



ARTIGOS

ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO PARA EQUIPAMENTOS ELEVATÓRIOS: ABORDAGENS, MÉTODOS E INDICADORES

MAINTENANCE STRATEGIES FOR LIFTING EQUIPMENT: APPROACHES, METHODS, AND INDICATORS

Maristella Trindade da Silva
maristella-trindade@hotmail.com
Graduanda em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Goiás (UFG). Goiânia - GO - BR.

Lie Yamanaka
lie@ufg.br
Doutora em Engenharia de Produção pela Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos com Estágio Doutoral na Silesian University of Technology - SUT (Polônia). Professora de Engenharia de Produção da UFG. Aparecida de Goiânia - GO - BR.

Nelson Dias da Costa Júnior
nelson.junior@ufg.br
Mestre em Engenharia de Produção pela UFG. Professor do Curso de Engenharia de Produção da UFG. Aparecida de Goiânia - GO - BR.

Cynara Mendonça Moreira Tinoco
cynara.mendonca@ufg.br
Doutora em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2017). Pós Doutora na Universidade de Aveiro (Portugal) em Lean Healthcare. Atualmente é professora do magistério superior da UFG. Goiânia - GO - BR.

Diogo de Souza Rabelo
diogo.rabelo@ufmt.br
Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia. Professor Adjunto da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), atuando no curso de graduação em Engenharia de Controle e Automação. Cuiabá - MT - BR.

RESUMO

A manutenção de equipamentos representa uma tarefa estratégica essencial para assegurar a confiabilidade, a disponibilidade e a eficiência operacional dos ativos. Nesse sentido, este trabalho objetivou identificar os métodos de manutenção mais eficazes para equipamentos elevatórios, considerando diferentes abordagens e indicadores. Foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), com critérios de seleção sistematizados pelo PRISMA e com aplicação do método de análise de conteúdo. O conteúdo foi organizado por tipos de manutenção, metodologias e indicadores mais frequentes nos estudos. Entre as metodologias mais frequentemente mencionadas estão o Lean Manufacturing, o Six Sigma, a Internet das Coisas (IoT) e a Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM). Os resultados evidenciaram a maior eficácia da manutenção preditiva em confiabilidade e disponibilidade, especialmente ao combiná-la com tecnologias como IoT e Análise de Componentes Principais (PCA). Métodos baseados em inspeções técnicas e avaliação de risco destacaram-se na promoção da segurança. Abordagens Lean/Lean Six Sigma mostraram-se eficazes na redução de custos e na otimização de processos. Como contribuição prática, verifica-se que a aplicação integrada dessas metodologias pode potencializar a performance dos equipamentos elevatórios.

Palavras-chave: revisão sistemática; performance; manutenção preditiva; gêmeos digitais.

ABSTRACT

The maintenance of equipment represents a strategic and essential task to ensure the reliability, availability, and operational efficiency

of assets. This study aimed to identify the most effective maintenance methods for lifting equipment, considering different approaches and performance indicators. A Systematic Literature Review (SLR), guided by the PRISMA protocol and supported by content analysis, structured the research. The findings were organized based on maintenance types, methodologies, and frequently used indicators. Lean Manufacturing, Six Sigma, the Internet of Things (IoT), and Reliability-Centered Maintenance (RCM) were among the most frequently cited methodologies. The results demonstrated the enhanced effectiveness of predictive maintenance in terms of reliability and availability, especially when integrated with technologies such as IoT and Principal Component Analysis (PCA). Methods based on technical inspections and risk assessment were particularly effective in enhancing safety. Lean and Lean Six Sigma approaches proved effective in reducing cost and optimizing processes. It is concluded that the integrated application of these methodologies can enhance the performance of lifting equipment.

Keywords: systematic review; performance; predictive maintenance; digital twins.

1 INTRODUÇÃO

A manutenção de equipamentos representa uma tarefa estratégica essencial para assegurar a confiabilidade, a disponibilidade e a eficiência operacional dos ativos. Percebida antigamente como um custo reativo, hoje se tornou um pilar fundamental na gestão de ativos e na estratégia competitiva das organizações modernas (Kardec; Nascif, 2019). Uma gestão de manutenção eficaz não apenas previne falhas inesperadas e paralisações onerosas, como também impacta, diretamente, a segurança de trabalhadores e usuários, a qualidade de produtos e serviços, e a pressão exercida pelo mercado por produtos de menor custo. Isso impulsionou a busca por soluções

mais eficientes (Abdelillah *et al.*, 2023). Assim, abordar a manutenção como uma questão estratégica é indispensável para qualquer empresa que almeje a excelência operacional e a longevidade.

A relevância da manutenção estratégica é amplificada ao considerar o seu impacto financeiro significativo sobre o ciclo de vida dos equipamentos. Conforme dados apresentados por Kardec e Nascif (2019), os custos de manutenção podem representar entre 65% e 75% do custo total do ciclo de vida de um ativo. Diante desse cenário de alta criticidade e custo, os conceitos e as metodologias de manutenção passaram por uma evolução notável. O campo progrediu de abordagens reativas, como a manutenção corretiva (que intervém apenas após a falha), para estratégias mais proativas. A manutenção preventiva, baseada em inspeções programadas, e a manutenção preditiva, que utiliza o monitoramento contínuo para antecipar problemas, representaram os primeiros grandes avanços. Mais recentemente, impulsionada pela Indústria 4.0, surgiram abordagens inovadoras como a manutenção prescritiva. Essa metodologia representa um salto qualitativo, pois, além de prever a ocorrência de falhas, é capaz de recomendar as ações ideais a serem tomadas, otimizando a tomada de decisão por meio de inteligência artificial e análise de dados em tempo real (Giacotto; Marques; Martinetti, 2025). Essa evolução reflete a busca contínua por maior eficiência, segurança e otimização de recursos no ambiente industrial.

Em contextos operacionais de alta complexidade e risco intrínseco, como aqueles que envolvem equipamentos de elevação, a manutenção assume um caráter ainda mais crítico. Falhas nesses ativos não apenas geram interrupções onerosas, mas também podem comprometer, severamente, a segurança dos operadores e demais envolvidos, a integridade das cargas transportadas e a continuidade da produção. Diante dessa criticidade, a gestão da manutenção para equipamentos elevatórios exige a aplicação de métodos e tecnologias avançadas. Isso inclui o uso estratégico de dados

históricos de desempenho, a implementação de sensores para monitoramento em tempo real e a integração de tecnologias digitais que permitem prever o comportamento futuro dos equipamentos, otimizando o controle de sua operação e permitindo intervenções proativas e precisas.

Apesar da crescente atenção ao tema da manutenção inteligente e da evolução dos métodos de monitoramento, observa-se uma escassez de estudos sistemáticos que analisem, comparativamente, os métodos de manutenção aplicados especificamente a Equipamentos Elevatórios (EE). A maioria das pesquisas não trata exatamente de um estudo sistemático, mas de técnicas específicas e uso de tecnologias emergentes. Por exemplo, Kesek, Bogacz e Migza (2019) aplica metodologias de gestão e de manutenção com foco em empresa mineradoras, apresentando casos em diferentes empresas do setor, assim como Wang *et al.* (2023), que utiliza metodologias de manutenção com foco no transporte ferroviário, envolvendo equipamentos de elevação de trens. Anastasi *et al.* (2018) faz uma proposta de uso de plataforma IoT para coordenar a inspeção e a manutenção de equipamentos elevatórios. Assim, poucos estudos abordam a eficácia das estratégias de manutenção à luz de critérios integrados, considerando diversos setores e tecnologias. Diante disso, este trabalho busca preencher essa lacuna ao oferecer uma visão comparativa abrangente das estratégias de manutenção para esses ativos críticos.

Diante desses desafios, torna-se necessário identificar e avaliar, de forma sistemática, os métodos de manutenção mais eficazes e adequados para equipamentos elevatórios, considerando critérios para sua avaliação. Com esse propósito, este trabalho propõe uma revisão sistemática da literatura que, além do objetivo geral de identificar os métodos mais eficazes aplicados a esses equipamentos, também busca mapear e categorizar as metodologias mais recorrentes nos estudos analisados, identificar os métodos que apresentam melhores resultados segundo

os critérios adotados e sistematizar os principais benefícios e limitações de cada abordagem, contribuindo para a tomada de decisão estratégica na gestão da manutenção industrial.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 FUNDAMENTOS DA MANUTENÇÃO

A manutenção é uma disciplina complexa e multifacetada, essencial para garantir que equipamentos, infraestruturas e sistemas continuem a desempenhar suas funções designadas com máxima confiabilidade, eficiência e segurança. Em sua essência, a manutenção visa não apenas prevenir a ocorrência de falhas, mas também corrigir, prontamente, quaisquer defeitos que surjam em máquinas e sistemas, assegurando que operem continuamente conforme as diretrizes e as especificações dos fabricantes. Contudo, sua função transcende o simples reparo reativo; a manutenção moderna concentra-se na implementação estratégica de ações preventivas, preditivas e corretivas, com o objetivo primordial de minimizar riscos operacionais, otimizar a disponibilidade dos ativos e maximizar a durabilidade e o ciclo de vida dos equipamentos (Senthil; Pandian, 2022). Essa abordagem proativa e integrada é crucial para a sustentabilidade e a competitividade das operações em qualquer setor.

Ao longo das décadas, diversas abordagens para a manutenção foram desenvolvidas, cada uma com objetivos e aplicações distintas, refletindo a crescente complexidade dos sistemas produtivos. A forma mais básica, a manutenção corretiva, é realizada apenas após a ocorrência da falha. Essa abordagem, embora aparentemente simples, é geralmente não planejada, levando a interrupções ab-ruptas na produção, perdas significativas de produtividade e custos elevados decorrentes da urgência do reparo e dos danos secundários que podem ocorrer (Anastasi *et al.*, 2018). Em contraste, a

manutenção preventiva representa um avanço estratégico, buscando evitar falhas por meio de inspeções e ações regulares, programadas com base em cronogramas fixos, recomendações do fabricante ou dados históricos de desempenho dos ativos.

Evoluindo ainda mais, a manutenção preditiva utiliza tecnologias avançadas de sensoriamento e monitoramento em tempo real para identificar indícios de desgaste ou falhas iminentes. Essa capacidade de antecipação permite intervenções específicas e eficientes antes que o componente falhe completamente, otimizando o tempo de vida útil e reduzindo o tempo de inatividade. Um desdobramento crucial da manutenção preditiva é a manutenção baseada na condição (CBM), que monitora o desempenho e o estado atual do equipamento para determinar a necessidade exata de intervenção, em vez de seguir um cronograma fixo.

A aplicação da Manutenção Baseada na Condição (CBM) tem se mostrado, particularmente, eficaz em diversos contextos práticos. Por exemplo, a técnica CBM tem sido comprovadamente aplicada em máquinas rotativas para otimizar a detecção de falhas e o planejamento de intervenções (Souza *et al.*, 2022). Este estudo específico utilizou o método de impedância eletromecânica para detectar falhas em eixos rotativos, evidenciando a capacidade de monitorar o desempenho em tempo real e prever necessidades de manutenção. Similarmente, no ambiente hospitalar, a CBM tem sido implementada em equipamentos críticos, como unidades centrais de ar-condicionado. Um exemplo notável é o sistema desenvolvido por Souza *et al.* (2022), que utilizou um microcontrolador Arduino e plataformas de monitoramento de código aberto para monitorar unidades de ar-condicionado em um hospital brasileiro, minimizando interrupções e custos com reparos emergenciais, e garantindo a continuidade operacional e a segurança dos pacientes. Tais exemplos práticos reforçam a versatilidade e o impacto positivo da CBM na gestão da manutenção, evidenciando sua adaptabilidade

a diferentes tipos de equipamentos e setores industriais.

Outras modalidades estratégicas incluem a manutenção baseada no risco, que dá prioridade à manutenção de ativos críticos com base na probabilidade e no impacto de suas falhas; e a manutenção proativa, focada em identificar e remover as causas raiz das falhas, prevenindo sua recorrência (Senthil; Pandian, 2022). Para uma gestão ainda mais refinada, os conceitos de manutenção planejada/agendada e não planejada são utilizados para categorizar a previsibilidade das intervenções. Por fim, o advento da Indústria 4.0 impulsionou o conceito de manutenção inteligente, conforme descrito por Senthil e Pandian (2022). Esta abordagem de ponta integra tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), *Machine Learning* e sistemas ciberfísicos, proporcionando uma gestão de ativos mais eficiente, precisa e, potencialmente, autônoma.

2.2 MÉTODOS E TECNOLOGIAS DE MANUTENÇÃO

Com o avanço exponencial da tecnologia e a crescente digitalização dos processos industriais, os métodos de manutenção baseados em dados se tornaram preponderantes, oferecendo uma capacidade analítica sem precedentes. A Análise de Componentes Principais (PCA), o *Machine Learning* (ML) e as Redes Neurais Artificiais (ANNs) são técnicas amplamente empregadas para aprimorar a previsão de falhas. Essas ferramentas utilizam dados históricos para identificar padrões complexos, reduzir a dimensionalidade de grandes bancos de dados de ordens de serviço e modelar o comportamento dos equipamentos, permitindo prever a degradação e a ocorrência de falhas com maior precisão (Wang *et al.*, 2023). Adicionalmente, Algoritmos de Aprendizado por Reforço (RLAs) têm sido aplicados em sistemas intrinsecamente complexos, como elevadores industriais e pontes rolantes, viabilizando uma detecção inteligente de falhas e a formulação

de respostas rápidas e otimizadas para correção (Senthil; Pandian, 2022).

A integração de metodologias de melhoria contínua, como o *Lean Six Sigma*, tem ganhado espaço significativo na gestão da manutenção. Operando, frequentemente, por meio da metodologia DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar), o *Lean Six Sigma* promove uma abordagem estruturada para a otimização de processos de manutenção. Seus princípios focam na padronização de procedimentos, na identificação e na eliminação das causas raiz de falhas, na redução da variabilidade e na busca incessante pela melhoria contínua da performance dos ativos (Braglia *et al.*, 2022). Dentro desse escopo, a Análise dos Modos de Falha e Efeitos (FMEA) é uma ferramenta essencial, especialmente durante a etapa de “análise” do DMAIC. A FMEA permite uma identificação sistemática, priorização e mitigação proativa de falhas potenciais em componentes e processos críticos, contribuindo, diretamente, para o aumento substancial da confiabilidade e da segurança operacional dos equipamentos (Braglia *et al.*, 2022).

Complementarmente às abordagens baseadas em dados e melhoria de processos, as inspeções e as verificações periódicas mantêm sua relevância e são frequentemente exigidas por normas técnicas e legislações específicas. Na Europa, por exemplo, a Diretiva de Máquinas 2006/42/EC estabelece requisitos mínimos de segurança para equipamentos, garantindo que operem em conformidade e minimizando riscos. Essas verificações abrangem análise documental rigorosa, realização de testes funcionais para validar o desempenho dos sistemas, auditorias detalhadas das práticas de manutenção e emissão de certificados e laudos técnicos que atestam a segurança e a conformidade do equipamento (Muratore *et al.*, 2021).

A gestão documental e a padronização de procedimentos são pilares fundamentais para a eficácia operacional da manutenção. A implementação de plataformas como os CMMS

(*Computerized Maintenance Management Systems*) ou soluções mais modernas baseadas em IoT, a exemplo do AIMS (*Asset Inspection Management System*), permite um controle abrangente e integrado do histórico de intervenções realizadas, o gerenciamento eficiente do estoque e consumo de peças, a emissão automatizada de alertas e a execução de auditorias de manutenção. Esses sistemas são cruciais para centralizar informações, otimizar fluxos de trabalho e proporcionar uma visão clara da saúde dos ativos (John, 2022). Paralelamente, a análise de criticidade é uma ferramenta vital utilizada para classificar os ativos de uma organização de acordo com o impacto potencial que uma falha pode gerar na operação. Essa classificação permite uma priorização mais racional e estratégica dos recursos de manutenção, direcionando esforços e investimentos para os equipamentos que representam maior risco ou maior impacto na produção (Senthil; Pandian, 2022). Consequentemente, a integração sinérgica entre a definição de critérios técnicos, a aplicação de métodos quantitativos e a adoção de tecnologias inovadoras representa a base para uma abordagem de manutenção verdadeiramente moderna, estratégica e orientada para resultados tangíveis.

2.3 CRITÉRIOS E INDICADORES DE DESEMPENHO NA MANUTENÇÃO

A definição e a aplicação de critérios e os métodos de manutenção são cruciais para assegurar que as ações sobre os equipamentos sejam não apenas eficazes e seguras, mas também economicamente viáveis. No campo da engenharia de manutenção, a análise RAM (*Reliability, Availability and Maintainability* – Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenibilidade) destaca-se como um dos pilares para avaliar o desempenho dos sistemas e identificar pontos críticos que demandam atenção prioritária (Senthil; Pandian, 2022). Essa análise é fundamental

para uma compreensão holística do ciclo de vida dos ativos.

A partir da análise RAM, uma série de indicadores-chave de desempenho (KPIs) é empregada para quantificar a eficácia das intervenções e o estado dos equipamentos. O MTBF (*Mean Time Between Failures* – Tempo Médio Entre Falhas) mede a confiabilidade de um sistema ou componente, indicando o tempo esperado de operação entre uma falha e a próxima. O MTTR (*Mean Time To Repair* – Tempo Médio Para Reparo) avalia a manutenibilidade, representando o tempo médio necessário para restaurar um equipamento à sua condição operacional após uma falha. Já o MTTF (*Mean Time To Failure* – Tempo Médio Até a Falha) é utilizado para componentes não reparáveis, indicando o tempo esperado até a primeira falha. Juntos, esses indicadores fornecem uma métrica robusta da confiabilidade e da eficiência das intervenções de manutenção (Rodríguez-Padial; Marín; Domingo, 2017).

A Eficiência Geral do Equipamento (OEE - *Overall Equipment Effectiveness*) é outra métrica amplamente adotada globalmente, que se destaca por proporcionar uma análise abrangente do desempenho global dos ativos. A OEE integra três fatores críticos: a disponibilidade (o tempo em que o equipamento está disponível para operação), o desempenho (a velocidade com que o equipamento opera em comparação com sua capacidade máxima) e a qualidade (a proporção de produtos bons produzidos em relação ao total). Essa métrica é particularmente valiosa na definição de prioridades para ações de manutenção, uma vez que sua otimização visa maximizar o aproveitamento produtivo dos equipamentos, identificando perdas em cada uma das três categorias (Senthil; Pandian, 2022).

Em ambientes com alto potencial de risco, a exemplo daqueles que operam com equipamentos elevatórios, a avaliação de risco emerge como um critério de manutenção de importância crítica. Ferramentas como a Matriz Consequência-Probabilidade, em conformidade com a norma ISO 31010, são instrumentais

no auxílio à definição da criticidade dos equipamentos. Essa matriz permite priorizar a alocação de recursos para manutenção preventiva ou corretiva, baseando-se em uma análise sistemática da severidade das consequências de uma falha e da probabilidade de sua ocorrência. Tais avaliações consideram múltiplos fatores, incluindo as condições operacionais específicas, o ambiente em que os equipamentos estão inseridos, o histórico de falhas pregressas e os possíveis impactos de uma eventual pane, tanto em termos de segurança quanto de perdas financeiras (Muratore *et al.*, 2021).

2.4 MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS ELEVATÓRIOS: ASPECTOS RELEVANTES

Equipamentos elevatórios são definidos como dispositivos mecânicos ou eletromecânicos projetados, especificamente, para a movimentação vertical de cargas e, em certas aplicações, de pessoas. Eles desempenham um papel essencial e multifacetado em uma vasta gama de setores, incluindo o industrial, o logístico, o hospitalar e o da construção civil. Conforme a literatura técnica especializada, essa categoria abrange uma ampla variedade de dispositivos, desde grandes guindastes e plataformas elevatórias móveis (MEWPs) até talhas elétricas e seus acessórios essenciais, como ganchos, lingas e cintas de elevação (Muratore *et al.*, 2021). A versatilidade operacional desses equipamentos é notável, permitindo seu emprego em ambientes de acesso restrito, na execução de obras em altura e em setores que demandam movimentação segura e precisa, como a infraestrutura hospitalar e as complexas instalações industriais.

A aplicação de equipamentos elevatórios é extremamente vasta, abrangendo desde a construção civil e a mineração até operações em portos, ferrovias, indústrias químicas, usinas e grandes depósitos logísticos. Nesses contextos, são ferramentas fundamentais para o transporte vertical eficiente de cargas de grande

volume ou peso, para o aprimoramento de linhas de montagem complexas e para o acesso seguro a estruturas elevadas. As propriedades operacionais inerentes a esses equipamentos incluem limitações rigorosas de capacidade de carga, a imperatividade de operação por pessoal devidamente capacitado e treinado, e a exigência de uma instalação segura para garantir a estabilidade e o funcionamento correto. Além disso, por sua natureza de risco, essas máquinas estão sujeitas à utilização e às normas de produção extremamente rigorosas.

A Diretiva de Máquinas 2006/42/EC da União Europeia, por exemplo, estabelece requisitos mínimos de segurança e saúde (MSR) fundamentais, que englobam desde a marcação CE de conformidade, até a garantia de resistência mecânica adequada, a exigência de documentação técnica completa, a minimização de ruído e a vibração durante a operação. Máquinas como guindastes de ponte, plataformas de mastro ascendente, guindastes de veículos e pórticos não só desempenham um papel crucial na automação da produção e no aumento da produtividade, mas também são vitais para permitir o acesso a partes inferiores de sistemas mecânicos, como os elevadores especializados utilizados na manutenção ferroviária (Wang *et al.*, 2023). Essa diversidade de máquinas sublinha a necessidade imperativa de que os equipamentos sejam não apenas duráveis e seguros, mas também plenamente compatíveis e adaptáveis a uma ampla gama de ambientes operacionais exigentes.

A manutenção de equipamentos elevatórios exige uma atenção redobrada e uma abordagem proativa, dada a natureza crítica de suas aplicações e o elevado potencial de risco em caso de falhas. Em função disso, a manutenção desses ativos transcende a mera conservação de seu funcionamento, estando intrinsecamente ligada à garantia da integridade física dos operadores e aos demais indivíduos no local de trabalho, bem como ao estrito cumprimento das exigências legais e normativas vigentes (Amosov, 2023). Essas atividades devem ser realizadas em conformidade com as orientações

técnicas específicas dos fabricantes e com as exigências regulatórias, tanto em âmbito nacional quanto internacional (Amosov, 2023).

Além disso, é crucial a confirmação da existência e a validade de documentos essenciais, como a marcação CE (Conformidade Europeia) e a Declaração de Conformidade, que atestam a adequação do equipamento às normas de segurança (Muratore *et al.*, 2021). A ausência ou a irregularidade de qualquer um desses requisitos pode e, frequentemente, resulta na imediata interdição da máquina, sublinhando o rigor necessário para a operação segura desses ativos.

A frequência das inspeções e das manutenções em equipamentos elevatórios não é uniforme, variando significativamente conforme o tipo de equipamento e a intensidade de seu uso. Nesse contexto, modelos de manutenção preventiva são não apenas amplamente recomendados pela indústria, mas em muitos casos, são expressamente exigidos por lei, reforçando a importância da antecipação de falhas.

No que tange ao suporte à gestão direta, sistemas informatizados desempenham um papel crucial. Os CMMS (*Computerized Maintenance Management Systems*) destacam-se por sua capacidade de rastrear ordens de serviço, controlar custos, registrar tempos de reparo (MTTR) e manter um histórico detalhado de todas as falhas e as intervenções. Além disso, plataformas como o AIMS (*Asset Inspection Management System*), quando integradas a sistemas de maior escopo como o EAM (*Enterprise Asset Management*) e o OMS (*Operations Management System*), possibilitam uma gestão digital unificada e abrangente de todos os ativos, seus documentos associados, registros de inspeções e intervenções de manutenção (John, 2022). Essa integração sistêmica promove uma visão holística e em tempo real da condição dos equipamentos elevatórios.

As tecnologias emergentes da Indústria 4.0, especialmente as plataformas fundamentadas na Internet das Coisas (IoT),

estão revolucionando a manutenção de equipamentos elevatórios. Essas plataformas possibilitam a gestão integral do ciclo de vida dos dispositivos, desde a coleta automática e contínua de informações operacionais por sensores até a análise de dados em nuvem e a integração com sistemas de decisão automatizados. Essa capacidade de monitoramento remoto em tempo real é crucial para identificar desvios e anomalias de forma precoce. Complementarmente, a aplicação de técnicas avançadas de mineração de dados, regras de associação e árvores de decisão permite detectar padrões habituais de falhas, como aqueles frequentemente vinculados a sistemas de proteção, controles elétricos e elementos estruturais, especialmente em equipamentos como guindastes e pontes rolantes (Yanbin *et al.*, 2023). Essa análise de padrões é vital para a implementação de estratégias preditivas eficazes.

Em suma, a manutenção de equipamentos elevatórios transcende a concepção tradicional de simples reparação de falhas. Ela se configura como um sistema complexo e bastante integrado de gestão, fundamentado em um tripé de critérios: técnicos rigorosos, normativos estritos e digitais inovadores. O objetivo central desse sistema é assegurar, de forma simultânea e robusta, a segurança dos operadores e do ambiente, a confiabilidade operacional dos ativos e o desempenho otimizado em ambientes de alta exigência e risco (Wang *et al.*, 2023). A interconexão desses elementos é a chave para a excelência na gestão de ativos elevatórios.

3 METODOLOGIA

O estudo adota o método de Revisão Sistemática da Literatura (RSL), abordagem rigorosa e estruturada que identifica, seleciona, avalia e sintetiza pesquisas relevantes sobre um tema específico (Conforto; Amaral; Silva, 2011). A RSL permite responder à pergunta sobre a pesquisa com fundamentação objetiva, o que reduz incertezas e garante maior transparência no processo investigativo.

Para as etapas da pesquisa, foi utilizado o método proposto por Thomé, Scavarda e Scavarda (2016):

- a) definir o problema e os critérios de inclusão e exclusão;
 - b) realizar buscas nas bases de dados;
 - c) selecionar e organizar os estudos;
 - d) avaliar a qualidade metodológica;
 - e) analisar e resumir os dados;
 - f) interpretar os resultados;
 - g) apresentar conforme o protocolo PRISMA (2020) e;
 - h) recomendar futuras atualizações.
- Essa abordagem assegura a confiabilidade na construção do conhecimento sobre os métodos de manutenção de equipamentos elevatórios.

A pergunta de pesquisa que norteou o estudo foi: “quais são os métodos de manutenção mais eficazes para equipamentos elevatórios, levando em conta aspectos como segurança, custo, confiabilidade e disponibilidade?”. Para obter atualidade na revisão realizada, adotou-se como o primeiro critério incluir publicações dos últimos 10 anos (entre os anos de 2015 e 2025). Além disso, outro critério de inclusão foram os artigos que abordassem métodos de manutenção de equipamentos elevatórios com foco na gestão. Os critérios de exclusão foram trabalhos que tratassem apenas de segurança, sem relação com manutenção, ou com artigos puramente técnicos, sem aspectos de gestão.

As buscas foram realizadas nas plataformas *Web of Science* e *Scopus*. A escolha dessas bases se justifica por sua ampla abrangência e reconhecimento científico nas áreas de Engenharia e Gestão. Além disso, ambas utilizam critérios rigorosos de classificação dos periódicos indexados, como o *Journal Citation Reports* (JCR) e o *Scimago Journal Rank* (SJR).

Para a busca, foram utilizadas as palavras-chave: “*elevator equipment*”, “*lifting equipment*”, “*maintenance*”, “*maintenance methods*” e “*OEE*”. A última busca, realizada

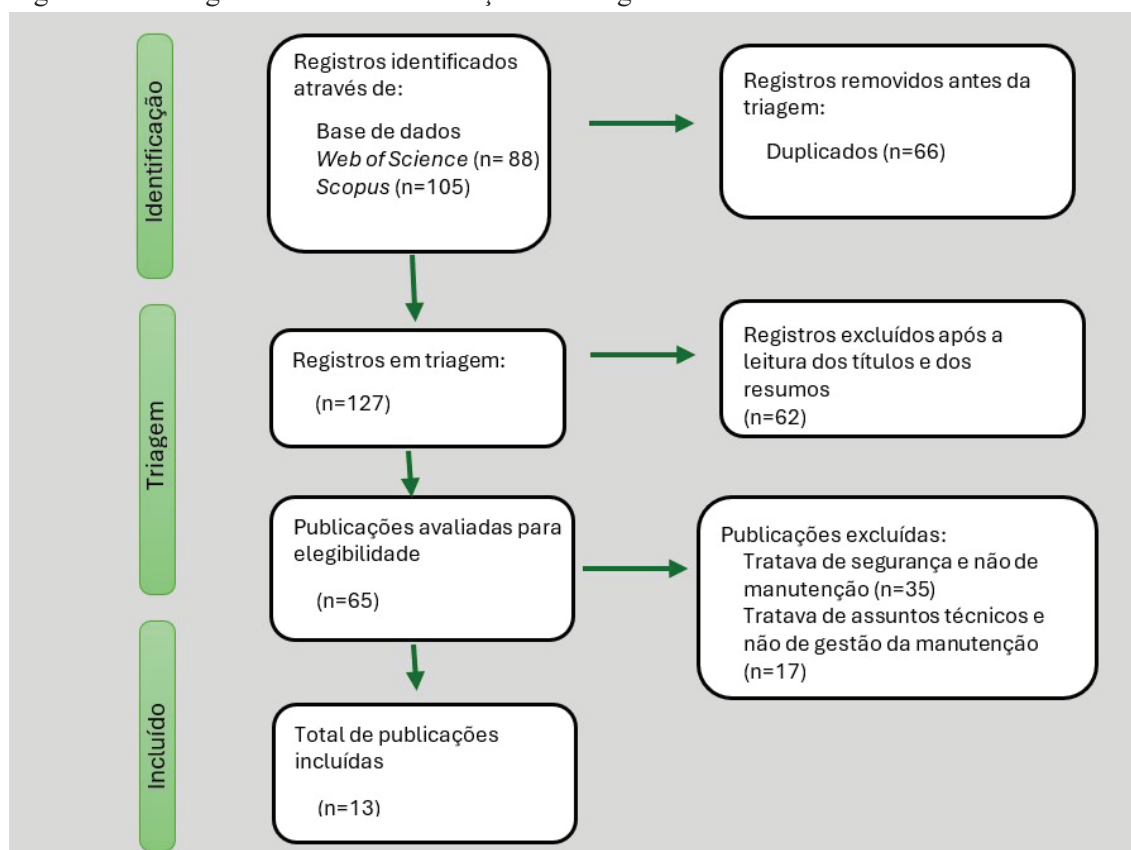
em 31 de março de 2025, resultou em 193 artigos, dos quais 66 eram duplicados e foram removidos.

A triagem foi realizada por meio da leitura dos títulos e dos resumos dos artigos, sendo excluídos aqueles que não tratavam diretamente do tema manutenção de equipamentos elevatórios. Restaram 65 artigos selecionados para leitura completa, nos quais foram aplicados os seguintes critérios de exclusão:

- o artigo não abordava diretamente a manutenção dos equipamentos, dedicando-se, exclusivamente, à segurança do equipamento;
- o artigo não tratava da gestão da manutenção, focando apenas aspectos puramente técnicos do equipamento.

Após triagem, 13 artigos atenderam aos critérios e foram incluídos no estudo. O processo de seleção seguiu o fluxograma PRISMA, apresentado na figura 1, que ilustra, visualmente, as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão (Page *et al.*, 2021).

Figura 1 – Fluxograma PRISMA de seleção dos artigos



Fonte: elaborado pelos autores com base em Page *et al.* (2021).

Para a análise dos artigos selecionados, aplicamos a análise de conteúdo, que interpreta sistemática e quantitativamente textos, combinando categorias pré-definidas (dedutivas) com categorias emergentes (indutivas), o que permite uma síntese clara e estruturada dos dados (Thomé; Scavarda; Scavarda 2016). Foram realizadas revisões cruzadas para assegurar a confiabilidade e a consistência da codificação. A triagem dos artigos contou com o auxílio do software *Rayyan*, o que garantiu transparência, acompanhamento e reprodução, os quais foram organizados cronologicamente no quadro 1.

Quadro 1 – Artigos selecionados para análise

Nº	AUTOR(ES)	TÍTULO	ANO
1	Dominic Dawson	<i>The Report of Thorough Examination as a Management Tool for Maintenance</i>	2016
2	Néstor Rodríguez-Padial, Marta Marín, Rosario Domingo	<i>An Approach to Integrating Tactical Decision-Making in Industrial Maintenance Balance Scorecards Using Principal Components Analysis and Machine Learning</i>	2017
3	Sara Anastasi, Luigi Monica, Maria Grazia Gnoni, Valerio Elia, Stefano Parisi	<i>Coordinating inspection activities at hazardous equipment through an IOT platform</i>	2018
4	Marek Kęsek, Paweł Bogacz, Marcin Migza	<i>The application of Lean Management and Six Sigma tools in global mining enterprises</i>	2019
5	Shibu John	<i>Asset Inspection Management System as a Reliable Inspection / Monitoring Tool to Optimize the Asset Utilization & Serviceability and to Enhance Overall Efficiency of Service Provision</i>	2020
6	Dmitry Topchiy, Alexey Yurgaytis, Vitaly Chernigov, Vyacheslav Bolgov, Alexandr Gorochov	<i>Testing of load-carrying elements of elevating equipment while reconstruction transport facilities</i>	2020
7	Antonino Muratore, Giuseppe Gianneli, Vincenzo Nastasi, Giuseppe Sferruzza, Giovanni Grillone	<i>Index Method for Risk Assessment Using Load Lifting (Crane) and People Lifting (MEWP) Equipment</i>	2021
8	Marcello Braglia, Marco Frosolini, Roberto Gabbrielli, Leonardo Marrazzini	<i>Application of Lean Six Sigma techniques to the management and maintenance of special lifting equipment</i>	2022
9	Alexey Amosov	<i>Influence of the chemical composition of the load-carrying equipment material on its performance</i>	2023
10	Chandran Senthil, Ranjitharamasamy Sudhakara Pandian	<i>Proactive Maintenance Model Using Reinforcement Learning Algorithm in Rubber Industry</i>	2023
11	Xu Yanbin, Zhang Jianhua, Xiongwei Wang, Mohammad Shabaz, Mohd Wazih Ahmad, Samrat Ray	<i>Research on optimization of crane fault predictive control system based on data mining</i>	2023
12	Zhaozong Wang, Jiangfeng Cheng, Weiran Liu, Xiaofu Zou, Fei Tao	<i>A Fault Localization Approach Based on Multisystem-PCA and Dynamic-SDG: Application in Train Lifting Equipment</i>	2023
13	Ga, aleldin Farag, Marwan Hilal	<i>Value Stream Mapping as A Sustainable Lean Production Tool to Improve the Production Process Organization</i>	2024

Fonte: elaborado pelos autores com base nos artigos selecionados.

A meta-síntese qualitativa foi empregada para identificar temas frequentes e comparar estudos de forma organizada e padronizada (Thomé; Scavarda; Scavarda, 2016). A análise de conteúdo incluiu a classificação das informações contidas no texto do artigo, quanto ao tipo de equipamentos, métodos e mesologias empregados e indicadores aplicados. Os dados foram organizados em planilha eletrônica, com a elaboração de tabelas e gráficos com uso do software *Microsoft Excel*, conforme apresentado a seguir.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise sistemática dos 13 artigos selecionados permitiu identificar diferentes métodos e estratégias de manutenção aplicados a equipamentos elevatórios, bem como os critérios e os indicadores mais utilizados para avaliação de sua eficácia. A diversidade de abordagens e tecnologias avaliadas proporciona compreensão dos avanços de mercado e seu impacto na gestão estratégica de ativos e redução de custos.

Os resultados foram organizados para evidenciar os tipos de manutenção, metodologias e indicadores de avaliação mais frequentes e eficazes. O quadro 2 sumariza a classificação dos artigos analisados quanto ao tipo de equipamento, manutenção, método e indicadores, conforme evidenciado na RSL.

Quadro 2 – Classificação quanto ao tipo de equipamento, manutenção, método e indicadores

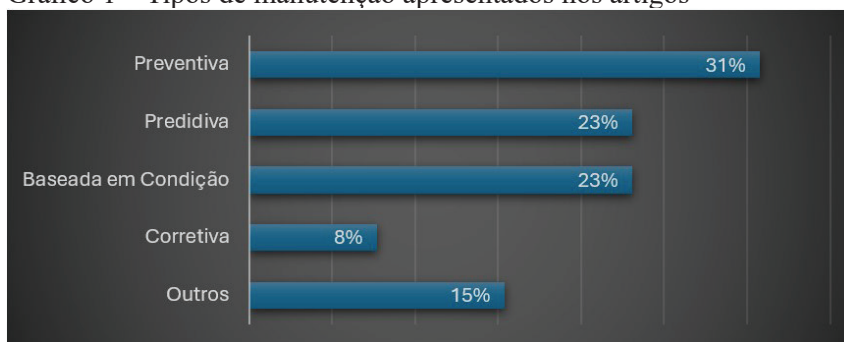
Nº	Tipo de equipamento	Tipo de manutenção	Método	Indicadores
1	Equipamentos de Elevação Diversos	Corretiva e preventiva com uso de relatório técnico	Relatório de Inspeção (<i>Thorough Examination</i>)	Histórico de manutenção, conformidade, falhas registradas
2	Equipamento Industrial (Genérico)	Tática e preditiva	PCA, <i>Machine Learning</i>	OEE, tempo de inatividade, desempenho da manutenção
3	Equipamentos de movimentação e elevação de cargas	Preditiva	Plataforma IoT	Coordenação de inspeção, dados em tempo
4	Equipamentos de processamento de minério	TPM integrada ao <i>Lean Six Sigma</i>	DMAIC e ferramentas	Tempo médio entre falhas (MTBF), Tempo médio para reparo (MTTR), produtividade
5	<i>Lifting Equipment</i>	Preventiva, preditiva, baseada em condição	OEE, análise de criticidade, rastreamento por CMMS/AIMS	OEE, disponibilidade, tempo médio entre falhas (MTBF)
6	Correntes de Elevação (Slings)	Baseada na confiabilidade	Espectrometria de emissão, testes de resistência e confiabilidade	Frequência de falhas, resistência do material
7	Guindastes e Plataformas Elevatórias (MEWP)	Baseada no risco e conectividade IoT	Plataforma IoT, smart label, software web	Rastreabilidade, registro de manutenção, conformidade regulatória
8	<i>Special Lifting Equipment</i>	Corretiva e preventiva com DMAIC	DMAIC, mapeamento de processo, Pareto, auditorias de manutenção	Eficiência operacional, conformidade, redução de riscos
9	Equipamentos Industriais em Geral	Preditiva com apoio de IA	PCA, <i>Machine Learning</i> , <i>scorecards</i> táticos	OEE, desempenho da manutenção, tempo de inatividade
10	Equipamento Industrial / Mecânico Geral	Pró-ativa com aprendizado por reforço	<i>Reinforcement Learning</i> , modelo de decisão de Markov, análise de disponibilidade	OEE, disponibilidade, tempo entre falhas (MTBF)

11	Guindastes (Crane Systems)	Preditiva e preventiva	Data mining, árvores de decisão, regras de associação	Frequência de falhas por categoria, precisão de detecção
12	Equipamentos de Elevação de Trem (TLE)	Preditiva	Relatório de Inspeção (<i>Thorough Examination</i>)	Histórico de manutenção, conformidade, falhas registradas
13	Equipamento Industrial em Geral	Relacionada à melhoria de eficiência	<i>Value Stream Mapping</i> (VSM), indicadores OEE	OEE, consumo de energia, produtividade

Fonte: elaborado pelos autores com base nos artigos selecionados.

Observamos a prevalência de cinco tipos principais de manutenção nos artigos: preventiva, preditiva, baseada em condição, corretiva e outros, apresentado no gráfico 1. A manutenção preventiva é a mais utilizada. A manutenção corretiva apresentou a menor frequência, o que corrobora a desvantagem dessa abordagem reativa em termos de paralisações e custos.

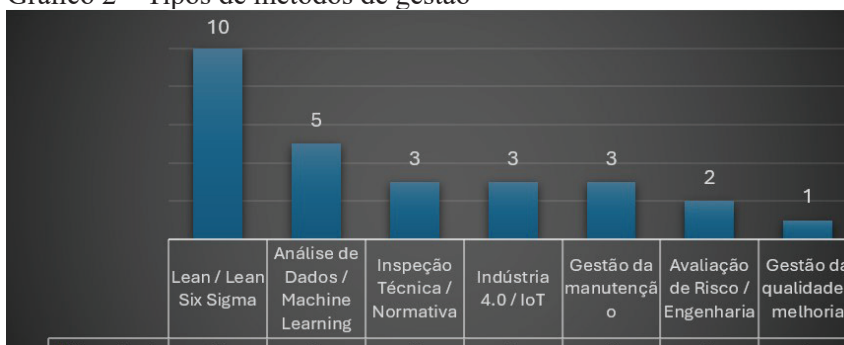
Gráfico 1 – Tipos de manutenção apresentados nos artigos



Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados analisados.

Em relação às metodologias, conforme gráfico 2, o *Lean Manufacturing* (*Lean*) e *Lean Six Sigma* surgiram como as mais frequentes, citadas em quase 50% dos artigos, devido à sua eficácia na melhoria do desempenho e na minimização de desperdícios (Farag *et al.*, 2024). Metodologias da Indústria 4.0/IoT mostram crescimento significativo para aumentar a quantidade de indústrias “inteligentes”.

Gráfico 2 – Tipos de métodos de gestão



Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados analisados.

Quanto aos indicadores de medição apresentados na figura 2, a confiabilidade de equipamentos foi priorizada por muitos autores para avaliar o sucesso da manutenção, tendo a frequência de sete ocorrências. Diante disso, com a análise dos artigos, isso expõe que a confiabilidade é um critério amplamente valorizado nas estratégias de manutenção de equipamentos elevatórios. Mesmo quando não mencionada diretamente como prioridade, ela orienta decisões em diferentes níveis, como a definição da criticidade de ativos, a escolha por métodos baseados em condição e preditivos, e a necessidade de testes estruturais (Topchiy *et al.*, 2020). Além disso, está presente na adoção de tecnologias, como PCA e IoT, que busca manter a operação confiável com menor intervenção.

Repara-se que, além da confiabilidade, o custo se destaca como indicador crítico no processo decisório sobre os métodos de manutenção. Demonstra que a redução de custos de manutenção é amplamente priorizada, especialmente por meio de metodologias como *Lean* e *Lean Six Sigma*, que visam eliminar desperdícios e otimizar recursos (Kesek; Bogacz; Migza 2019). Essa ênfase não busca apenas economia imediata, mas também eficiência operacional sustentável, integrando a redução de custos com ganhos em qualidade, produtividade e desempenho dos ativos. Assim, o custo é tratado de forma estratégica, alinhado à confiabilidade e à disponibilidade.

Logo, a figura a seguir apresenta a frequência de utilização dos principais indicadores de medição identificados nos artigos analisados:

Figura 2 – Indicadores de medição



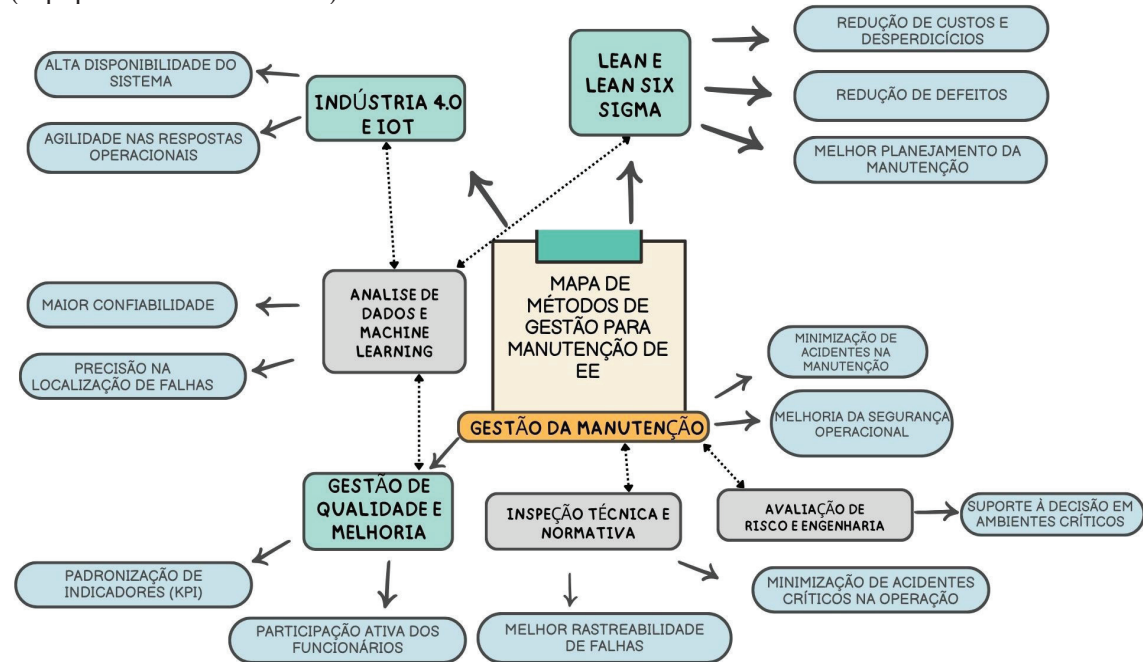
Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados analisados.

A análise e a síntese dos benefícios das metodologias de gestão da produção alinhadas à manutenção são cruciais para auxiliar gestores na tomada de decisão sobre qual método ou enfoque é mais adequado. Esses estudos revelaram um forte alinhamento com objetivos de eficiência operacional e eliminação de desperdícios, impulsionados, principalmente, por ferramentas como DMAIC, VSM (*Value Stream Mapping*), Kaizen e TPM (*Total Productive Maintenance*). Contudo, apesar dos ganhos significativos, também foram identificadas limitações importantes, como a resistência cultural à mudança, os altos custos de implementação e a carência de Tecnologia da Informação (TI) adequada. Esses desafios explicam por que, mesmo sendo metodologias recorrentes, sua aplicação exige maturidade organizacional e apoio estratégico consistente.

A figura 3, apresentada abaixo, sintetiza o mapa de análise dos benefícios dos métodos de gestão e manutenção para Equipamentos Elevatórios (EE). Ela ilustra as interconexões entre as principais metodologias e os benefícios diretos ou indiretos que proporcionam. Este mapa

evidencia visualmente como cada abordagem contribui para objetivos específicos de manutenção, tais como a redução de custos e desperdícios, a melhoria da segurança operacional e o aumento da confiabilidade e da disponibilidade do sistema.

Figura 3 – Mapa de análise dos benefícios dos métodos de gestão e manutenção para EE (Equipamentos Elevatórios)



Fonte: autora com base nos artigos analisados.

Desse modo, o *Lean/Lean Six Sigma* demonstra ser a metodologia mais empregada, trazendo benefícios como a redução de custos e desperdícios, redução de defeitos e um melhor planejamento da manutenção. A Indústria 4.0 / IoT emerge como uma alternativa promissora, pois sensores conectados permitem monitoramento remoto em tempo real, o que reduz falhas e aumenta a agilidade nas respostas operacionais e a alta disponibilidade do sistema. No entanto, sua implementação exige alto investimento em infraestrutura tecnológica, integração com sistemas legados e capacitação de pessoal.

A Análise de Dados / *Machine Learning* contribui para maior confiabilidade e precisão na localização de falhas. A Inspeção Técnica / Normativa foca na minimização de acidentes críticos na operação e na melhor rastreabilidade de falhas. A Gestão da Manutenção geral visa a melhoria da segurança operacional e a minimização de acidentes. A Avaliação de Risco / Engenharia oferece suporte à decisão em ambientes críticos e minimiza acidentes críticos na operação. Por fim, a Gestão de Qualidade / Melhoria busca a padronização de indicadores (KPIs) e a participação ativa dos funcionários.

Entre os métodos estudados, a manutenção preditiva associada a tecnologias como PCA, *Machine Learning*, IoT e *Scorecards* Táticos revelou-se a mais promissora em termos de confiabilidade e disponibilidade. Sua capacidade de detectar anomalias antes de falhas permite antecipar reparos, reduzir tempo de inatividade (*downtime*) e melhorar o desempenho operacional (Rodríguez-Padial; Marín; Domingo, 2017; Anastasi *et al.*, 2018; John, 2022; Amosov, 2023; Senthil; Pandian, 2022).

Para a segurança, métodos de inspeção técnica baseados em normas (como o relatório *Thorough Examination*) e a avaliação de risco por matriz de consequência-probabilidade foram os mais eficazes. Eles contribuíram para a rastreabilidade de falhas e prevenção de acidentes, especialmente em guindastes e plataformas elevatórias. Contudo, a conformidade normativa isolada não elimina totalmente os riscos, o que indica a necessidade de abordagens complementares (Muratore *et al.*, 2021).

As metodologias *Lean* e *Lean Six Sigma* foram eficazes na redução de custos operacionais e eliminação de desperdícios (Kesek; Bogacz; Migza, 2019; Braglia *et al.*, 2022; Yanbin *et al.*, 2023; Farag *et al.*, 2024). Sua eficácia foi maior quando combinadas com outras estratégias, reforçando a importância da abordagem integrada.

Apesar dos avanços, a análise evidenciou lacunas na literatura, como a baixa integração entre gestão da qualidade, métodos preditivos e tecnologias da Indústria 4.0. A pouca adoção de controles preditivos avançados em setores regulados e a quase ausência de abordagens para pequenas e médias empresas também foram notáveis.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando critérios de segurança, custo, confiabilidade e disponibilidade, por meio de uma revisão sistemática da literatura.

Constatamos que a manutenção preditiva, especialmente ao aliar-se a tecnologias emergentes como IoT, *Machine Learning* e PCA, demonstra maior eficácia em termos de confiabilidade e disponibilidade (Rodríguez-Padial; Marín; Domingo, 2017). Para a segurança, métodos baseados em inspeções normativas e avaliação de risco são mais robustos. Em relação ao custo, as abordagens *Lean* e *Lean Six Sigma* apresentam resultados positivos, reduzindo desperdícios e otimizando recursos. A aplicação integrada dessas metodologias potencializa a performance dos equipamentos elevatórios.

A principal contribuição deste estudo reside na sistematização e na comparação das metodologias de manutenção para equipamentos elevatórios, tema ainda pouco explorado de forma abrangente na literatura. Este trabalho oferece uma base comparativa valiosa para gestores e profissionais, apoiando decisões informadas e teóricas sobre estratégias de manutenção.

Como limitação, destacamos que a pesquisa se baseou, prioritariamente, em artigos científicos de bases específicas, o que pode ter restringido o alcance a periódicos bastante especializados. O recorte temporal e a ausência de estudos de caso práticos em ambientes industriais reais representam lacunas na literatura.

Para futuras pesquisas, sugerimos a realização de estudos de caso em empresas que operam com equipamentos elevatórios, para validar, empiricamente, os achados. Investigar a viabilidade de tecnologias como manutenção prescritiva e gêmeos digitais nesse contexto, bem como os desafios de implementação em pequenas e médias empresas também se mostram relevantes. Essas ações aproximam a teoria da realidade industrial, promovendo soluções inovadoras, seguras e sustentáveis para a gestão de ativos críticos. Esta pesquisa analisou os métodos de manutenção mais eficazes para equipamentos elevatórios.

REFERÊNCIAS

ABDELILLAH, F. M. *et al.* Predictive Maintenance Approaches in Industry 4.0: a Systematic Literature Review. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENABLING TECHNOLOGIES: INFRASTRUCTURE FOR COLLABORATIVE ENTERPRISES (WETICE), 2023, Paris, France. **Anais eletrônicos** [...]. Paris, France: IEEE, 2023. p. 1-6. DOI: 10.1109/WETICE57085.2023.10477842.

AMOSOV, Alexey. Influence of the chemical composition of the load-carrying equipment material on its performance. **E3S Web of**

Conferences, [s. l.], v. 402, 10035, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340210035>. Acesso em: 19 abr. 2025.

ANASTASI, Sara *et al.* Coordinating inspection activities at hazardous equipment through an IOT platform. *In: SUMMER SCHOOL “FRANCESCO TURCO” – INDUSTRIAL SYSTEMS ENGINEERING*, 23., 2018, Palermo, Italy. **Proceedings** [...]. Palermo, Italy: [s. n.], 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/327744568>. Acesso em: 19 abr. 2025.

BRAGLIA, Marcello *et al.* Application of Lean Six Sigma techniques to the management and maintenance of special lifting equipment. *In: LEVA, Maria Chiara et al. (ed.). Proceedings of the 32nd European Safety and Reliability Conference – ESREL 2022*. Singapore: Research Publishing, 2022. p. 2710-2717. Disponível em: https://doi.org/10.3850/978-981-18-5183-4_S18-04-309-cd. Acesso em: 19 abr. 2025.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. da. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO - CNGDP*, 8., 2011. **Anais** [...]. [S. l.: s. n.], 2011. p. 1-12.

DAWSON, Dominic. The report of thorough examination as a management tool for maintenance. *In: SYMPOSIUM ON LIFT & ESCALATOR TECHNOLOGIES*, 6., 2016, Birmingham. **Proceedings** [...]. Birmingham: Zurich Engineering, 2016. Disponível em: <https://www.liftsymposium.org>. Acesso em: 19 maio 2025.

FARAG, Gamaleldin *et al.* Value stream mapping as a sustainable lean production tool to improve the production process organization. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATION AND TECHNOLOGICAL*

ADVANCES FOR SUSTAINABILITY – ITAS 2023, 2023, Doha. **Anais** [...]. Boca Raton: CRC Press, 2024. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/384014387>. Acesso em: 19 abr. 2025.

GIACOTTO, A.; MARQUES, H. C.; MARTINETTI, A. Prescriptive maintenance: a comprehensive review of current research and future directions. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 129-173, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1108/JQME-07-2023-0064>.

JOHN, Shibu. Asset inspection management system as a reliable inspection/monitoring tool to optimize the asset utilization & serviceability and to enhance overall efficiency of service provision. *In: SPE CONFERENCE AT OMAN PETROLEUM & ENERGY SHOW*, 2022, Muscat. **Proceedings** [...]. [Richardson, TX?]: Society of Petroleum Engineers, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2118/200288-MS>.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção função estratégica**. 5. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2019.

KESEK, M.; BOGACZ, P.; MIGZA, M. The application of Lean Management and Six Sigma tools in global mining enterprises. **IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.**, [Bristol, UK?], v. 214, 012090, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012090>.

MURATORE, Antonino *et al.* Index method for risk assessment using load lifting (crane) and people lifting (MEWP) equipment. *In: CASTANIER, Bruno et al. (ed.). Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference – ESREL 2021*. Singapore: Research Publishing, 2021. p. 2399-2405. Disponível em: https://doi.org/10.3850/978-981-18-2016-8_240-cd. Acesso em: 19 abr. 2025.

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; SHAMSEER, L.;

- TETZLAFF, J. M.; AKL, E. A.; BRENNAN, S. E.; CHOU, R.; GLANVILLE, J.; GRIMSHAW, J. M.; HRÓBJARTSSON, A.; LALU, M. M.; LI, T.; LODER, E. W.; MAYO-WILSON, E.; MCDONALD, S.; MCGUINNESS, L. A.; STEWART, L. A.; THOMAS, J.; TRICCO, A. C.; WELCH, V. A.; WHITING, P.; MOHER, D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, London, v. 372, n. 71, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.
- PROMAD JR. **Como aplicar o ciclo DMAIC**. Promad Jr., 2022. Disponível em: <https://www.promadjr.com/post/como-aplicar-o-ciclo-dmaic>. Acesso em: 12 jun. 2025.
- RODRÍGUEZ-PADIAL, Néstor; MARÍN, Marta; DOMINGO, Rosario. An approach to integrating tactical decision-making in industrial maintenance balance scorecards using principal components analysis and machine learning. **Complexity**, [s. l.], v. 2017, art. 3759514, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2017/3759514>. Acesso em: 19 abr. 2025.
- SENTHIL, Chandran; PANDIAN, Ranjitharamasamy Sudhakara. Proactive maintenance model using reinforcement learning algorithm in rubber industry. **Processes**, Basel, v. 10, n. 2, art. 371, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10020371>.
- SOUZA, Danilo Augusto Santana de *et al.* Implementation of Condition-Based Maintenance (CBM) in a central air conditioning unit by using microcontroller and open-source monitoring platforms. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 46-57, Apr. 2022. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.94.5>. Acesso em: 23 jun. 2025.
- THOMÉ, A. M. T.; SCAVARDA, L. F.; SCAVARDA, A. J. Conducting systematic literature review in operations management. **Production Planning & Control**, [s. l.], v. 27, n. 5, p. 408-420, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1129464>. Acesso em: 10 maio 2025.
- TOPCHIIY, Dmitry *et al.* Testing of load-carrying elements of elevating equipment while reconstruction transport facilities. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [Bristol, UK?], v. 918, 012128, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/918/1/012128>. Acesso em: 19 abr. 2025.
- WANG, Zhaozong *et al.* A fault localization approach based on Multisystem-PCA and Dynamic-SDG: application in train lifting equipment. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, [s. l.], v. 84, 2023. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=4496912>. Acesso em: 19 abr. 2025.
- YANBIN, Xu *et al.* Research on optimization of crane fault predictive control system based on data mining. **Nonlinear Engineering**, [s. l.], v. 12, n. 1, art. 20220202, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/nleng-2022-0202>. Acesso em: 19 maio 2025.

Submetido: 24 jun. 2025

Aprovado: 15 set. 2025