

REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE AS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E ROBÓTICA APLICADAS À ENERGIA EÓLICA OFFSHORE

1. INTRODUÇÃO

As diversas tecnologias de energia renovável têm escalado ao longo da última década grandes patamares em vista da transição energética que os países do mundo têm vivenciado (MITCHELL et al, 2022). Dentro desse contexto, a energia eólica offshore tem sido uma aliada fundamental para alavancar os processos de descarbonização de setores e intermediar o avanço das tecnologias de inteligência artificial e robótica no setor energético (RINALDI; THIES; JOHANNING, 2021).

A energia eólica offshore tem crescido de forma exponencial ao longo do tempo. No ano de 2023, o mundo alcançou 75 GW de potência instalada de eólicas offshore, mas ainda é necessário percorrer uma trajetória de novas instalações para aproveitar o potencial energético disponível no planeta, alavancando novas oportunidades para o combate às mudanças climáticas (GWEC, 2024). Por esse motivo, as tecnologias de Inteligência Artificial (IA) e robótica têm emergido, auxiliando o ganho de escalabilidade e, conseqüentemente, o crescimento dessa fonte.

Baseado na contextualização apresentada, a pergunta de pesquisa do trabalho é: “Quais as aplicações de Inteligência Artificial e Robótica para a indústria eólica offshore?”. O trabalho possui dois objetivos, sendo divididos em objetivo principal e objetivo secundário. Estes objetivos são: (i) Mapear as principais tecnologias de Inteligência Artificial e Robótica que estão sendo aplicadas nos Parques Eólicos Offshore ao redor do mundo; e (ii) Consolidar as aplicações práticas existentes apresentados no mercado e na literatura, evidenciando seu enquadramento para o contexto nacional.

A lacuna de pesquisa que este trabalho procura preencher se baseia nos trabalhos de Rinaldi, Thies e Johanning (2021) e Mitchell et al. (2022) que demonstram que as aplicações de Inteligência Artificial e Robótica para eólicas offshore precisam ser aprofundadas nos diferentes contextos de mercado, contemplando a necessidade de garantir redução de custos e otimização de processos para a sua implementação. Adicionalmente, os autores Rinaldi, Thies e Johanning (2021) e Noronha et al. (2023) acrescentam que é necessário investigar as soluções de IA e robótica aplicadas ao ecossistema de inovação e indústria 4.0 para garantir a escalabilidade e o desenvolvimento da tecnologia em mercados em desenvolvimento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os fundamentos apresentados foram extraídos das áreas científicas da *Engenharia, Tecnologia da Informação e Robótica*, visando ilustrar as principais referências direcionadoras para o atendimento do objetivo da pesquisa.

2.1. Inteligência Artificial e Robótica

A *Inteligência Artificial* (IA) apresenta-se como um campo de estudo nas áreas da ciência da computação e tecnologia da informação (WINSTON, 1984), e é conceitualmente como a extensão da inteligência humana por meio do uso de sistemas e computadores para o aprendizado, adaptação e autocorreção. Segundo as pesquisas seminais (VINUESA et al., 2020; VIJAYALAKSHMI et al., 2023), a IA pode auxiliar no combate às mudanças climáticas, fornecendo recursos que geram uma maior eficiência no processo ao evitar emissões de gases a atmosfera, criar uma cadeia produtiva menos poluente e até produzir energia renovável. Na

mesma perspectiva, a Robótica trata-se do segmento tecnológico que abarca a utilização da mecânica, eletrônica e computação (CAMPOS, 2019). A IA e as tecnologias de robótica têm auxiliado em diversas temáticas quando tratamos da Energia Eólica Offshore, dentre essas temáticas estão: *Previsibilidade de Ventos*, *Manutenção Preventiva*, *Configuração das Turbinas*, *Conservação da Vida Marinha*, *Redes Elétricas Inteligentes*, *Automação de Sistemas e Otimização de Layouts de Projetos*. Essas aplicações estão descritas sumariamente nos parágrafos abaixo desta fundamentação teórica.

2.2. Temáticas de Inteligência Artificial e Robótica e as Eólicas Offshore

Para que as eólicas offshore possam apresentar uma maior escalabilidade, uma das temáticas que envolve Inteligência Artificial (IA) e que é utilizada ao redor do mundo é a: *Previsibilidade de ventos*. A previsibilidade de vento é uma área que busca aferir a variável estocástica do vento em diversos horizontes com vistas a obter a melhor forma de lidar com a intermitência da fonte eólica, bem como garantir o melhor controle do ativo (PAULA et al., 2020).

Outro campo que vem apresentando destaque quando tratamos de tecnologias de IA e Robótica aplicadas ao setor eólico offshore são as diversas técnicas de *Manutenção Preventiva* dos empreendimentos, visando a redução de custos de Operação e Manutenção (O&M) e maximizando o potencial de utilização do recurso energético dos parques. A *Manutenção Preventiva* trata-se da atividade de monitoramento contínuo com o intuito de identificar de forma antecipada a necessidade de possíveis reparos e manutenção dos parques (SANTOS et al., 2015).

A IA pode ser utilizada como suporte na área de *Configuração de Turbinas* eólicas offshore. A *Configuração de Turbinas* é compreendida como uma área que busca melhorar o desempenho dos parques eólicos com o melhor arranjo das turbinas de forma a aproveitar de maneira eficaz o recurso energético de determinada região.

Os sistemas de IA têm auxiliado em iniciativas para a melhor *Conservação da vida Marinha*, das aves e das condições oceânicas. No caso da vida marinha, sistemas de sensoriamento remoto são utilizados para o monitoramento das condições ambientais. Nesse sentido, técnicas de IA avançadas como o *IForest* são utilizadas para a detecção de anomalias e comportamentos não comuns nos oceanos, viabilizando ações antecipadas por parte do empreendedor. Já no que diz respeito ao monitoramento das aves, diversos sistemas de IA têm sido amplamente utilizados para a detecção de pássaros por meio de distintos sistemas de monitoramento (SALKANOVIC et al., 2020).

As *Redes Elétricas Inteligentes* estão sendo cada vez mais aplicadas em novas modelagens dos Sistemas Elétricos de Potência. Nesse meio, diversas técnicas de IA são exploradas na literatura para que seja possível: (i) prever o consumo necessário por parte da população; (ii) prever o despacho de potência dos parques eólicos offshore na rede elétrica; e (iii) permitir modelagem matemática mais precisa para uma melhor otimização das redes elétricas inteligentes. Todas essas vertentes apresentadas permitem com que ocorra um melhor controle das elétricas inteligentes integradas aos parques eólicos offshore.

A utilização de sensores viabiliza a obtenção de diversos dados de componentes das turbinas eólicas, como a temperatura e as vibrações de todo o arcabouço dos parques eólicos offshore como um todo. As técnicas de sensoriamento e IA permitem com que haja previsibilidade, segurança e controle ao longo das atividades de Operação e Manutenção (O&M) dos parques eólicos offshore. Uma das tendências futuras de estudos nesse campo é a prestação de suporte adequado às atividades de O&M dos parques eólicos, seja por meio de sistemas de sensoriamento ou IA (CHATTERJEE et al., 2021).

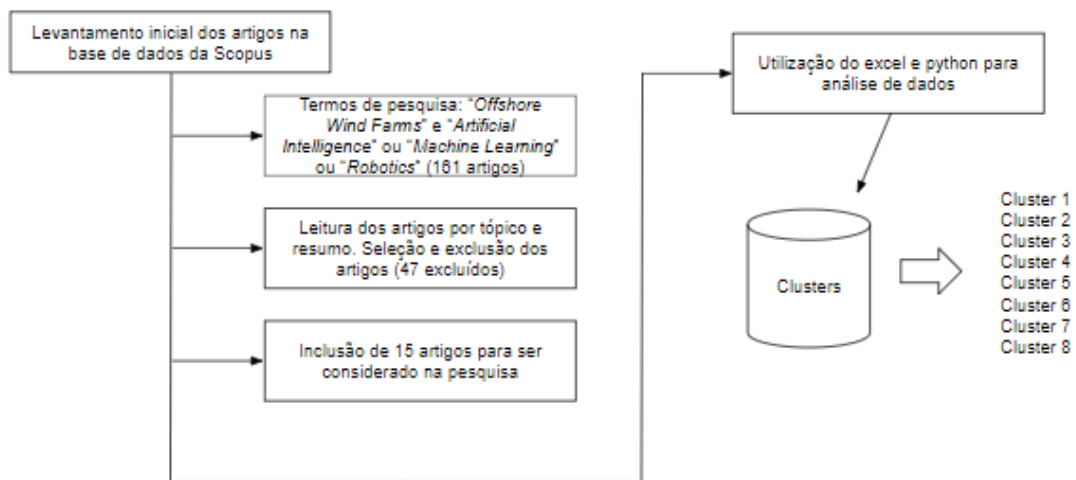
A *Automação de Sistemas* por meio de robótica pode ser definida na literatura como o uso de robôs e demais tecnologias automatizadas pertinentes para a execução de tarefas que no meio comum são realizadas por seres humanos. Neste sentido, os sistemas autônomos de robótica são considerados agregações complexas (robôs) que estão sujeitas a mudanças de comportamentos, a partir de eventos e situações durante o seu processo de funcionamento (WATSON et al., 2005). Estes sistemas autônomos de robótica são utilizados na indústria de eólicas offshore para diversos fins, tais como: planejamento de novas usinas, inspeção de usinas, operação e manutenção, integração de ativos, melhoria na produção e descomissionamento de parques (MITCHELL et al., 2022)

A *Criação e Otimização de Layouts dos Projetos* no setor de eólicas offshore, tem como objetivo principal descobrir a melhor posição dos aerogeradores para que seja possível aproveitar de forma maximizada o recurso energético disponível nas regiões litorâneas (HOU et al., 2019). Nessa perspectiva, as aplicações de I.A. podem ser utilizadas para otimizar o layout dos projetos e dar suporte para a escolha final do arranjo a ser construído (LACKNER et al., 2007).

3. METODOLOGIA

A metodologia do trabalho consiste em um estudo bibliométrico e mapeamento dos artigos que possuem a temática dentro do campo de inteligência artificial e robótica aplicadas à Energia Eólica Offshore. O pipeline do trabalho é apresentado na Figura 1:

Figura 1: *Pipeline* do Trabalho.



Fonte: autores.

A metodologia do trabalho consiste em uma revisão sistemática da literatura a partir de uma base de dados da Scopus, em que foram utilizados os seguintes filtros para a coleta: “*Offshore Wind Farms*” e “*Artificial Intelligence*” ou “*Machine Learning*” ou “*Robotics*”. A base de dados com 161 artigos foi extraída em formato Excel e foram identificados artigos do período de 2009 até 2024. Em seguida, foram utilizados dois critérios para a exclusão de alguns artigos da base de dados, sendo eles: (i) artigos que não possuem relação com a temática estudada; e (ii) artigos que não foram publicados em revistas científicas (e.g. capítulos de livros, congressos e conferências).

Posteriormente, foram incluídos 15 artigos que possuem muita relevância na temática estudada, onde a base de dados da Scopus acabou não filtrando esses materiais. Por fim, foi

realizada uma etapa de análise dos dados para que possamos ter um overview de todo o mapeamento dos trabalhos publicados, sendo as seguintes análises realizadas: (i) análise de citações e quantidade de publicações por ano; (ii) ranking dos 5 artigos mais citados; (iii) ranking das 5 revistas com mais publicações e respectivas citações; (iv) ranking dos 5 autores mais citados; (v) nuvem de palavras com os assuntos mais abordados nos títulos dos artigos; e (vi) clusters com os principais artigos identificados e sua respectiva tecnologia.

Esse estudo estatístico das publicações é relevante, pois permite com que pesquisadores observem quais são os campos mais relevantes para realização de pesquisas e o que pode vir a ser estudado no futuro.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Primeiramente, foi realizada uma análise de citações e quantidade de publicações nos últimos anos. A Figura 2 adiante apresenta os dois gráficos obtidos em que se utilizou a biblioteca *Seaborn* do Python para a geração das imagens.

Figura 2: [Publicações de artigos por ano e citações por ano](#) - Fonte: Autores

A partir da figura 2, fica evidente que as publicações de trabalhos relacionados a I.A. e robótica aplicados a Energia Eólica Offshore foram muito crescentes especialmente nos últimos anos (período de 2019 a 2023).

Já no que diz respeito ao número de citações por ano, é evidente uma grande relevância dos trabalhos publicados no ano de 2021 com um total de 39,2 % das citações referentes a base de dados.

A segunda análise realizada diz respeito aos 5 artigos mais citados da base de dados. A tabela 1 demonstra os resultados obtidos.

Tabela 1: [Ranking dos 5 artigos mais citados](#) - Fonte: Autores

Os 5 artigos mais citados correspondem a 38,5% das citações da base de dados e, portanto, possuíram uma grande relevância dada a quantidade total de 129 artigos da base de dados. Percebe-se que nesse ranking de cinco artigos, três deles são do ano de 2021 que foi o ano onde ocorreram mais publicações (vide Figura 3). Todas as temáticas abordadas no Referencial Teórico possuem correlação direta com os cinco artigos mais citados da base de dados estudada.

Outra análise relevante de ser feita são as cinco revistas que ocorreram mais publicações ao longo do período de 2009 até 2024. Vejamos a Tabela 2 adiante.

Tabela 2: [Ranking das cinco revistas com mais publicações e número de citações](#) - Fonte: Autores

As revistas em que houve a maior quantidade de publicação de trabalhos correspondem a 12,9% da quantidade de citações da base de dados.

A tabela 3, elenca os cinco autores com os maiores números de citações.

Tabela 3: [Ranking dos cinco autores mais citados](#) - Fonte: Autores

Ademais, foi realizada uma nuvem de palavras com auxílio da biblioteca *WordCloud* do Python para a identificação das principais temáticas em que os artigos trataram. A figura 3 demonstra o resultado obtido.

Figura 3: [Nuvem de palavras com os títulos dos artigos](#) - Fonte: Autores

Os termos circulados em vermelho validam que a base de dados apresentou todas as aplicabilidades da I.A e robótica dentro da área de estudo das eólicas offshore.

A tabela 4 adiante demonstra o termo circulado e em qual seção abordada no Referencial Teórico o termo enquadrado se aplica.

Tabela 4: [Termos das nuvens de palavras e aplicabilidade](#) - Fonte: Autores

Adicionalmente, para responder à pergunta geral da pesquisa e atender o objetivo, foi realizada a tabela 5 abaixo que retrata os artigos mais relevantes da base de dados, a tecnologia principal de cada campo, o autor (ano) e a devida justificativa para o cluster.

Tabela 5: [Mapeamento dos principais artigos da base de dados, sua respectiva tecnologia e aplicação](#) - Fonte: Autores

Por fim, com relação ao objetivo específico foi realizada a Figura 4 que representa as etapas ao longo do desenvolvimento dos parques eólicos offshore ao redor do mundo, bem como as aplicações de I.A. e robótica que podem ser aplicadas com fins de enquadramento no cenário nacional.

Figura 4: [Etapas ao longo do desenvolvimento dos parques eólicos offshore](#) - Fonte: Autores

Conforme visto na figura 4, é possível observar que todos os clusters obtidos na tabela 5 possuem enquadramento ao longo das etapas de desenvolvimento dos parques eólicos offshore.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral do trabalho foi realizar o mapeamento da principal tecnologia de I.A. e robótica que está sendo aplicada dentro do contexto das eólicas offshore. Esse objetivo foi cumprido por meio da figura 3 e das tabelas 4 e 5. Já o objetivo específico foi atendido a partir da figura 5. Com relação a pergunta principal da pesquisa, as justificativas das aplicações foram expressamente respondidas na tabela 5 a partir da sumarização dos artigos mais relevantes contidos na base de dados.

As contribuições científicas que o artigo apresenta para os pesquisadores são diversas, dentre as quais podemos elencar: O mapeamento das principais revistas que existem publicações sobre a temática de aplicações de I.A. e robótica no campo da energia eólica offshore (tabela 2); as principais tendências de tecnologias de I.A. e robótica aplicadas à energia eólica offshore ao redor do mundo (tabela 5); e mapeamento dos artigos mais relevantes sobre as aplicações de I.A. e robótica no contexto das eólicas offshore (tabela 1). Por outro lado, a contribuição prática apresenta que foi possível sumarizar de forma objetiva as principais tecnologias de I.A. e robótica que podem ser aplicadas em cada uma das etapas ao longo do desenvolvimento dos projetos eólicos offshore, conforme apresentado na Figura 4.

Como sugestão para pesquisas futuras, evidenciou-se que é necessário a realização de uma análise aprofundada com metodologias bibliométricas de literatura sobre cada principal tecnologia que foi identificada na Tabela 5.

6. REFERÊNCIAS

- CAMPOS, Flávio Rodrigues. A robótica para uso educacional. BOD GmbH DE, 2019
- CHATTERJEE, Joyjit; DETHLEFS, Nina. Scientometric review of artificial intelligence for operations & maintenance of wind turbines: The past, present and future. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, p. 111051, 2021.
- HOU, Peng et al. A review of offshore wind farm layout optimization and electrical system design methods. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, v. 7, n. 5, p. 975-986, 2019.
- LACKNER, Matthew A.; ELKINTON, Christopher N. An analytical framework for offshore wind farm layout optimization. **Wind Engineering**, v. 31, n. 1, p. 17-31, 2007.
- MITCHELL, D., Blanche, J., Harper, S., Lim, T., Gupta, R., Zaki, O., ... & Flynn, D. (2022). A review: Challenges and opportunities for artificial intelligence and robotics in the offshore wind sector. *Energy and AI*, 8, 100146
- NORONHA, Matheus et al. O papel do ecossistema de inovação e a estruturação de um arcabouço regulatório para o mercado de energia eólica offshore no Brasil. *International Journal of Business and Marketing*, v. 6, n. 2, p. 32-51, 2021.
- PAULA, Matheus et al. Predicting long-term wind speed in wind farms of northeast Brazil: A comparative analysis through machine learning models. *IEEE Latin America Transactions*, v. 18, n. 11, p. 2011-2018, 2020.
- RINALDI, Giovanni; THIES, Philipp R.; JOHANNING, Lars. Current status and future trends in the operation and maintenance of offshore wind turbines: A review. **Energies**, v. 14, n. 9, p. 2484, 2021.
- SACIE, Montserrat et al. Use of state-of-art machine learning technologies for forecasting offshore wind speed, wave and misalignment to improve wind turbine performance. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 7, p. 938, 2022.
- SALKANOVIĆ, Eldina; ENEVOLDSEN, Peter; XYDIS, George. Applying AI-Based Solutions to Avoid Bird Collisions at Wind Parks. In: **Complementary Resources for Tomorrow: Proceedings of Energy & Resources for Tomorrow 2019, University of Windsor, Canada**. Springer International Publishing, 2020. p. 111-124.
- SANTOS, F. P.; TEIXEIRA, A. P.; GUEDES SOARES, C. An age-based preventive maintenance for offshore wind turbines. **Safety and reliability: methodology and applications**, p. 1147-1155, 2015.
- VIJAYALAKSHMI, S. et al. The role of artificial intelligence in renewable energy. In: *AI-Powered IoT in the Energy Industry: Digital Technology and Sustainable Energy Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 253-269.
- VINUESA, Ricardo et al. The role of artificial intelligence in achieving the Sustainable Development Goals. *Nature communications*, v. 11, n. 1, p. 1-10, 2020.
- WATSON, David P.; SCHEIDT, David H. Autonomous systems. **Johns Hopkins APL technical digest**, v. 26, n. 4, p. 368-376, 2005.
- WINSTON, Patrick Henry. Artificial intelligence. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1984