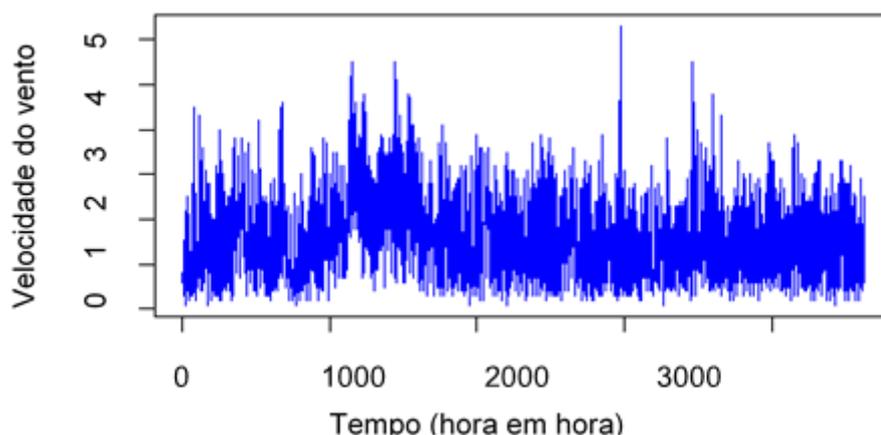
Estação	Lat.	Long.	Mínimo	Máximo	Média	D.P.	C.V.
Barbalha	7°18'18"S	39°18'7"W	0,10	6,30	1,63	0,92	56,50%

A Figura 2 apresenta a série temporal histórica da velocidade do vento para a estação de Barbalha–CE, confirmando que existe uma alta dispersão em torno da média, com grandes oscilações. Este fato pode tornar as previsões mais complexas devido à alta dispersão.

Os menores valores de velocidade do vento foram detectados nos meses de dezembro a maio (período chuvoso), enquanto os maiores valores entre os meses de agosto e novembro (período seco). Lira et al. (2014) usaram regressão linear para estimar a

velocidade média do vento em altitudes de 20 m, 40 m e 60 m a partir de dados coletados à 10 m. Para as regiões de Paracuru e Camocim, eles encontraram velocidade média mais baixa de janeiro a maio (período chuvoso) e velocidade média mais alta entre julho e dezembro (período seco). Isso ocorre devido à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) causando chuvas mais frequentes e ventos mais fracos. Estes resultados são consistentes com o presente trabalho.

Figura 2. Velocidade do vento em Barbalha–CE (10/04/2017 a 09/04/2018).



Os estados do modelo de cadeia de Markov de primeira ordem foram definidos como limites da velocidade do vento local

registrada, conforme podemos observar na Tabela 1.

Tabela 1. Definição dos estados da cadeia de Markov para a série horária de velocidade do vento na estação de Barbalha–CE.

Estados	Velocidade do vento (em m/s)
A	[0, 1)
B	[1, 2)
C	[2, 3)
D	[3, 4)
E	[4, 5)
F	[5, 6)
G	[6, 7)
H	≥ 8

O primeiro estado tem limite inicial igual a zero, obviamente, variando de uma unidade entre cada estado (TANG; BROUSTE; TSUI, 2015). A análise da velocidade do vento horária para o município de Barbalha, por meio do modelo de Markov, gerou uma matriz de ordem 1 com dimensão (8 x 8). A matriz de

probabilidade de transição de ordem 1, mostrada na Tabela 3, define a probabilidade de transição entre dois estados de velocidade do vento levando em consideração o estado anteriormente observado. A Tabela 4 apresenta a probabilidade acumulada de transição entre dois estados.

Tabela 3. Matriz de probabilidade de transição para velocidade do vento horária da estação localizada no município de Barbalha–CE.

Estados/Estados	A	B	C	D	E	F	G	H
A	0.6234	0.3048	0.0630	0.0066	0.0015	0.0007	0.0000	0.0000
B	0.2675	0.4794	0.2228	0.0242	0.0061	0.0000	0.0000	0.0000
C	0.0522	0.3311	0.4967	0.1151	0.0041	0.0008	0.0000	0.0000
D	0.0199	0.1108	0.4147	0.4119	0.0369	0.0028	0.0000	0.0028
E	0.0213	0.0851	0.1702	0.3404	0.3404	0.0426	0.0000	0.0000
F	0.0000	0.2000	0.2000	0.4000	0.2000	0.0000	0.0000	0.0000
G	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
H	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tabela 4. Probabilidade acumulada da matriz de probabilidade de transição para dados horários de velocidade do vento no município de Barbalha–CE.

Estados/Estados	A	B	C	D	E	F	G	H
A	0.6234	0.9282	0.9912	0.9978	0.9993	1.0000	1.0000	1.0000
B	0.2675	0.7469	0.9697	0.9939	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
C	0.0522	0.3833	0.880	0.9951	0.9992	1.0000	1.0000	1.0000
D	0.0199	0.1307	0.5454	0.9573	0.9942	0.997	0.997	1.0000
E	0.0213	0.1064	0.2766	0.617	0.9574	1.0000	1.0000	1.0000
F	0.0000	0.2000	0.4000	0.8000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
G	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
H	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi investigado o potencial eólico da cidade de Barbalha–CE, utilizando modelos de cadeia de Markov, por meio de uma série temporal com observações horárias de velocidade do vento de uma estação meteorológica. Essa abordagem é importante na tomada de decisão a curto prazo na área de energias sustentáveis.

A cidade de Barbalha–CE apresenta potencial eólico em alguns momentos observados. Destaca-se que essa geração de energia é tecnicamente aproveitável para a instalação de parques eólicos com aerogeradores de pequeno porte, capazes de gerar energia com ventos a partir de 2,5 m/s.

A limitação para instalação de um grande parque eólico pode ser explicada devido a cidade se localizar na encosta da Chapada no Araripe, região de baixa altitude, e também pelo local de instalação do anemômetro.

Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos sob dois prismas: analisar dados concentrados em regiões de maior altitude da cidade (mais próximas da chapada) e análise da direção dos ventos na região.

REFERÊNCIAS

- ABEÉOLICAA - Associação Brasileira de Energia Eólica. Disponível em: <http://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 23 maio de 2018.
- BEZERRA, F. D. Informe técnico: As fontes renováveis de energia solar e eólica no Nordeste: oportunidades para novos negócios & inovação. Banco do Nordeste. Ano IX, n. 5, 2015.
- CARAPPELLUCCI, R.; GIORDANO, L. A new approach for synthetically generating wind speeds: A comparison with the Markov chains method. *Energy*, v. 49, n. 1, p. 298-305, 2013.
- D'AMICO, G.; PETRONI, F.; PRATTICO, F. First and second order semi-Markov chains for wind speed modeling. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 392, n. 5, p. 1194-1201, 2013.
- DOS SANTOS, F. S., DO NASCIMENTO, K. K. F., DE JESUS, E. S., DA SILVA JALE, J., STOSIC, T., & FERREIRA, T. A. E. (2019). Análise estatística da velocidade do vento em Petrolina-PE utilizando as distribuições Weibull e a Burr. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 4, n. 1, p. 057-064, 2019.

GARCIA, M. I.; GONGADZE, T. Wind profile prediction using linear Markov Chains: a linear algebra approach. In: Latin America Transactions. IEEE, v. 16, n. 2, p. 536-541, 2018.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. AGRICULTURA, P. e. A. Ministério da. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em: 01 maio de 2018.

R Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2018.

JALE, J. S.; JÚNIOR, S. F. A. X.; XAVIER, E. F. M.; STOSIC, T.; STOSIC, B.; FERREIRA, T. A. E. Application of Markov chain on daily rainfall data in Paraíba-Brazil from 1995-2015. Acta Scientiarum. Technology, v. 41, p. e37186, 2019.

LE GALLO, J., & CHASCO, C. Spatial analysis of urban growth in Spain, 1900–2001. Empirical Economics, v. 34, n. 1, p. 59-80, 2008.

LIRA, M. A. T.; DA SILVA, E. M.; ALVES, J. M. B.; VERAS, G. V. O. Estimation of wind resources in the coast of Ceará, Brazil, using the linear regression theory. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 39, p. 509-529, 2014.

RUIZ-CRUZ, R; DIAZ-GONZALES, A. D. Investment Portfolio Trading based on Markov Chain and Fuzzy Logic. In: Latin American Conference on Computacional Intelligence. IEEE, p. 1-6, 2018.

SAHIN, A. D.; SEN, Z. First-order Markov chain approach to wind speed modelling. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 89, n. 3-4, p. 263-269, 2001.

SCHOLZ, T.; LOPES, V. V.; ESTANQUEIRO, A. A cyclic time-dependent Markov process to model daily patterns in wind turbine power production. Energy, v. 67, p. 557-568, 2014.

SPEDICATO, G. A.; KANG, T. S.; YALAMANCHI, S. B.; YADAV, D. The markovchain Package: A Package for Easily Handling Discrete Markov Chains in R, 2016.

TANG, J; BROUSTE, A.; TSUI, K. L. Some improvements of wind speed Markov chain

modeling. Renewable Energy. v. 81, p. 52-56, 2015.