

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA OTIMIZAÇÃO E MONITORAMENTO DA ENERGIA EÓLICA: UMA REVISÃO PARA UMA PREDIÇÃO INTELIGENTE E SUSTENTÁVEL

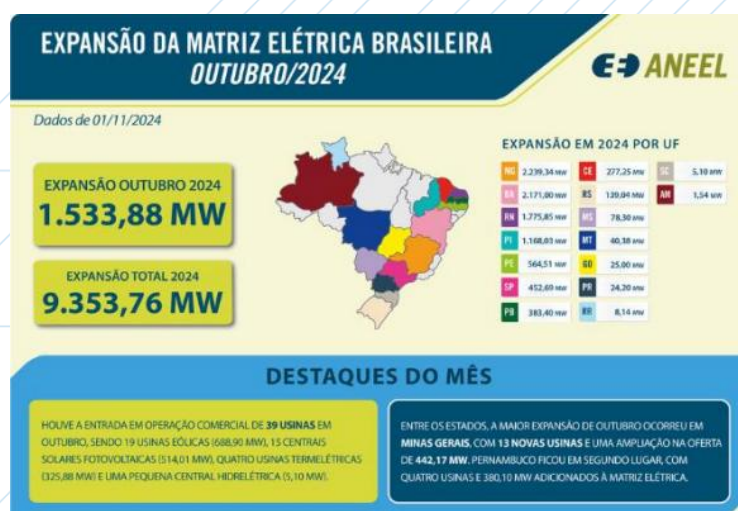
Laura Ribeiro Bernardino – d2023009575@unifei.edu.br
Kevin Henrique Monfredini Silva – d2022006962@unifei.edu.br
Matheus Brendon Francisco – matheus_brendon@unifei.edu.br

Palavras-chave: Energia Eólica, Inteligência Artificial, Aprendizado de Máquina, Manutenção Preditiva, Otimização Energética.

1. INTRODUÇÃO

A transição para fontes de energia renovável é um dos maiores desafios do século XXI, e o Brasil tem se destacado nesse cenário. A expansão da geração eólica tem sido notável, com projeções indicando que fontes renováveis alternativas superarão hidrelétricas e térmicas na matriz elétrica brasileira até 2028. Contudo, essa expansão impõe desafios operacionais significativos. A energia eólica é, por natureza, intermitente e dependente de condições climáticas. Aspectos como a variabilidade do vento, a manutenção de turbinas e a integração com redes elétricas exigem soluções inteligentes para garantir a estabilidade e eficiência do fornecimento.

Figura 1 - Expansão da Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: ANEEL (2024).

Neste contexto, a Inteligência Artificial (IA) surge como uma aliada estratégica para a Engenharia de Produção, viabilizando o conceito de "produção inteligente". Ferramentas de IA, como machine learning e deep learning, permitem analisar grandes volumes de dados operacionais e meteorológicos para otimizar a operação e garantir maior previsibilidade ao sistema. Aplicações em manutenção preditiva e otimização de parques eólicos já demonstram impactos positivos na redução de custos operacionais e aumento da confiabilidade.

À luz dos fatos, este artigo tem como objetivo revisar os principais avanços, aplicações e desafios relacionados ao uso da Inteligência Artificial na geração eólica, com foco em monitoramento, otimização e suporte à tomada de decisão. Ao reunir estudos recentes, buscamos oferecer uma visão abrangente das contribuições da IA para o setor eólico, destacando seu papel como tecnologia-chave na construção de um futuro energético mais sustentável e inteligente.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Referencial teórico

A aplicação da IA no setor de energia eólica visa transformar dados brutos em decisões operacionais otimizadas. A literatura recente foca em três pilares principais que sustentam a operação inteligente de parques eólicos.

O primeiro pilar é a Previsão de Geração. A capacidade de prever com acurácia a velocidade do vento e a potência gerada é fundamental para o planejamento energético e a estabilidade da rede. Modelos de IA, especialmente os de deep learning (aprendizado profundo), têm superado métodos estatísticos tradicionais por conseguirem modelar a natureza não-linear e complexa dos dados de vento.

O segundo pilar é o Monitoramento de Condição e Detecção de Falhas. Os custos de manutenção, especialmente em parques offshore, são elevados. A falha inesperada de um componente crítico, como a caixa de engrenagens, pode levar a longos períodos de inatividade. A IA é aplicada em estratégias de manutenção preditiva, analisando dados de sensores em tempo real – como vibração, temperatura e sinais acústicos, geralmente coletados por sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – para identificar anomalias e prever falhas antes que ocorram.

O terceiro pilar é a Integração com Redes Inteligentes (Smart Grids). As redes inteligentes utilizam comunicação e processamento de dados em tempo real para otimizar a distribuição e o consumo de energia. A IA atua como o cérebro dessa integração, usando as previsões de geração (Pilar 1) e o status de saúde das turbinas (Pilar 2) para gerenciar dinamicamente o fluxo de energia, garantindo estabilidade e eficiência.

2.2 Metodologia

Para identificar as principais aplicações de IA no setor eólico, foi realizada uma revisão sistemática da literatura. A pesquisa foi estruturada com base no método PICO (População/Problema, Intervenção, Comparação, Outcome) , focando na pergunta: "Como a aplicação de IA (I) em parques eólicos (P) tem contribuído para melhorar a eficiência e prever falhas (O), em comparação com métodos tradicionais (C)?".

A busca foi realizada em bases científicas de relevância, incluindo IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink e Scopus. Os critérios de inclusão focaram em artigos científicos revisados por pares, publicados entre 2021 e 2025, que abordassem aplicações de IA em previsão de potência, monitoramento de condição e detecção de falhas. A triagem seguiu três etapas (título, resumo, leitura completa), e os artigos selecionados foram categorizados para análise e síntese.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A revisão sistemática permitiu categorizar as aplicações de IA em três grandes frentes, conforme detalhado abaixo.

3.1 Previsão de Velocidade e Potência do Vento

A previsão de potência é um problema clássico de série temporal. Estudos recentes demonstram a superioridade de modelos híbridos de deep learning. Por exemplo, Hossain et al. (2021) alcançaram um erro absoluto médio de apenas 1,59% utilizando um modelo híbrido, superando redes neurais tradicionais e ARIMA. No contexto nacional, Carneiro et al. (2022) propuseram modelos ensemble (junção de modelos) para previsão no Brasil e Espanha, demonstrando que a combinação de algoritmos supera o desempenho de modelos individuais. Os algoritmos

predominantes nesta área são as Redes Neurais Recorrentes, especialmente LSTM (Long Short-Term Memory), e, mais recentemente, Transformers.

3.2 Monitoramento de Condição e Detecção de Falhas

Nesta área, o sistema SCADA é a principal fonte de dados para o monitoramento em tempo real. Os sistemas SCADA coletam dezenas de variáveis, como temperatura de componentes, velocidade de rotação, níveis de vibração e potência gerada. A IA é imprescindível para analisar essa massa de dados temporais e detectar anomalias. Trabalhos como o de Zhu et al. (2022) utilizam redes LSTM para analisar dados do SCADA e prever falhas na caixa de engrenagens, demonstrando a eficácia da manutenção preditiva. Outros estudos aplicam deep learning para analisar sinais de vibração ou imagens térmicas de pás, automatizando a detecção de defeitos.

3.3 Integração com Redes Inteligentes

Os resultados confirmam que a integração dos dois pilares anteriores é a base das smart grids. As previsões de potência (Seção 3.1) permitem que a rede inteligente ajuste dinamicamente a geração. O monitoramento de falhas (Seção 3.2) fornece feedback em tempo real sobre a saúde dos ativos. A IA combina esses dados para uma gestão otimizada, permitindo que a rede ajuste a produção, responda a falhas e reconfigure a distribuição de energia de forma autônoma, maximizando a eficiência e a resiliência do sistema.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração de técnicas avançadas de Inteligência Artificial com sistemas de energia eólica representa um caminho promissor para o desenvolvimento eficiente e sustentável do setor. A revisão da literatura confirmou que os avanços em deep learning e machine learning são eficazes para endereçar os principais desafios operacionais da fonte eólica: a variabilidade (através da previsão de potência) e a confiabilidade (através do monitoramento de condição e detecção de falhas).

A análise dos dados de sistemas SCADA por algoritmos inteligentes potencializa a manutenção preditiva, aumentando a segurança e a longevidade dos equipamentos e reduzindo custos operacionais. Quando integrados a redes

inteligentes, esses sistemas permitem uma gestão automatizada e responsiva da geração.

Apesar dos avanços, desafios persistem, como a necessidade de grandes volumes de dados de alta qualidade para treinamento e a interpretabilidade de modelos "caixa-preta" (como redes neurais profundas). Contudo, a combinação de IA e monitoramento avançado é fundamental para fortalecer a infraestrutura energética frente à transição global, otimizando a produção inteligente e garantindo um futuro energético limpo e resiliente.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) por toda a infraestrutura de pesquisa disponibilizada e as agências de fomentos, CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro na realização das atividades.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA GOV. Energia eólica no Brasil alcança recordes de geração em novembro. 2024. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202412/energia-eolica-no-brasil-alcanca-recordes-de-geracao-em-novembro>.

Carneiro, T. C., Rocha, P. A., Carvalho, P. C., & Fernández-Ramírez, L. M. (2022). Ridge regression ensemble of machine learning models applied to solar and wind forecasting in Brazil and Spain. *Applied Energy*, 314, 118936.

CNN BRASIL. Novas fontes renováveis, como eólica e solar, vão ser 51% da geração de energia em 2028. 2 out. 2024. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/macroeconomia/novas-fontes-renovaveis-como-eolica-e-solar-vao-ser-51-da-geracao-de-energia-em-2028/>.

Hossain, M. A., Chakraborty, R. K., Elsayah, S., & Ryan, M. J. (2021). Very short-term forecasting of wind power generation using hybrid deep learning model. *Journal of Cleaner Production*, 296, 126564.

Zhu, Y., Zhu, C., Tan, J., Tan, Y., & Rao, L. (2022). Anomaly detection and condition monitoring of wind turbine gearbox based on LSTM-FS and transfer learning. *Renewable Energy*, 189, 90-103.