

# A CONTRIBUIÇÃO DA MANUTENÇÃO PREDITIVA PARA A OPERAÇÃO SUSTENTÁVEL E O AUMENTO DA VIDA ÚTIL DE AEROGERADORES EM PARQUES EÓLICOS: UMA REVISÃO DE LITERATURA

## 1 INTRODUÇÃO

O cenário da transição energética global impulsiona um crescimento sem precedentes no setor de energias renováveis, com a energia eólica assumindo um papel central na matriz elétrica de diversos países. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), as adições de capacidade eólica superam os 100 GW anuais, o que transforma a gestão de ativos e a operação e manutenção dos parques eólicos em desafios críticos para garantir a eficiência operacional e uma operação sustentável no longo prazo. A complexidade dos aerogeradores, aliada à sua localização frequentemente remota e sua suscetibilidade aos fatores ambientais inerentes da sua operação, torna as estratégias de manutenção tradicionais, como a corretiva e a preventiva baseada no tempo, insuficientes e custosas, gerando paradas não programadas e perdas de receita (WIND EUROPE, 2022).

Neste contexto, a manutenção preditiva (*Condition-Based Maintenance* - CBM) emerge como uma solução promissora para o gerenciamento de ativos complexos como os aerogeradores (WANG et al., 2019). Ao invés de intervir com base em cronogramas ou após a falha ocorrer, a CBM utiliza dados de sensores e algoritmos em tempo real para prever a degradação de componentes, permitindo que as ações de manutenção sejam planejadas no momento ideal e baseadas na condição do ativo.

Apesar da ampla literatura sobre manutenção preditiva e sustentabilidade, a integração desses conceitos no campo da operação de parques eólicos ainda carece de uma consolidação acadêmica. Além disso, a relevância crescente das estratégias de operação e manutenção em longo prazo, considerando a transição de garantia para responsabilidade dos operadores, destaca a necessidade de um estudo que consolide as práticas mais eficazes para garantir a confiabilidade dos ativos em operação (JARDINE; LIN; BANJEREE, 2006).

Portanto, o presente artigo científico propõe uma revisão de literatura para sistematizar e analisar o conhecimento sobre como a manutenção preditiva e os sistemas de monitoramento de condição (CMS) impactam a operação sustentável e a longevidade dos aerogeradores. O trabalho também busca consolidar a relação entre inovação tecnológica, eficiência operacional e práticas ambientais, fornecendo uma base teórica sólida que pode guiar futuras pesquisas e a tomada de decisão no setor.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A base teórica deste trabalho se sustenta em pilares que formam o arcabouço para a compreensão da contribuição da manutenção preditiva na operação de parques eólicos, a saber: a Manutenção Preditiva e Sistemas de Monitoramento de Condição (CMS), a sustentabilidade e a eficiência operacional dos aerogeradores.

Desta forma, é possível avaliar, em termos acadêmicos, a importância que tem sido dada a este assunto. Uma pesquisa foi realizada, a partir das palavras-chaves definidas, no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) de modo a quantificar a oportunidade do trabalho como justificativa de um tema inovador e concentrador de diferentes áreas de estudo. Considerou-se como resultado apenas os periódicos revisados por pares. Dessa forma, pode-se mensurar a partir do que se tem publicado até agosto de 2025 e analisar os trabalhos realizados.

Tabela 1 - Publicações no Portal de Periódicos da CAPES de acordo com a Palavra-Chave

<b>Palavras-chave</b>	<b>Publicações internacionais</b>	<b>Publicações nacionais</b>
Manutenção Preditiva	15.510	315
Aerogeradores	64.170	766
Sustentabilidade	921.104	45.399
Manutenção Preditiva E Aerogeradores	299	5
Manutenção Preditiva E Sustentabilidade	402	11
Aerogeradores E Sustentabilidade	2.122	47
Manutenção Preditiva E Aerogeradores E Sustentabilidade	8	0

Fonte: autor (2025).

Notoriamente, há uma grande repercussão na academia dos temas abordados neste trabalho. Contudo, quando integrados em uma mesma pesquisa, somente oito trabalhos internacionais foram encontrados, e nenhum publicado no Brasil.

De forma geral, os oito trabalhos destacam o papel central da Inteligência Artificial (IA) para a otimização dos sistemas de energia renovável. As pesquisas demonstram que a aplicação de algoritmos de Machine Learning em dados de sensores (IoT) não se limita à detecção de falhas, mas se estende à otimização da produção de energia, à extensão da vida útil dos componentes e à redução dos custos de manutenção, alinhando-se com os princípios da Indústria 4.0. Existe um consenso de que a transição de estratégias de manutenção reativa para preditiva é essencial para a viabilidade econômica e ambiental do setor eólico, especialmente com o aumento da complexidade dos ativos.

A partir da visão integrada, pode-se aprofundar em cada uma das palavras-chave de pesquisa para avaliar a visão específica da academia sobre cada área.

## 2.1 MANUTENÇÃO PREDITIVA E SISTEMAS DE MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO

A manutenção preditiva (CBM) representa uma evolução na gestão de ativos, cujo princípio fundamental é monitorar a condição dos equipamentos em tempo real para prever e prevenir a ocorrência de falhas. Segundo Jardine, Lin e Banerjee (2006), esta abordagem é especialmente valiosa em ativos críticos e de alto valor, pois permite a identificação precoce da degradação de componentes, reduzindo o tempo de inatividade e os custos de reparo. Em aerogeradores, a CBM pode ser automatizada por meio de Sistemas de Monitoramento de Condição (CMS), que utilizam uma variedade de sensores (vibração, temperatura, distância relativa etc.) para coletar dados contínuos. A análise desses dados permite diagnosticar anomalias antes que se manifestem como falhas, quando geralmente são encontradas em um estado mais avançado nas manutenções preventivas e/ou corretivas (MOBLEY, 2002).

Em um contexto mais amplo, o monitoramento da condição está inserido em uma das vertentes da gestão de ativos, conforme a norma ISO 55000 (ISO, 2014), que tem como foco maximizar o valor dos ativos físicos ao longo de seu ciclo de vida, integrando engenharia, finanças e operações. Neste sentido, o investimento em um CMS para o monitoramento de uma frota de ativos busca trazer retornos de eficiência operacional ao automatizar rotinas de manutenção e detectar anomalias precocemente (JARDINE; LIN; BANERJEE, 2006).

## 2.2 AEROGERADORES E A GESTÃO DE ATIVOS EÓLICOS

A natureza complexa e a operação descentralizada dos aerogeradores os tornam particularmente suscetíveis a falhas com consequências graves. A localização remota e a exposição a fatores ambientais extremos, como o estresse mecânico causado pelo vento, a

fadiga e as intempéries ambientais tornam as inspeções manuais dispendiosas e ineficientes. Falhas em componentes críticos, como rolamentos, caixas de engrenagens ou geradores, podem levar a paradas prolongadas e a custos de reparo elevados. Nesse cenário, devido à escala de ativos, as concessionárias de energia e fabricantes de aerogeradores buscam coletar a maior quantidade possível de dados em tempo real, isto é, permitir o monitoramento contínuo dos ativos eólicos para garantir a confiabilidade e a disponibilidade esperada (PANDIT et al., 2023).

A digitalização da manutenção, impulsionada pela Indústria 4.0, permite a detecção de padrões de falha complexos, otimizando as estratégias de manutenção e criando um novo paradigma conhecido como "Manutenção 4.0" (LUYER; BATAÏA, 2019). Tal movimento iniciou no ambiente industrial e tem sido aceito cada vez mais no setor de energias renováveis, especialmente o setor de geração eólica.

### 2.3 SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA OPERACIONAL

A sustentabilidade e a eficiência operacional em parques eólicos dependem criticamente da extensão da vida útil dos aerogeradores e da redução dos custos de operação e manutenção, fatores que impactam diretamente o *Levelized Cost of Energy* (LCOE). Estratégias como a extensão do ciclo de vida e o *repowering* (substituição por turbinas de maior capacidade sobre infraestrutura existente) têm se mostrado soluções relevantes para maximizar o retorno econômico e reduzir impactos ambientais. Um estudo sobre o parque London Array, por exemplo, demonstrou que a extensão da vida útil representaria uma economia de aproximadamente £2 bilhões em investimentos de capital, em comparação à construção de um novo empreendimento (WILSON; STAFFELL; CARRUTH, 2021).

Além disso, a maximização da disponibilidade operacional, especialmente em ambientes offshore, onde a manutenção pode representar até 60% do custo operacional, é apontada como um dos principais desafios para a sustentabilidade da energia eólica (WANG; ZHANG; ZHOU, 2024). Nesse sentido, práticas de monitoramento da integridade estrutural, controle da fadiga, mitigação da corrosão e avaliação contínua da confiabilidade são destacadas na literatura como essenciais para prolongar a operação dos aerogeradores além do prazo originalmente projetado, reduzindo custos e evitando impactos ambientais associados ao descarte prematuro de equipamentos (WILSON; STAFFELL; CARRUTH, 2021).

## 3 METODOLOGIA

O presente estudo adota uma abordagem de pesquisa bibliográfica exploratória, com a metodologia de revisão de literatura estruturada. Essa abordagem permite mapear e sintetizar o conhecimento existente sobre os temas de manutenção preditiva, sustentabilidade operacional e gestão de ativos no contexto da energia eólica.

Os critérios de inclusão e exclusão levam em consideração à análise e filtragem de artigos, teses, dissertações e relatórios que abordem a aplicação da manutenção preditiva em aerogeradores, seus impactos na sustentabilidade e na vida útil dos ativos. A análise dos textos foi feita por meio de uma análise de conteúdo, permitindo a síntese dos principais achados, a identificação de tendências, lacunas na literatura e a construção de uma base de conhecimento consolidada sobre o tema.

Os resultados apontaram que, embora haja grande volume de publicações em cada termo isoladamente (por exemplo, mais de 921 mil artigos internacionais sobre sustentabilidade), a convergência dos três conceitos resultou em apenas oito publicações internacionais e nenhuma nacional, evidenciando uma lacuna acadêmica significativa.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos artigos selecionados revela um avanço significativo na aplicação da manutenção preditiva para a operação de parques eólicos, com um claro alinhamento com a sustentabilidade e a extensão da vida útil dos ativos, mesmo que não explícito. No entanto, a literatura ainda se mostra fragmentada em termos de objetivos, com poucos estudos que abordam de forma integrada todos os aspectos da pesquisa. A presente seção discute os achados, as implicações e as lacunas identificadas.

### 4.1 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DA REVISÃO DE LITERATURA

Os artigos analisados demonstram uma forte tendência na utilização de dados de sistemas de monitoramento (CMS) e do *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA) para a detecção de falhas e a otimização da manutenção. O trabalho de Pandit et al. (2023), por exemplo, revisa diversas técnicas e corrobora a eficácia do uso de dados para o monitoramento de componentes críticos. Jankauskas et al. (2023), por sua vez, apresentam um estudo de caso prático que valida o potencial da CBM ao utilizar redes neurais para detectar anomalias de temperatura em caixas de engrenagens com até 37 dias de antecedência, uma janela de tempo valiosa para o planejamento.

O estudo de Frederiksen et al. (2024) traz uma contribuição metodológica de grande relevância ao propor uma forma de avaliar a relação entre a eficiência de um modelo preditivo e os custos de manutenção a curto prazo. Os autores concluem que a manutenção preditiva é economicamente viável quando o custo de parada é alto, mas alertam que, em cenários com subsídios ou custos de interrupção menores, as estratégias preventivas tradicionais podem se mostrar mais eficientes a curto prazo. Isso sugere que a justificativa para a implementação da CBM é altamente dependente das variáveis de custo de cada operação.

A relação entre a manutenção preditiva e a sustentabilidade é um ponto central em diversos trabalhos. Pereira et al. (2025) e Bello et al. (2024), através de análises bibliométricas, mostram a crescente interconexão entre os temas, mas também apontam uma lacuna na produção acadêmica no continente americano. Isso indica que, embora a relevância do tema seja global, a sua aplicação e pesquisa ainda são concentradas em outras regiões, reforçando a pertinência do presente estudo no contexto brasileiro.

Ainda sobre a sustentabilidade, o trabalho de Uhanto et al. (2024) reforça a ideia de que a manutenção preditiva não apenas reduz custos, mas também contribui para uma economia circular ao prolongar a vida útil dos componentes e minimizar o descarte. A comparação entre aerogeradores e sistemas fotovoltaicos demonstra que, embora as complexidades operacionais sejam diferentes, a aplicação da CBM é benéfica para a eficiência e longevidade de ambos, o que reforça o valor da abordagem integrada e tecnológica.

Por fim, a adoção de manutenção preditiva baseada em monitoramento contínuo e análise de dados surge como uma convergência entre eficiência operacional e sustentabilidade. Estudos recentes ressaltam o papel dos dados de SCADA, tradicionalmente coletados a cada dez, embora sua baixa granularidade limite a precisão prognóstica em componentes críticos (KIM; YOON; JANG, 2023). Por isso, abordagens complementares, como a análise de vibração e sensores dedicados, têm sido incorporadas para aumentar a confiabilidade dos diagnósticos em caixas de engrenagens e rolamentos. Avanços em modelos de *machine learning* e *deep learning* têm permitido estimar a vida útil remanescente (*Remaining Useful Life – RUL*) com elevada precisão, alcançando margens de erro reduzidas mesmo em falhas complexas (ZHAO et al., 2024). Além disso, pesquisas qualitativas com engenheiros de parques eólicos apontam para o potencial dos gêmeos digitais, da integração com sistemas SCADA e da utilização de

grandes volumes de dados para otimizar processos de manutenção, apesar de desafios como falsos positivos e dificuldades em turbinas legadas (LI et al., 2025). A implementação efetiva dessas tecnologias contribui para minimizar paradas não programadas, reduzir custos de manutenção, prolongar o tempo médio entre falhas (MTBF) e, conseqüentemente, reforçar a sustentabilidade e a viabilidade econômica da geração eólica (WANG; ZHANG; ZHOU, 2024).

## 4.2 CONEXÃO COM A LITERATURA E A RELEVÂNCIA DO ESTUDO

As descobertas dos artigos analisados estão alinhadas com os objetivos iniciais deste, confirmando a hipótese de que a manutenção preditiva é uma estratégia eficaz e alinhada com as operações sustentáveis. A literatura revisada destaca que a CBM, viabilizada pela Indústria 4.0 e pelo uso de dados de sensores (IoT), é um pilar para a otimização de ativos eólicos (JARDINE; LIN; BANJERJEE, 2006). A contribuição dos artigos para a área é significativa, pois eles detalham as métricas e os modelos (Frederiksen et al., 2024), validam a eficácia da detecção de falhas com antecedência (Jankauskas et al., 2023) e mapeiam o crescimento da pesquisa na área (Pereira et al., 2025).

## 4.3 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A principal limitação deste estudo é o caráter de revisão de literatura. Embora a análise de dados secundários e a interpretação de resultados de outros estudos seja uma metodologia válida e robusta, a falta de dados primários traz uma limitação para uma aplicação direta.

Com base na revisão de literatura, sugere-se o seguinte direcionamento para pesquisas futuras:

- Modelos de Custo e Viabilidade a Longo Prazo: Expandir a metodologia de Frederiksen et al. (2024) para incluir uma análise de custo-benefício a longo prazo, considerando os efeitos cumulativos da manutenção preditiva na vida útil e no valor do ativo.
- Integração de Dados Multivariados: Aprofundar o uso de dados de diferentes fontes (SCADA, dados de clima, imagens de drone) para criar modelos preditivos ainda mais precisos e confiáveis, conforme discutido em Zhou et al. (2024).
- Frameworks Integrados de Manutenção: Desenvolver e validar frameworks que combinem as eficiências preditivas com estratégias de logística e gestão de ativos, preenchendo a lacuna identificada por Pereira et al. (2025), especialmente em um contexto específico, como o do Brasil.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo consolida a relação intrínseca entre a manutenção preditiva e a sustentabilidade operacional de parques eólicos do ponto de vista da academia. De forma geral, estudos paralelos indicam que a CBM e o CMS são ferramentas cruciais para a longevidade dos aerogeradores e para a eficiência na produção de energia limpa. Essa abordagem não só otimiza os custos, mas também contribui significativamente para a sustentabilidade, ao estender a vida útil dos componentes e reduzir o descarte e o desperdício de recursos de maneira precipitada.

A pesquisa reforça o papel da inovação tecnológica na otimização de operações sustentáveis, destacando a importância de uma abordagem integrada que considera os benefícios da manutenção preditiva sob as perspectivas técnica, econômica e ambiental. A CBM contribui para a economia circular ao maximizar a vida útil dos ativos e minimizar o descarte, reafirmando seu papel como um pilar central para a sustentabilidade da indústria de energias renováveis.

## REFERÊNCIAS

- ASSAF NETO, A. *Finanças Corporativas e Valor*. São Paulo: Atlas, 2012.
- BELLO, S. F. et al. AI-driven predictive maintenance and optimization of renewable energy systems for enhanced operational efficiency and longevity. *International Journal of Science and Research Archive*, v. 13, n. 01, p. 2823-2837, 2024.
- CHOPRA, S.; MEINDL, P. *Supply Chain Management*. Boston: Pearson, 2016.
- CHRISTOPHER, M. *Logistics and Supply Chain Management*. Harlow: Pearson UK, 2016.
- FREDERIKSEN, R. D. et al. Cost-Effectiveness of Predictive Maintenance for Offshore Wind Farms: A Case Study. *Energies*, v. 17, n. 13, p. 3147, 2024.
- GITMAN, L. J.; ZUTTER, C. J. *Princípios de Administração Financeira*. São Paulo: Pearson, 2010.
- IEA. *World Energy Outlook 2023*. Paris: IEA, 2023.
- ISO. *ISO 55000: Asset management*. Geneva: ISO, 2014.
- KIM, H.; YOON, J.; JANG, S. Predictive maintenance of wind turbines using SCADA data and machine learning models. *Energies*, v. 16, n. 4, p. 1654, 2023.
- JANKAUSKAS, M. et al. Exploring the Limits of Early Predictive Maintenance in Wind Turbines Applying an Anomaly Detection Technique. *Sensors*, v. 23, n. 12, p. 5695, 2023.
- JARDINE, A. K. S.; LIN, D.; BANJERJEE, A. A review on machinery diagnostics and prognostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 20, n. 7, p. 1483-1510, 2006.
- LEE, J. et al. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, v. 16, p. 3–8, 2015.
- LUYER, M.; BATAÏA, O. Maintenance 4.0: Smart and predictive maintenance in the era of Industry 4.0. *Procedia CIRP*, v. 81, p. 1035-1040, 2019.
- MOBLEY, R. K. *An Introduction to Predictive Maintenance*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.
- PANDIT, R. K.; ASTOLFI, D.; DURAZO CARDENAS, I. A Review of Predictive Techniques Used to Support Decision Making for Maintenance Operations of Wind Turbines. *Energies*, v. 16, n. 4, p. 1654, 2023.
- PEREIRA, D. A. M. et al. Predictive Maintenance and Smart Sensors Aiming Sustainability: A Perspective From a Bibliometric Analysis. *Procedia Computer Science*, v. 252, p. 81-89, 2025.
- UHANTO, U. et al. Predictive Maintenance with Machine Learning: A Comparative Analysis of Wind Turbines and PV Power Plants. *Heca Journal of Applied Sciences*, v. 2, n. 2, 2024.
- WANG, L.; DING, Y.; LI, X.; ZHAO, Q. A review of condition monitoring techniques for wind turbine fault diagnosis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 110, p. 493-512, 2019.
- WANG, Y.; ZHANG, T.; ZHOU, D. Operation and maintenance cost optimization in offshore wind power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 193, p. 113162, 2024.
- WILSON, D.; STAFFELL, I.; CARRUTH, M. Extending the lifetime of wind farms: environmental and economic implications. *Energies*, v. 14, n. 7, p. 1936, 2021.
- WIND EUROPE. *Wind Energy in Europe: Key trends and statistics 2022*. Brussels: WindEurope, 2022.
- ZHOU, X. et al. Sustainable Operation and Maintenance of Offshore Wind Farms Based on the Deep Wind Forecasting. *Sustainability*, v. 16, n. 1, p. 333, 2024.
- ZHAO, L. et al. Deep learning-based prognostics for wind turbine gearboxes under variable operating conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 71, n. 8, p. 8765–8776, 2024.