

Modelos de Inteligência Artificial, *Machine Learning* e Otimização Aplicados à Previsão de Energia Eólica: Uma Revisão Sistemática da Literatura

Maria Luiza Xavier de Holanda Cavalcanti^a, Lúcio Camara e Silva^a, Luciano Costa^b, José Leão^a, Lucimário Gois de Oliveira Silva^a, Walton Pereira Coutinho^a, Fábio Sandro dos Santos^c

marialuiza.cavalcanti@ufpe.br, lucio.silva@ufpe.br,
luciano.costa@academico.ufpb.br, ze.leao@ufpe.br,
lucimario.silva@ufpe.br, walton.coutinho@ufpe.br,
fabio.santos@ufpi.edu.br

^aPrograma de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPGEP/CAA, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Avenida Marielle Franco, s/n, Bairro Nova Caruaru, Caruaru – PE, 55014-900, Brasil

^bDepartamento de Engenharia de Produção (DEP), LOG-UFPB – Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Campus Universitário de João Pessoa – Campus I – Conj. Pres. Castelo Branco III, João Pessoa – PB, 58051-970, Brasil

^cUniversidade Federal do Piauí (UFPI)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura que analisa o uso de técnicas de Inteligência Artificial, *Machine Learning* e otimização na previsão de energia eólica. Utilizando os protocolos PRISMA e *Methodi Ordinatio*, foram selecionados os artigos mais relevantes da última década. Os resultados mostram o predomínio de abordagens híbridas, uso frequente de redes neurais e algoritmos evolutivos, e foco em variáveis meteorológicas. A análise bibliométrica indica crescimento do interesse pelo tema e colaborações internacionais. O estudo fornece base para o desenvolvimento de modelos mais eficazes e aplicáveis na geração de energia eólica.

PALAVRAS CHAVE. Inteligência Artificial. Previsão de Energia Eólica. *Machine Learning*. Algoritmos de otimização. Revisão Sistemática da Literatura.

Tópicos: EN&OG – PO na Área de Energia, Óleo e Gás; EST&AM – PO Analytics em Estatística e Aprendizado de Máquina; IA – PO e IA

ABSTRACT

This work presents a systematic literature review that analyzes the use of Artificial Intelligence, Machine Learning and optimization techniques in wind energy forecasting. Using the PRISMA and *Methodi Ordinatio* protocols, the most relevant articles from the last decade were selected. The results show the predominance of hybrid approaches, frequent use of neural networks and evolutionary algorithms, and a focus on meteorological variables. The bibliometric analysis indicates growing interest in the topic and international collaborations. The study provides a basis for the development of more effective and applicable models for wind power generation.

KEYWORDS. Artificial Intelligence. Wind Power Forecasting. Machine Learning. Optimization Algorithms. Systematic Literature Review.

Topics: EN&OG – OR in Energy Area, Oil and Gas; ST&ML – OR Analytics in Statistics and Machine Learning; AI – OR and AI

1. Introdução

A crescente demanda global por fontes energéticas sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de métodos preditivos aplicados à energia eólica, uma alternativa limpa, abundante e estratégica [Campos et al., 2017]. Contudo, sua natureza intermitente e não linear impõe desafios ao planejamento energético, exigindo soluções capazes de lidar com variabilidade e incertezas meteorológicas [DIAS et al., 2025].

Nesse contexto, técnicas de Inteligência Artificial (IA), aprendizado de máquina (*Machine Learning*) e algoritmos de otimização vêm se destacando por sua capacidade de construir modelos preditivos adaptáveis a diferentes horizontes temporais e regiões geográficas [Deng et al., 2020]. O crescente volume de publicações sobre o tema dificulta a identificação de abordagens mais eficazes, tornando essenciais revisões sistemáticas da literatura (RSL) para consolidar o conhecimento de forma rigorosa e transparente.

Este trabalho realiza uma RSL combinando os métodos PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) e *Methodi Ordinatio*, permitindo selecionar e ranquear artigos com base em critérios quantitativos. O recorte temporal de 2015 a 2024 visa refletir os avanços mais recentes da área. Os objetivos são mapear o estado da arte, identificar tendências metodológicas e lacunas de pesquisa, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de modelos mais precisos e aplicáveis à previsão de energia eólica.

2. Metodologia

A RSL foi conduzida com base nas diretrizes de Kitchenham et al. [2007], combinando o protocolo PRISMA para seleção dos estudos e o *Methodi Ordinatio* para ranqueamento com base em fator de impacto, ano de publicação e citações. A busca foi realizada nas bases de dados selecionadas, considerando o período de 2015 a 2024. As análises bibliométricas foram feitas no R com o pacote *bibliometrix*, permitindo mapear autores, periódicos, palavras-chave e colaborações na área.

2.1. Protocolo PRISMA

O protocolo PRISMA orienta a seleção e inclusão dos artigos por meio de um fluxo padronizado composto por quatro etapas [Page et al., 2023]: (i) Identificação, com busca ampla em bases de dados, utilizando palavras-chave específicas e aplicação de filtros por idioma, período e tipo documental; (ii) Triagem, com exclusão de duplicatas e análise preliminar de títulos e resumos; (iii) Elegibilidade, com leitura completa para verificação dos critérios de inclusão e exclusão; e (iv) Inclusão, com definição final dos estudos selecionados para análise.

2.2. *Methodi Ordinatio*

O *Methodi Ordinatio* é utilizado para qualificar e ranquear os artigos selecionados com base em critérios quantitativos, como fator de impacto (IF), ano de publicação e número de citações, atribuindo uma pontuação antes mesmo da leitura completa dos textos [Pagani et al., 2015]. A equação utilizada é:

$$\text{InOrdinatio} = \frac{IF}{1000} + \alpha [10 - (A_{\text{atual}} - A_{\text{pub}})] + \sum c_i \quad (1)$$

onde IF é o fator de impacto do periódico (dividido por 1000), α representa o peso da atualidade (variando entre 1 e 10), $A_{\text{atual}} = 2024$ é o ano da análise, A_{pub} o ano de publicação do artigo, e $\sum c_i$ o total de citações recebidas [Pagani et al., 2015].

A Figura 1 resume as etapas do processo de ranqueamento.

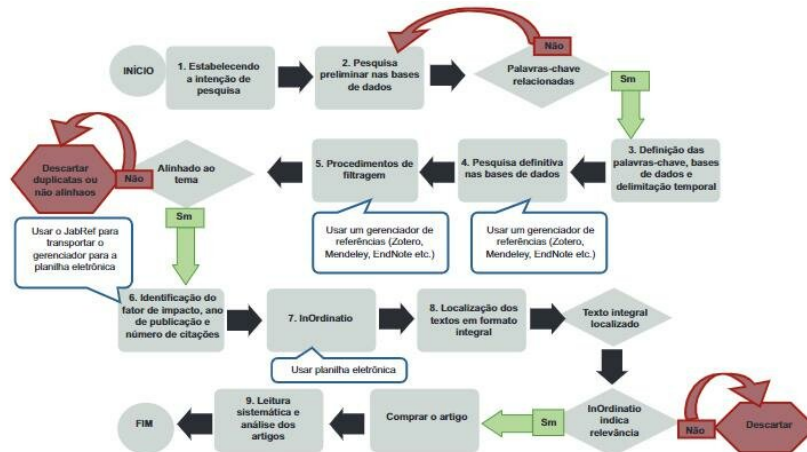


Figura 1: Fases do *Methodi Ordinatio*. Adaptado de Pagani et al. [2015].

2.3. Estratégia de Busca e Seleção

A busca combinou termos-chave usando operadores booleanos, conforme resumido na Tabela 1, envolvendo energia eólica, previsão, IA, *machine learning* e modelos de decisão.

Bases	Scopus, Web of Science
Campos	Título, resumo, palavras-chave
Consulta	("wind energy"OR "wind power") AND ("demand forecasting"OR "renewable energy prediction") AND ("artificial intelligence"OR "machine learning"OR "decision model")
Filtros	Artigos; inglês; 2014–2024
Data	Até 13/08/2024

Tabela 1: Busca nas bases Scopus e Web of Science.

2.4. Análise Bibliométrica

A análise bibliométrica foi conduzida no ambiente R com o pacote *bibliometrix* [Aria e Cuccurullo, 2017], permitindo a extração e interpretação de métricas relevantes para avaliação quantitativa da literatura após o ranqueamento com o *Methodi Ordinatio*. Foram analisados diversos indicadores para compreender a dinâmica e a estrutura da produção científica sobre previsão de energia eólica com as técnicas investigadas. Destacam-se:

- Principais periódicos e seus fatores de impacto, evidenciando a concentração dos estudos em revistas de alta relevância;
- Autores e instituições com maior número de publicações e citações, além de suas redes de coautoria;
- Coocorrência de palavras-chave, revelando tópicos emergentes como aprendizado profundo, modelos híbridos e heurísticas;
- Evolução temporal das publicações, indicando o crescimento do interesse no tema;
- Distribuição geográfica e parcerias internacionais na produção científica.

Identificaram-se as variáveis meteorológicas mais usadas e as técnicas preditivas recorrentes, o que contribui para validar a amostra e mapear tendências e métodos na área.

3. Resultados e Discussão

A aplicação dos métodos PRISMA e *Methodi Ordinatio* selecionou 50 artigos publicados entre 2015 e 2024, revelando crescimento contínuo do interesse no tema. Os estudos concentram-se

em periódicos de alto impacto, como *Renewable Energy*, *Applied Energy* e *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. As técnicas mais frequentes incluem:

- Redes Neurais Artificiais (RNAs), especialmente recorrentes LSTM, GRU e redes profundas (DNN), para modelagem de padrões temporais e não linearidades;
- Modelos híbridos que combinam RNAs, máquinas de vetores de suporte (SVM) e algoritmos de otimização por enxame de partículas (PSO);
- Algoritmos de otimização, como Algoritmo Genético (GA), PSO e Extreme Learning Machine (ELM), para ajuste e treinamento dos modelos.

As variáveis meteorológicas mais usadas são velocidade e direção do vento, temperatura e pressão, obtidas de estações locais. Muitos estudos aplicam séries temporais, dados compostos e *feature engineering*. As previsões focam em curto e médio prazo (até 48h), avaliadas por RMSE (*Root Mean Square Error*), MAE (*Mean Absolute Error*) e R^2 . Previsões de longo prazo ainda são desafiadoras devido à variabilidade do vento. Foram identificadas lacunas na generalização geográfica, uso de dados em tempo real, padronização e integração dos modelos a sistemas de decisão, indicando oportunidades para futuras pesquisas.

4. Conclusão

Esta RSL, baseada em metodologias consolidadas, mapeou o uso de IA, *machine learning* e otimização na previsão de energia eólica, evidenciando avanços em abordagens híbridas e o uso intenso de dados meteorológicos. Destaca-se a necessidade de padronização, maior replicabilidade e melhor integração dos modelos com aplicações práticas. A pesquisa oferece base para o desenvolvimento de modelos mais robustos e generalizáveis, apontando que futuras investigações podem se beneficiar de técnicas adaptativas, dados em tempo real e ferramentas de apoio à decisão para impulsionar a inovação no setor de energia renovável.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio institucional prestado durante a realização deste trabalho.

Referências

- Aria, M. e Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An r-tool for comprehensive science mapping analysis. In *Proceedings of the Journal of Informetrics*, Italy.
- Campos, C. P. S. G. et al. (2017). Renovação da política energética brasileira enquanto instrumento para o desenvolvimento através da maior exploração da energia eólica.
- Deng, X., Shao, H., Hu, C., Jiang, D., e Jiang, Y. (2020). Wind power forecasting methods based on deep learning: A survey. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 122(1):273–302.
- DIAS, P. V. d. S. et al. (2025). Metodologia que integra variabilidade, complementaridade entre fontes de energia e dados históricos na análise de fluxo de potência.
- Kitchenham, B., Charters, S., et al. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering.
- Pagani, R. N., Kovaleski, J. L., e Resende, L. M. (2015). Methodi ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. *Scientometrics*, 105:2109–2135.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., e Moher, D. (2023). A declaração prisma 2020: diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. *Revista Panamericana de Salud Publica*, 46:e112.