

MODELAGEM DE INCERTEZAS DA GERAÇÃO EÓLICA PARA AVALIAÇÃO DA MARGEM DE ESTABILIDADE DE TENSÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Pedro Lucas Betarelo dos Santos ⁽¹⁾

Dr. Luís Fernando Costa Alberto ⁽²⁾

Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo

pedrobetarelo@usp.br ⁽¹⁾; lfcalberto@usp.br ⁽²⁾

Objetivos

O objetivo deste projeto de pesquisa é modelar as variações de curto prazo na geração de energia em parques eólicos, com foco em manter a estabilidade dos níveis de tensão no sistema elétrico de potência (SEP) e garantir a qualidade do fornecimento de eletricidade. Dado o caráter intermitente das fontes eólicas, este projeto busca abordar a incerteza que essa geração introduz no planejamento operacional, utilizando técnicas estatísticas de séries temporais. Além de aprimorar a previsão da geração, os resultados deste estudo visam mitigar os desafios da integração de fontes de energia eólica no SEP [1], garantindo a confiabilidade e qualidade do fornecimento de energia elétrica e contribuindo para a transição energética sustentável.

Métodos e Procedimentos

Neste estudo, foram utilizados dados históricos fornecidos pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) para modelar as variações dinâmicas de geração de energia no Conjunto Lagoa dos Ventos, com amostras da potência de saída do parque coletadas a cada hora, em MWmed. Inicialmente, o modelo autorregressivo (AR) foi estudado e é apresentado na equação (1) [2]. Esta técnica estatística é amplamente utilizada na análise de séries temporais, principalmente

para modelar dados estacionários. O método consiste na combinação linear dos parâmetros do modelo (φ_i) com pontos anteriores da série temporal (z_t), somados a um termo de ruído branco (a_t).

$$z_t = a_t + \sum_{i=1}^p \varphi_i z_{t-i} \quad (1)$$

Para considerar a dinâmica de dados com média móvel, propõe-se o modelo *Moving Average* (MA), apresentado na equação (2). Diferente do modelo AR, onde os pontos da série são combinações lineares dos valores anteriores, no modelo MA o valor atual da série temporal é uma combinação linear dos erros de previsão passados, assim, resultando em diferentes parâmetros para o modelo (θ_i).

$$z_t = a_t - \sum_{i=1}^q \theta_i z_{t-i} \quad (2)$$

Por fim, o modelo Autorregressivo Integrativo de Médias Móveis (ARIMA) é proposto e apresentado na equação (3). Nesta análise, admite-se que comportamentos não estacionários possam ser representados por modelos estacionários, em que uma nova série pode ser modelada por um modelo misto autorregressivo de médias móveis e que a série

original z_t pode ser recuperada pelo operador soma (∇) [2].

$$w_t = \nabla^d z_t \quad (3)$$

Em se tratando da obtenção dos parâmetros das séries temporais, para o modelo AR são utilizadas as equações de Yule-Walker [3]. Já para o modelo MA e ARIMA, são utilizadas as Funções de Autocorrelação (FAC) e as Funções de Autocorrelação Parcial (FACP) [2].

Resultados

Com as técnicas de séries temporais conhecidas, os dados disponibilizados pelo ONS foram tratados de acordo com questões sazonais [4], em que foram utilizadas na análise amostras dos meses de março a maio de 2023. Para a avaliação dos modelos e para verificar a veracidade dos resultados, as duas últimas amostras conhecidas foram retiradas do espaço amostral e os métodos apresentados foram desenvolvidos para tentar prever quais seriam esses valores.

Com o auxílio dos softwares *MATLAB* e *R*, aplicando os modelos descritos, tem-se os resultados apresentados na Tabela 1:

Tabela 1: Amostras previstas em comparação às amostras medidas

	1ª AMOSTRA (MWmed)	2ª AMOSTRA (MWmed)
MEDIDA	659.234	661.933
AR	661.493	655.554
MA	554.849	587.149
ARIMA	667.6019	673.5334

Agora, é possível avaliar o erro entre os valores medidos e os valores obtidos em cada método, os quais são apresentados na tabela 2:

Tabela 2: Erros do processo de previsão

	1ª AMOSTRA (%)	2ª AMOSTRA (%)
AR	0.3426	-0.9637
MA	-15.8342	-11,2979
ARIMA	1.2693	1.7525

Conclusões

Destarte, conclui-se que os modelos AR e ARIMA foram os mais adequados para o processo de previsão. O modelo AR apresentou a menor variação entre o valor medido e o valor previsto, o que se deve ao fato de que os dados estudados apresentam certa estacionariedade, o que se justifica pelo tratamento inicial dos dados, que levou em consideração questões sazonais, resultando em propriedades estatísticas com características estacionárias. A precisão dos resultados mostra que séries temporais são ferramentas úteis no estudo da dinâmica de geração de parques eólicos, contribuindo significativamente para tomadas de decisão operacionais e estratégias de gestão mais eficazes em diferentes contextos.

Agradecimentos

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio financeiro disponibilizado (processo 2023/15799-6).

Referências

- [1] BICALHO, F. S. Integração de Turbinas Eólicas às Redes Elétricas. Monografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, janeiro de 2013.
- [2] BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. "Time Series Analysis: Forecasting and Control", Revised Edition, Holden-Day Inc., 1976.
- [3] VERAS, J. L. B.; RINA, C. C. "Estudo de Métodos de Resolução das Equações de Yule-Walker em Análise Espectral por Modelo Autorregressivo (AR)." Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics 8.1 (2021).
- [4] AMARANTE, A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. 2001.