

A IMPORTÂNCIA DA MANUTENÇÃO PREDITIVA NA CONTINUIDADE OPERACIONAL: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DOS IMPACTOS NOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO

THE IMPORTANCE OF PREDICTIVE MAINTENANCE IN OPERATIONAL CONTINUITY: A LITERATURE REVIEW OF THE IMPACTS ON THE PRODUCTION PROCESSES

161

Jonathan William Formigoni¹, Nathan Gabriel Porcino Silvestre¹, José Marcos Romão Júnior²; Joaquim M. F. Antunes Neto³

1- Formandos do CST em Gestão da Produção Industrial, FATEC Itapira; 2- Especialista em Controladoria e Finanças (INPG –Brasil), docente e coordenador do CST em Gestão da Produção Industrial da FATEC Itapira; 3- Doutor em Biologia Funcional e Molecular, IB, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil. MBA em Gestão de Estratégia Empresarial e Especialista em Tecnologias para a Indústria 4.0 (Faculdade São Luís, Jaboticabal, SP), docente e orientador na FATEC Itapira.

Contato: joaquim.antunes@fatec.sp.gov.br

RESUMO

O presente artigo explora a importância da manutenção preditiva na continuidade operacional dos processos de produção industrial, mediante uma revisão bibliográfica abrangente. A manutenção preditiva se destaca como uma abordagem proativa que permite a identificação precoce de potenciais falhas em equipamentos, possibilitando intervenções planejadas e minimizando paradas não programadas. Ao antecipar problemas, este método não apenas reduz custos operacionais e aumenta a eficiência da produção, mas também prolonga a vida útil dos equipamentos. Além disso, promove um ambiente de trabalho mais seguro ao mitigar os riscos associados a falhas inesperadas. Com isso, este estudo visa destacar como a implementação eficaz da manutenção preditiva não só otimiza o desempenho industrial, mas também fortalece a competitividade das organizações no contexto global atual.

Palavras-chave: Manutenção preditiva. Processos de produção. Melhoria contínua. Eficiência de produção.

ABSTRACT

This article explores the importance of predictive maintenance in the operational continuity of industrial production processes, through a comprehensive literature review. Predictive maintenance stands out as a proactive approach that allows for the early identification of potential equipment failures, enabling planned interventions and minimizing unscheduled downtime. By anticipating problems, this method not only reduces operating costs and increases the efficiency of the company. Additionally, it promotes a safer work environment by mitigating the risks associated with unexpected failures. With this, this study aims to highlight how the effective implementation of predictive maintenance not only optimizes industrial performance, but also strengthens the competitiveness of organizations in the current global context.

Keywords: Predictive maintenance. Production processes. Continuous improvement. Production efficiency.

1 INTRODUÇÃO

No cenário industrial contemporâneo, a capacidade de manter operações contínuas e eficientes é fundamental para a competitividade e sustentabilidade das organizações. Em um ambiente onde cada minuto de parada pode representar perdas significativas, a manutenção preditiva emerge como uma estratégia essencial. Esta abordagem proativa não se limita apenas a corrigir problemas quando surgem, mas antecipa potenciais falhas através da análise de dados em tempo real e do uso de tecnologias avançadas. Neste contexto, o presente trabalho se propõe a explorar a importância da manutenção preditiva na continuidade operacional, focando na revisão bibliográfica dos impactos nos processos de produção (BROMBERGER, 2024; COMPER, 2023).

A manutenção preditiva tem emergido como uma abordagem fundamental na gestão de ativos industriais e infraestruturas críticas. Este método revolucionário não apenas antecipa potenciais falhas em equipamentos, mas também otimiza significativamente a disponibilidade operacional e a eficiência dos processos. Baseada em dados e análises avançadas, a manutenção preditiva capacita as organizações a adotarem uma abordagem proativa, substituindo práticas de manutenção reativas e preventivas tradicionais. Ao prever com precisão quando a manutenção será necessária, esta estratégia não só reduz custos operacionais, mas também minimiza o tempo de inatividade não planejado, garantindo assim a continuidade das operações críticas. Este artigo explora os fundamentos da manutenção preditiva, destacando seu papel relevante na melhoria da confiabilidade e no prolongamento da vida útil dos ativos industriais modernos (CARNEIRO, 2024).

A manutenção preditiva representa uma evolução significativa em relação às práticas tradicionais de manutenção corretiva e preventiva. Ao invés de agir apenas em resposta a falhas ou de forma programada baseada em estimativas, essa metodologia utiliza dados precisos coletados por meio de sensores e sistemas de monitoramento avançados. Esses dados são analisados por algoritmos de inteligência artificial e *machine learning*, permitindo prever o momento ideal para a realização de manutenções, evitando paradas não planejadas e maximizando a disponibilidade dos equipamentos (FIGUEIREDO, 2024).

Além de garantir a eficiência operacional, a manutenção preditiva também desempenha um papel essencial na redução de custos operacionais. A capacidade de identificar e resolver problemas antes que eles se tornem emergências não apenas minimiza despesas com reparos de emergência, mas também prolonga a vida útil dos ativos industriais. Isso resulta em economias significativas ao longo do tempo e permite que as empresas aloquem recursos de maneira mais estratégica para investimentos em inovação e crescimento (NOVAES et al., 2024).

A segurança no trabalho é outro benefício importante derivado da manutenção preditiva. Equipamentos que são regularmente monitorados e mantidos em condições ideais têm menos probabilidade de apresentar falhas que possam colocar em risco a saúde e segurança dos trabalhadores.

Isso não apenas promove um ambiente de trabalho mais seguro, mas também contribui para o cumprimento das normas regulatórias e para a reputação positiva da empresa no mercado (CAMPOS; CAMPOS, 2024; MAIA, 2014).

A delimitação deste estudo se concentra na maneira como a manutenção preditiva pode otimizar processos, prolongar a vida útil dos equipamentos, e, sobretudo como ela se alinha aos objetivos de sustentabilidade e eficiência que norteiam o setor industrial atual. Por meio de uma revisão bibliográfica atualizada, este trabalho se apoia em investigações anteriores tanto próprias quanto de terceiros, delineando um panorama teórico que abrange desde os fundamentos tecnológicos até as implicações práticas da manutenção preditiva.

Portanto, este estudo busca não apenas revisar criticamente a literatura existente sobre a manutenção preditiva, mas também fornecer insights práticos e evidências dos impactos positivos que essa estratégia pode ter nos processos de produção. Ao entender melhor como essa metodologia pode ser implementada e otimizada, as organizações estarão mais bem posicionadas para enfrentar desafios operacionais com maior eficiência e resiliência.

O presente artigo tem como objetivo investigar o impacto da implementação da manutenção preditiva nos processos operacionais industriais, explorando como essa abordagem pode melhorar a eficiência, reduzir custos e aumentar a confiabilidade dos equipamentos.

2 METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão bibliográfica narrativa da literatura científica compilando estudos técnicos sobre manutenção preditiva. Foram explorados artigos em periódicos especializados e livros que abordassem conceitos fundamentais, metodologias de implementação e estudos de casos relevantes. A revisão bibliográfica foi fundamental para estabelecer uma base sólida de conhecimento teórico sobre o tema. Utilizou-se as bases de dados *Scopus*, *ScienceDirect* e *Google Acadêmico*.

A partir da revisão bibliográfica, foram selecionados estudos de caso representativos de diferentes setores industriais, como manufatura, energia, transporte e outros. Os critérios de seleção incluíram a aplicação específica da manutenção preditiva, métodos utilizados (por exemplo, análise de vibração, termografia, análise de óleo), resultados obtidos em termos de redução de tempo de inatividade, aumento da disponibilidade operacional, economia de custos e melhorias na confiabilidade dos equipamentos. O tipo de estudo e metodologia (estudos de casos), atualidade e relevância (não há um período estabelecido, por considerar todo o contexto de implantação do processo) e aplicabilidade e generalização (aplicabilidade dos estudos para diferentes setores industriais e contextos operacionais) foram critérios de inclusão determinantes.

Cada estudo de caso selecionado foi analisado em profundidade, destacando os principais desafios enfrentados, as soluções implementadas e os resultados alcançados. A análise se concentrou em identificar padrões comuns de sucesso, bem como lições aprendidas que podem ser aplicáveis a diferentes contextos industriais.

Com base na análise dos estudos de caso, foram identificados os principais impactos da manutenção preditiva nos processos operacionais. Foram destacados os benefícios quantitativos, como redução percentual de falhas críticas, aumento da eficiência operacional e otimização dos recursos, além de benefícios qualitativos, como melhorias na segurança do trabalho e prolongamento da vida útil dos ativos.

Por fim, buscou-se discutir os achados obtidos a partir da revisão bibliográfica e dos estudos de caso selecionados. Realizou-se uma comparação entre diferentes abordagens de manutenção preditiva e outros métodos de gestão de ativos, destacando as vantagens competitivas dessa abordagem. As conclusões finais forneceram orientações práticas para gestores e profissionais interessados em implementar ou aprimorar programas de manutenção preditiva em suas organizações.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

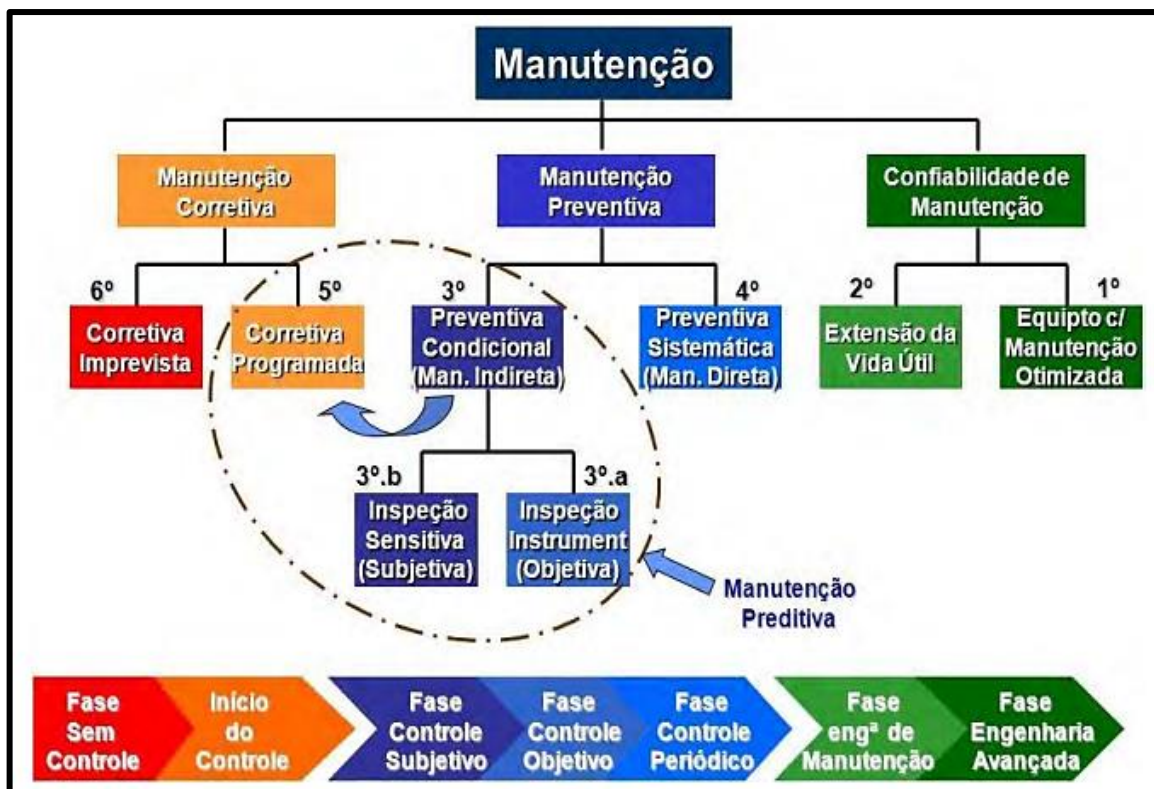
O referencial teórico de um trabalho acadêmico desempenha um papel fundamental ao fornecer o arcabouço conceitual e analítico que sustenta a pesquisa. No contexto da manutenção preditiva, é fundamental explorar as teorias, modelos e estudos empíricos que fundamentam essa abordagem inovadora na gestão de ativos e na operação industrial. O levantamento bibliográfico elaborado busca não apenas definir e contextualizar os princípios básicos da manutenção preditiva, mas também examinar suas implicações práticas, benefícios e desafios enfrentados pelas organizações que buscam implementar essa estratégia. Ao explorar diversas perspectivas teóricas e evidências empíricas, este trabalho visa fornecer uma compreensão abrangente dos fundamentos teóricos que sustentam a eficácia da manutenção preditiva na melhoria da continuidade operacional e na otimização dos processos de produção.

3.1 Introdução à Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva é uma estratégia avançada de gestão de ativos que se baseia na análise de dados e no monitoramento contínuo do estado de equipamentos e máquinas industriais. Ao contrário da manutenção corretiva, que intervém somente após a falha do equipamento, ou da manutenção preventiva, que segue um cronograma fixo de inspeções e reparos, a manutenção preditiva utiliza técnicas de monitoramento em tempo real para prever quando uma falha pode ocorrer. Essa abordagem permite que as empresas programem intervenções de manutenção de forma proativa, reduzindo significativamente o risco de paradas não planejadas e minimizando os custos associados à manutenção corretiva emergencial (TOLEDO JÚNIOR, 2020).

A **Figura 1** apresenta os diversos tipos de manutenção e onde a manutenção preditiva se encaixa entre eles:

Figura 1. Diferentes tipos de manutenção e a inserção da manutenção preditiva.



Fonte: Adaptado de Souza (2017).

Souza (2017) explica pela Figura 1 que existem variadas técnicas de manutenção, sendo estas caracterizadas pela forma em que são feitas as intervenções na planta do sistema. Habitualmente a manutenção vem sendo classificada como planejada e não planejada, todavia, ambas se se formam a partir de dois modelos básicos de atuação: manutenção preventiva e a mais utilizada manutenção corretiva. Quando ocorre a paralização de uma máquina sem um planejamento gerencial encontra-se um modelo de manutenção que dependendo do caso não é lucrativo para a empresa, ou seja, os procedimentos de manutenção foram um fracasso. Um serviço planejado é executado de um jeito organizado com previsões e controles dos processos de manutenção, de tal forma que a qualidade se torne superior, havendo agilidade e confiança, reduzindo os custos de um trabalho de manutenção não planejado.

Os principais métodos empregados na manutenção preditiva incluem análise de vibração, termografia, análise de óleo, ultrassom e monitoramento de condição baseado em sensores IoT (Internet das Coisas). Cada técnica oferece dados específicos sobre o estado operacional dos equipamentos, permitindo aos técnicos identificarem problemas incipientes antes que se tornem falhas críticas. Esses dados são processados por *softwares* especializados que aplicam algoritmos avançados para detectar padrões e anomalias, gerando alertas automáticos quando são identificadas condições fora do padrão esperado (FRANCO, 2020).

A implementação eficaz da manutenção preditiva requer não apenas tecnologias avançadas de monitoramento, mas também uma cultura organizacional que valorize a análise de dados e a tomada de decisões baseada em evidências. É essencial que as equipes de manutenção sejam treinadas para interpretar corretamente os dados coletados e tomar ações preventivas ou corretivas de forma oportuna. Além disso, a integração de sistemas de informação permite uma gestão mais eficiente dos ativos, facilitando o planejamento de manutenções e otimizando o uso dos recursos disponíveis na organização.

A manutenção preditiva não apenas aumenta a disponibilidade e a confiabilidade dos equipamentos industriais, mas também contribui significativamente

para a redução de custos operacionais e melhorias na segurança do trabalho. Ao antecipar problemas potenciais e permitir intervenções planejadas, essa abordagem promove uma gestão de ativos mais eficiente e sustentável, alinhada com as demandas competitivas do mercado global moderno.

3.1.1 Evolução Histórica e Contextos de Aplicação

A evolução da manutenção preditiva teve início no século XX, inicialmente impulsionada pela necessidade de aumentar a confiabilidade e a eficiência das máquinas industriais. Nos anos 1940 e 1950, durante a Segunda Guerra Mundial e a Guerra Fria, surgiram avanços significativos em técnicas de monitoramento, como a análise de vibração, visando melhorar a performance de equipamentos críticos utilizados em contextos militares e industriais. Posteriormente, na década de 1970, com o avanço da eletrônica e da computação, surgiram novas metodologias de monitoramento baseadas em sensores e análise de dados, ampliando as capacidades da manutenção preditiva (MORAIS et al., 2023; OLIVEIRA, 2019).

Atualmente, a manutenção preditiva é amplamente aplicada em diversos setores industriais, incluindo manufatura, energia, transporte, petróleo e gás, entre outros. Em ambientes de produção industrial, por exemplo, a análise de vibração é utilizada para detectar falhas em rolamentos e engrenagens antes que causem danos significativos. No setor de energia, a termografia é empregada para monitorar a temperatura de componentes elétricos e mecânicos, identificando pontos quentes que podem indicar desgaste ou falhas iminentes. Já na aviação, a manutenção preditiva é essencial para garantir a segurança operacional das aeronaves, antecipando problemas em sistemas críticos como motores e controles de voo (FERREIRA, 2017).

Ressalta-se que a manutenção preditiva tem sido cada vez mais integrada a sistemas de monitoramento remoto e análise de dados em tempo real, impulsionados pelo avanço da IoT e da inteligência artificial. Essas tecnologias permitem uma gestão mais eficaz dos ativos industriais, proporcionando maior precisão nas previsões de falhas e otimizando o planejamento de intervenções de manutenção. Assim, a evolução histórica da manutenção preditiva reflete não apenas avanços tecnológicos,

mas também uma mudança cultural em direção a práticas mais proativas e eficientes na gestão de ativos e operações industriais (SILVA, 2022).

3.1.2. Importância da Manutenção Preditiva

A importância da manutenção preditiva na gestão moderna de ativos industriais é amplamente reconhecida devido ao seu papel fundamental na maximização da eficiência operacional e na minimização de custos associados à manutenção. Ao contrário dos métodos tradicionais, como a manutenção corretiva e preventiva baseada em intervalos fixos, a manutenção preditiva utiliza tecnologias avançadas de monitoramento e análise de dados para antecipar falhas potenciais antes que ocorram. Isso não apenas reduz significativamente o risco de paradas não programadas e seus impactos negativos na produção, mas também permite uma utilização mais eficiente dos recursos, ao programar intervenções de manutenção apenas quando necessário. Essa abordagem proativa não só aumenta a disponibilidade operacional dos equipamentos, mas também contribui para prolongar sua vida útil e melhorar a segurança no ambiente de trabalho, tornando-se essencial para a competitividade e sustentabilidade das operações industriais modernas (SELLITTO, 2005).

3.1.3 Benefícios em Relação a Métodos Tradicionais de Manutenção

Os benefícios da manutenção preditiva em relação aos métodos tradicionais de manutenção podem ser explicados de maneira científica através de várias dimensões críticas:

- **Redução de Custos:** A manutenção preditiva permite identificar e corrigir problemas antes que se tornem falhas críticas, evitando custos elevados associados à reparação de equipamentos danificados. Isso contrasta com a manutenção corretiva, que frequentemente requer substituições dispendiosas de componentes ou máquinas inteiras devido a falhas não previstas (PIRES; OKADA, 2020).
- **Aumento da Disponibilidade Operacional:** Ao prever antecipadamente as necessidades de manutenção, a manutenção preditiva minimiza o tempo de

inatividade não planejado dos equipamentos. Isso é fundamental em ambientes industriais onde a continuidade operacional é essencial para atender à demanda do mercado e maximizar a produção (TORRES, 2022).

- **Prolongamento da Vida Útil dos Equipamentos:** Monitorando regularmente o estado dos equipamentos e implementando ações de manutenção preventiva baseadas em dados, a manutenção preditiva contribui para estender a vida útil dos ativos. Isso é alcançado pela redução do desgaste excessivo e pela mitigação de danos progressivos que poderiam levar à obsolescência prematura (SILVA; ABREU; DUARTE, 2023).
- **Melhoria na Segurança:** Ao detectar problemas potenciais antes que se transformem em falhas, a manutenção preditiva ajuda a aumentar a segurança no local de trabalho. Isso reduz o risco de acidentes associados a falhas repentinas de equipamentos, protegendo tanto os trabalhadores quanto os ativos industriais (CAMPOS; CAMPOS, 2024).
- **Eficiência Operacional:** A capacidade de agendar intervenções de manutenção de forma preditiva permite uma utilização mais eficiente dos recursos humanos e materiais. Isso contrasta com a manutenção preventiva, que muitas vezes requer verificações periódicas baseadas em calendário, independentemente do estado real do equipamento (SILVA, 2023).

Portanto, manutenção preditiva oferece vantagens significativas em relação aos métodos tradicionais de manutenção, proporcionando uma gestão mais eficaz e econômica dos ativos industriais. Esses benefícios são fundamentados em análises detalhadas de dados de monitoramento contínuo, destacando a importância de uma abordagem proativa na gestão de ativos e na manutenção de operações industriais.

3.1.4 Impacto na Disponibilidade Operacional, Eficiência e Custos

A manutenção preditiva exerce um impacto substancial na disponibilidade operacional, eficiência e custos das operações industriais. Em termos de disponibilidade operacional, essa abordagem permite identificar potenciais falhas antes que elas afetem negativamente a produção, garantindo que os equipamentos

estejam sempre disponíveis quando necessários. Isso é fundamental para reduzir o tempo de inatividade não planejado, que pode ser extremamente custoso e disruptivo para qualquer operação industrial. Além disso, ao antecipar problemas através de técnicas como análise de vibração, termografia e monitoramento de óleo, a manutenção preditiva permite que as intervenções sejam programadas de forma estratégica, minimizando o impacto nas operações diárias e garantindo uma utilização mais eficiente dos recursos (NETO et al., 2018).

Em termos de eficiência, a manutenção preditiva contribui para otimizar o desempenho dos equipamentos ao longo de sua vida útil. Ao monitorar continuamente o estado dos ativos e realizar intervenções preventivas baseadas em dados, as empresas conseguem reduzir o desperdício de recursos e aumentar a produtividade geral. Isso é alcançado através da minimização de paradas não planejadas e da melhoria na qualidade dos produtos ou serviços entregues, resultando em uma operação mais eficaz e competitiva no mercado (FARIAS, 2024).

Em relação aos custos, a manutenção preditiva demonstra uma vantagem significativa sobre abordagens tradicionais. Enquanto a manutenção corretiva pode resultar em custos elevados devido a reparos emergenciais e substituições de equipamentos danificados, e a manutenção preventiva pode levar a gastos desnecessários com manutenções programadas baseadas em tempo, a manutenção preditiva permite um controle mais preciso dos custos operacionais. Ao prever falhas com antecedência e realizar reparos ou substituições preventivas no momento certo, as organizações conseguem reduzir os custos totais de manutenção ao longo do ciclo de vida dos equipamentos. Isso não apenas beneficia a linha de resultado, mas também fortalece a resiliência operacional da empresa ao mitigar os riscos associados a falhas de equipamentos (VIEGAS JÚNIOR, 2023).

3.1.5. Fundamentos Teóricos da Manutenção Preditiva

Os métodos e técnicas utilizados na manutenção preditiva são fundamentais para monitorar o estado de equipamentos e prever possíveis falhas antes que ocorram danos significativos (ESPINDULA, 2021). Cada uma dessas técnicas oferece achados

específicos sobre o comportamento e a condição dos ativos industriais, permitindo uma gestão mais eficiente e proativa dos recursos.

Análise de Vibração: Este método monitora as vibrações mecânicas de máquinas e equipamentos. Variações na vibração podem indicar desalinhamento, desgaste de rolamentos, folgas mecânicas, entre outros problemas. Sensores de vibração são aplicados em pontos estratégicos dos equipamentos para coletar dados, que são então analisados para identificar padrões anormais que possam indicar a necessidade de manutenção (GOMES, 2023).

O princípio fundamental da análise de vibração na manutenção preditiva baseia-se na compreensão de que máquinas e equipamentos industriais em operação normal geram vibrações característicos. Essas vibrações podem ser causadas por uma variedade de fatores, como desalinhamento de eixos, desgaste de rolamentos, folgas mecânicas, desequilíbrio de componentes rotativos, entre outros (FERREIRA, 2019).

O processo começa com a instalação de sensores de vibração em pontos estratégicos do equipamento, como próximo a rolamentos, engrenagens e estruturas críticas. Esses sensores captam continuamente as vibrações geradas durante a operação normal do equipamento. Os dados coletados são então analisados utilizando técnicas avançadas de processamento de sinais e software especializado.

Durante a análise, os técnicos e engenheiros procuram por padrões ou frequências anormais nas vibrações registradas. Por exemplo, um aumento na amplitude de vibração ou a presença de picos em determinadas frequências pode indicar problemas específicos, como desgaste de rolamentos, que podem levar a falhas se não forem corrigidos.

Assim, o princípio básico é que mudanças nas características das vibrações normais podem ser indicativas de problemas iminentes nos equipamentos. A análise de vibração permite que as equipes de manutenção identifiquem esses problemas com antecedência suficiente para planejar intervenções de manutenção preventiva, maximizando assim a disponibilidade operacional e prolongando a vida útil dos ativos industriais.

Análise de Óleo: A análise de óleo envolve a coleta e análise de amostras de óleo lubrificante de equipamentos industriais. Essas amostras são examinadas para detectar a presença de partículas metálicas, água, contaminantes e outras substâncias que possam indicar desgaste ou deterioração dos componentes internos. Além disso, a análise química do óleo pode revelar condições de operação anormais, como superaquecimento ou contaminação (LAGO, 2007). O princípio da análise de óleo na manutenção preditiva baseia-se na avaliação das propriedades físicas, químicas e de desempenho do óleo lubrificante utilizado em equipamentos industriais. Este método é elementar para detectar potenciais problemas mecânicos e operacionais antes que causem danos significativos aos componentes do equipamento. (LAGO; GONÇALVES, 2006).

Inicialmente, amostras de óleo são coletadas periodicamente de reservatórios ou sistemas de lubrificação dos equipamentos. Essas amostras são submetidas a uma série de testes laboratoriais que incluem análise visual, espectroscopia de infravermelho, análise de partículas, análise de viscosidade, entre outros. Cada teste fornece informações detalhadas sobre a condição do óleo e dos componentes do equipamento.

Durante a análise, os técnicos procuram por indicadores de desgaste, contaminação ou deterioração do óleo, bem como partículas metálicas que possam estar presentes no óleo lubrificante. Por exemplo, altas concentrações de partículas metálicas podem sugerir desgaste de componentes como rolamentos ou engrenagens. A presença de água ou outros contaminantes no óleo também pode indicar problemas como vazamentos ou falhas nos selos.

Ao monitorar continuamente a qualidade do óleo lubrificante e interpretar os resultados dos testes, as equipes de manutenção podem identificar precocemente problemas potenciais de desgaste ou falhas iminentes nos equipamentos. Isso permite que medidas corretivas sejam tomadas antes que ocorra um mau funcionamento grave, reduzindo assim o risco de paradas não planejadas e prolongando a vida útil dos ativos industriais de forma econômica e eficiente.

Termografia: A termografia utiliza câmeras infravermelhas para medir e registrar a temperatura de componentes mecânicos e elétricos. Variações de

temperatura indicam possíveis pontos quentes que podem ser causados por fricção excessiva, conexões soltas, falhas em isolamentos elétricos, entre outros problemas. A análise das imagens termográficas permite identificar anomalias antes que elas levem a falhas mais sérias (LOVAIN; CABRAL; GOMES, 2010; MARINS; MELO; ANDRETTI, 2012). O princípio da termografia na manutenção preditiva baseia-se na captura e análise das imagens térmicas de componentes mecânicos e elétricos dos equipamentos industriais. Esta técnica utiliza câmeras infravermelhas sensíveis para detectar variações de temperatura que podem indicar anomalias operacionais ou potenciais falhas nos equipamentos (LOUVAIN; CABRAL; GOMES, 2010).

Durante a operação, os componentes dos equipamentos geram calor devido ao atrito, resistência elétrica, e outros processos. A termografia permite visualizar estas variações de temperatura, identificando áreas que estão operando fora dos parâmetros normais. Padrões anormais, como pontos quentes ou frios, podem indicar problemas como desgaste excessivo, conexões elétricas defeituosas, sobrecarga térmica, ou problemas com isolamentos.

A análise das imagens termográficas é realizada por técnicos treinados, que interpretam os padrões de calor e correlacionam esses dados com o funcionamento esperado dos equipamentos. Essa técnica permite a detecção precoce de problemas que, se não tratados, poderiam resultar em falhas catastróficas ou danos graves aos equipamentos. Além disso, a termografia é uma ferramenta não invasiva e pode ser aplicada em equipamentos em funcionamento normal, minimizando o impacto nas operações diárias.

Portanto, a termografia desempenha um papel decisivo na manutenção preditiva ao fornecer uma visão precisa e detalhada das condições térmicas dos equipamentos industriais. Ao identificar precocemente potenciais problemas, essa técnica permite que as empresas programem intervenções de manutenção preventiva de forma eficaz, otimizando a disponibilidade operacional e prolongando a vida útil dos ativos.

Ultrassom: O ultrassom é utilizado para detectar e medir sons de alta frequência emitidos por equipamentos industriais. Esses sons são gerados por descargas elétricas, fricção em componentes mecânicos e vazamentos de ar

comprimido, entre outras fontes. A detecção precoce de sons anômalos pode indicar a presença de problemas que, se não corrigidos, poderiam resultar em falhas operacionais (TREVISAN; REGULY, 2010; BEZERRA et al., 2009; CAMPOS; CAMPOS, 2024).

Esses métodos não apenas permitem uma detecção precoce de falhas, mas também apoiam a tomada de decisões informadas sobre a programação de manutenções preventivas e corretivas, otimizando assim a disponibilidade operacional dos equipamentos e prolongando sua vida útil de maneira custo-eficiente. O princípio da técnica de ultrassom na manutenção preditiva baseia-se na detecção de sons de alta frequência emitidos por equipamentos industriais durante sua operação. Esses sons ultrassônicos são gerados por diferentes fontes, como descargas elétricas, fricção de componentes mecânicos, vazamentos de ar comprimido e cavitação em fluidos (SEVERO; TROJAN; KOVALESKI, 2013; REZENDE; GOMES, 2016).

A metodologia envolve o uso de um transdutor ultrassônico sensível para captar esses sons de alta frequência. O transdutor converte esses sinais ultrassônicos em sinais elétricos audíveis para os técnicos. Durante a inspeção, o transdutor é movido ao longo dos componentes do equipamento, permitindo que os técnicos localizem pontos anômalos onde os sons ultrassônicos são detectados.

A análise dos sinais ultrassônicos captados pode revelar problemas operacionais específicos, como desgaste de rolamentos, vazamentos em sistemas de ar comprimido, descargas parciais em equipamentos elétricos, entre outros. Variações na intensidade ou na frequência dos sons ultrassônicos podem indicar a severidade de um problema potencial.

Ao detectar precocemente essas anomalias, a técnica de ultrassom permite que as equipes de manutenção tomem medidas preventivas antes que ocorram falhas graves nos equipamentos. Isso ajuda a reduzir o tempo de inatividade não planejado, minimizar custos de reparo e prolongar a vida útil dos ativos industriais. Além disso, o uso do ultrassom como uma ferramenta de diagnóstico não invasiva oferece uma vantagem significativa, pois pode ser aplicado durante a operação normal dos equipamentos, sem interromper os processos produtivos.

3.1.6. Critérios de Seleção e Implementação dos Métodos

Os critérios de seleção e implementação dos métodos de manutenção preditiva são fundamentais para garantir a eficácia e o sucesso das práticas de monitoramento. A escolha dos métodos deve levar em consideração diversos aspectos técnicos, operacionais e econômicos (SANTOS, 2019; BARAN; TROJAN, 2012):

- **Natureza do Equipamento e Aplicação:** Cada método de manutenção preditiva pode ser mais adequado para diferentes tipos de equipamentos e aplicações industriais. Por exemplo, a análise de vibração pode ser ideal para máquinas rotativas, enquanto a termografia pode ser mais eficaz para detectar problemas em componentes elétricos. A seleção deve considerar a compatibilidade entre o método escolhido e as características específicas dos equipamentos a serem monitorados.
- **Complexidade e Custo do Método:** A complexidade e os custos associados à implementação de cada método devem ser cuidadosamente avaliados. Isso inclui não apenas o investimento inicial em equipamentos de monitoramento e software, mas também os custos contínuos de treinamento de pessoal, manutenção dos equipamentos e análise dos dados. Métodos mais sofisticados, como análise de óleo com espectroscopia, podem requerer recursos financeiros e técnicos significativos em comparação com técnicas mais simples, como inspeção visual.
- **Disponibilidade de Dados e Acesso às Tecnologias:** A disponibilidade de dados confiáveis e acessíveis é essencial para a implementação bem-sucedida da manutenção preditiva. Isso pode envolver a capacidade de integrar sistemas de monitoramento com plataformas de gestão de ativos existentes na empresa. Além disso, a disponibilidade de tecnologias avançadas, como sensores de alta precisão e software de análise de dados em tempo real, pode influenciar a escolha dos métodos mais apropriados.
- **Capacitação e Treinamento da Equipe:** A capacitação adequada da equipe técnica é essencial para garantir a eficácia dos métodos de manutenção preditiva. Os técnicos devem receber treinamento especializado não apenas no uso dos equipamentos de monitoramento, mas também na interpretação dos dados

coletados e na tomada de decisões baseadas em análise preditiva. Isso assegura que as intervenções de manutenção sejam realizadas de maneira oportuna e precisa, maximizando os benefícios da abordagem preditiva.

- **Normas e Regulamentações:** Em alguns setores industriais, normas e regulamentações específicas podem influenciar a escolha e a implementação dos métodos de manutenção preditiva. É importante garantir que as práticas de monitoramento estejam alinhadas com os padrões de segurança, qualidade e conformidade aplicáveis, assegurando a integridade dos equipamentos e a segurança dos trabalhadores.

A seleção e implementação dos métodos de manutenção preditiva devem ser guiadas por uma análise criteriosa que considere os requisitos específicos do equipamento, os recursos disponíveis, a complexidade técnica, a capacitação da equipe e as exigências regulatórias. Ao escolher os métodos mais adequados e implementá-los de forma eficaz, as organizações podem melhorar a confiabilidade operacional, reduzir custos e maximizar a vida útil de seus ativos industriais.

3.1.7. Tecnologias e Ferramentas Utilizadas

As tecnologias e ferramentas utilizadas na manutenção preditiva são essenciais para coletar, processar e interpretar dados que ajudam a prever problemas em equipamentos industriais. Estas incluem (CAMPOS, 2011):

- **Sensores e Instrumentação:** Sensores de vibração, sensores de temperatura, sensores de pressão, entre outros, são utilizados para monitorar continuamente as condições operacionais dos equipamentos. Estes dispositivos capturam dados em tempo real sobre vibrações, temperaturas, pressões e outros parâmetros relevantes, fornecendo informações críticas para análise.
- **Software de Análise de Dados:** Plataformas de software especializadas são usadas para processar os dados coletados pelos sensores. Esses softwares aplicam algoritmos avançados para detectar padrões, anomalias e tendências nos dados de monitoramento. Isso permite que técnicos e engenheiros identifiquem potenciais falhas ou degradações nas condições operacionais dos equipamentos.

- **Sistemas de Monitoramento Remoto (IoT):** Com o avanço da Internet das Coisas (IoT), os equipamentos podem ser integrados a sistemas de monitoramento remoto. Isso permite o monitoramento contínuo e em tempo real das condições dos equipamentos a partir de qualquer localização. Os dados são transmitidos para centros de controle ou nuvens de dados, facilitando o acesso instantâneo às informações críticas.
- **Câmeras Termográficas:** Câmeras infravermelhas são utilizadas na técnica de termografia para visualizar as variações de temperatura em componentes mecânicos e elétricos. Essas câmeras capturam imagens térmicas que revelam pontos quentes ou frios, indicando áreas de potenciais problemas como falhas de isolamento, desgaste excessivo ou problemas elétricos.
- **Equipamentos de Ultrassom:** Transdutores ultrassônicos são usados para detectar sons de alta frequência emitidos por equipamentos em operação. Estes equipamentos captam sons que podem ser indicativos de problemas como vazamentos de ar comprimido, falhas em rolamentos, descargas parciais em equipamentos elétricos, entre outros.

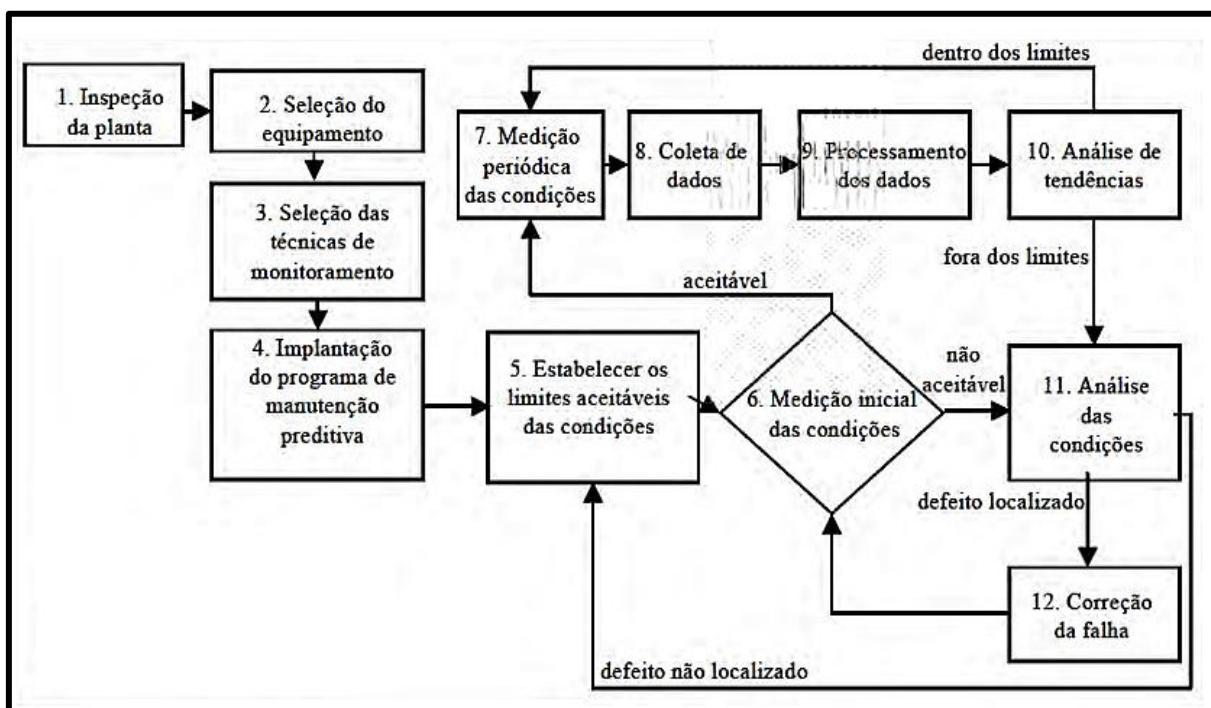
A combinação dessas tecnologias e ferramentas permite uma abordagem integrada e proativa na manutenção preditiva. Elas não apenas ajudam a prever falhas antes que ocorram, mas também permitem uma gestão mais eficiente dos ativos industriais, minimizando o tempo de inatividade não planejado e reduzindo os custos associados à manutenção corretiva.

3.2 Implementação da Manutenção Preditiva

Conforme descrito por Souza (2017), a manutenção preditiva tem como objetivo evitar falhas repentinas em equipamentos ou instalações, monitorando uma série de parâmetros que permitem prolongar a operação contínua das máquinas. Na prática, essa abordagem visa prever o estado dos equipamentos, garantindo que intervenções sejam realizadas apenas quando necessário, enquanto as máquinas estão em funcionamento. A **Figura 2** apresenta o fluxograma de um processo de manutenção preditiva:

179

Figura 2. Fluxograma de um processo de manutenção preditiva.



Fonte: Adaptado de Tondato (2004).

A **Figura 2** apresenta que quando o desgaste ou a falha iminente são detectados, é tomada a decisão de intervir, geralmente com antecedência suficiente para permitir a preparação adequada do serviço, minimizando impactos na produção. Desta forma, a manutenção preditiva antecipa as necessidades de manutenção corretiva programada, otimizando a eficiência operacional conforme discutido anteriormente. Torna-se fundamental que a equipe responsável pela inspeção e

análise dos equipamentos esteja devidamente treinada não apenas para coletar dados, mas também para interpretar as informações e formular diagnósticos precisos. Embora isso pareça evidente, é comum encontrar em muitas empresas métodos de coleta e sistemas de monitoramento de manutenção preventiva que não se traduzem em intervenções eficazes baseadas na qualidade dos dados coletados.

Evidencia-se que os sinais de desgaste são os indicativos na tomada de decisão pela intervenção. Esse acompanhamento detalhado geralmente permite a preparação prévia do serviço, o que é o ponto chave para manter as operações em andamento. Em termos mais simples, a manutenção preditiva prevê o estado das máquinas e, quando necessário intervir, transforma-se em uma manutenção corretiva programada (MARCORIN; LIMA, 2003).

O Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD) é uma tecnologia avançada utilizada principalmente em indústrias para monitorar e controlar processos industriais de forma centralizada e distribuída. Este sistema consiste em uma rede de computadores interligados, conhecidos como controladores distribuídos, que são responsáveis por coletar dados, processar informações e enviar comandos para equipamentos e dispositivos dentro de uma planta industrial (NERIS, 2022). Os principais componentes de um SDCD incluem:

- **Controladores Distribuídos:** São dispositivos que realizam o controle em tempo real de processos específicos. Cada controlador pode estar conectado a diversos sensores e atuadores, permitindo a coleta de informações precisas sobre variáveis como temperatura, pressão, fluxo, entre outras.
- **Rede de Comunicação:** Utiliza protocolos de comunicação robustos para garantir a transferência rápida e confiável de dados entre os controladores distribuídos e outros dispositivos dentro do sistema. Exemplos de protocolos comuns incluem o Profibus, Modbus, Ethernet/IP, entre outros.
- **Estações de Operação:** São interfaces gráficas que permitem aos operadores monitorar o desempenho do sistema em tempo real, realizar ajustes de parâmetros e responder a eventos ou alarmes de maneira rápida e eficiente.
- **Sistema de Gerenciamento de Dados:** Responsável por armazenar e processar grandes volumes de dados coletados pelos controladores

distribuídos. Isso possibilita análises retrospectivas para melhorar a eficiência operacional e otimizar os processos industriais.

A principal vantagem do SDCD é sua capacidade de proporcionar um controle mais preciso e uma resposta mais rápida às mudanças nas condições de processo, comparado aos sistemas de controle convencionais. Além disso, oferece maior flexibilidade na configuração e expansão do sistema, permitindo adaptações conforme as necessidades da produção industrial evoluem. Esses atributos tornam o SDCD uma peça fundamental para a automação industrial moderna, contribuindo significativamente para a eficiência, segurança e qualidade dos produtos fabricados.

A implementação eficaz de tecnologias de monitoramento e diagnóstico para manutenção preditiva envolve várias estratégias e etapas fundamentais. Aqui estão algumas diretrizes para garantir um processo de implementação bem-sucedido (PEREIRA et al., 2016; GUIMARÃES; NOGUEIRA; SILVA, 2012; GOMES, 2023; PANDOLFO, 2023; PEIXOTO SOBRINHO; SILVA, 2024; FARIAS, 2024).

A seguir, no **Quadro 1**, tem-se a proposta de implementação de uma estratégia de manutenção preditiva, por parte dos pesquisadores do presente estudo, considerando todos os conhecimentos estruturados e refletidos ao longo do artigo.

Quadro 1. Processo de implementação de manutenção preditiva.

FASE ESTRATÉGICA	
➤ Definição de Objetivos Claros	Estabelecimento de metas específicas para a implementação, como redução de tempo de inatividade, aumento da eficiência operacional ou diminuição dos custos de manutenção.
➤ Seleção Adequada de Tecnologias	Escolha das tecnologias de monitoramento e diagnóstico mais adequadas às necessidades específicas da sua organização e dos equipamentos que serão monitorados.
➤ Integração com Sistemas Existentes	Garantia de que as novas tecnologias se integrem de maneira eficaz com os sistemas de gestão de ativos (AMS), sistemas de manutenção assistida por computador (CMMS) e outras plataformas de TI já em uso.
➤ Capacitação e Treinamento	Treinamento dos funcionários sobre como usar as novas tecnologias e interpretar os dados coletados. Isso é essencial para garantir que as informações sejam aproveitadas ao máximo e para promover a aceitação das mudanças.
➤ Criação de Processos e Procedimentos	Desenvolvimento de procedimentos padronizados para a coleta, análise e interpretação de dados de monitoramento. Isso garante consistência e eficiência na aplicação das tecnologias.
➤ Monitoramento Contínuo e Melhoria	Estabelecimento de um sistema de monitoramento contínuo para avaliar o desempenho das tecnologias implementadas. Uso de <i>feedback</i> dos usuários e métricas de desempenho para identificar áreas de melhoria e otimização.
FASE DE IMPLEMENTAÇÃO PROPRIAMENTE DITA	
➤ Planejamento Inicial	Realização de uma avaliação completa das necessidades e desafios atuais de manutenção. Identificação dos equipamentos críticos que podem se beneficiar da manutenção preditiva.
➤ Seleção de Tecnologias	Com base na avaliação da Fase Estratégica, seleciona-se as tecnologias de monitoramento mais apropriadas. Consideração dos fatores como tipo de sensor, conectividade, capacidade analítica e integração com sistemas existentes.
➤ Piloto ou Teste de Campo	Realização de um teste piloto em uma parte específica da operação para validar a eficácia das tecnologias selecionadas. Isso permitirá ajustes antes da implementação em larga escala.
➤ Implementação Gradual	Implementação das tecnologias de forma gradual, começando pelos equipamentos mais críticos ou áreas com maior potencial de retorno sobre o investimento.
➤ Avaliação e Ajustes	Avaliação regularmente dos resultados obtidos após a implementação. Fazer ajustes nos processos, procedimentos ou tecnologias conforme necessário para maximizar os benefícios.
➤ Escalonamento e Expansão	Ampliação da implementação para outros equipamentos ou áreas da operação à medida que os benefícios se tornem evidentes e recursos adicionais estejam disponíveis.
FASE DE CONTINUIDADE PROCESSUAL	
➤ Manutenção e Atualização	Manutenção das tecnologias atualizadas com as últimas inovações e melhores práticas. Isso poderá envolver atualizações de <i>software</i> , substituição de sensores ou adaptação às mudanças nas condições operacionais.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na **Fase Estratégica**, o conceito do controle inicial é decisivo e trata-se de um dos pilares da Manutenção Preventiva Total, envolvendo uma série de ações destinadas à prevenção de problemas de manutenção, desde o início dos estudos para aquisição de ativos. É fato que os departamentos envolvidos assumam a responsabilidade pela manutenção. Um bom projeto deve garantir que a máquina seja reparada de maneira rápida e eficiente, com facilidade de acesso, proteções adequadas para evitar acúmulo de resíduos em partes móveis, e uso de componentes de alta qualidade, entre outros requisitos. Esse método, também conhecido como terotecnologia, combina coordenação, finanças e tecnologia para otimizar o desempenho e a disponibilidade dos ativos desde a fase de projeto e especificação. Além disso, visa obter todos os dados necessários para analisar o desempenho operacional e os custos operacionais.

A capacitação dos funcionários em uma empresa não só contribui para o crescimento organizacional, mas também beneficia todos os envolvidos. Dentro de um planejamento estratégico, o departamento de recursos humanos desempenha um papel crucial ao garantir que os funcionários adquiram o conhecimento necessário. Para maximizar a produtividade, é essencial que eles sejam proficientes no manuseio de ferramentas, desde máquinas simples até as mais complexas. Os profissionais responsáveis pela manutenção dos equipamentos devem possuir o conhecimento técnico adequado para realizar ajustes e reparos necessários com eficiência.

A **Fase de Implementação** propriamente dita da manutenção preditiva delimita a eficácia operacional do processo. Primeiramente, é durante essa fase que são estabelecidos os sistemas de monitoramento contínuo dos equipamentos, permitindo a coleta de dados em tempo real sobre seu desempenho e condição. Essa capacidade de prever falhas iminentes não apenas reduz os custos associados a reparos emergenciais, mas também minimiza as interrupções não planejadas na produção, aumentando a disponibilidade dos ativos. Além disso, a implementação bem-sucedida da manutenção preditiva envolve a integração de tecnologias avançadas, como sensores IoT e análise de big data, que proporcionam dados detalhados para tomadas de decisão mais precisas e oportunas.

Outro ponto decisivo na implementação da manutenção preditiva é que o treinamento adequado dos técnicos e engenheiros responsáveis pelo monitoramento e análise dos dados tenha ocorrido na Fase Estratégica. A capacitação contínua em ferramentas analíticas e metodologias de diagnóstico é essencial para interpretar corretamente os indicadores fornecidos pelos sistemas preditivos. Além disso, é fundamental estabelecer protocolos claros para ações corretivas baseadas nas informações coletadas, garantindo que as intervenções sejam realizadas no momento certo para evitar danos maiores aos equipamentos. Nesta fase de implementação não apenas lança as bases para um sistema de manutenção eficiente e proativo, mas também assegura que a empresa esteja bem-preparada para enfrentar desafios futuros com maior segurança e eficiência operacional.

A **Fase de Continuidade Processual**, ou Manutenção Planejada, deve ser um fluxo processual e contínuo do setor de produção, uma vez que já tenham implantado a cultura da capacitação dos técnicos a estabelecer práticas de manutenção mais estáveis, colaborando com a equipe de operações para reduzir perdas relacionadas a falhas, quebras de equipamentos, mau funcionamento, paradas breves, retrabalhos e produtos defeituosos. Adotar esse método em uma empresa implica ter um efetivo planejamento e controle de manutenção, incluindo o treinamento em ferramentas de planejamento (como *software* especializado), a implementação de métodos organizacionais para programação diária e a coordenação de paradas estratégicas. Esse pilar representa uma abordagem abrangente de medidas preventivas, que incluem planejamento detalhado em base diária, semanal, mensal e anual, bem como a manutenção de registros históricos das intervenções realizadas nos equipamentos. Empresas que adotam a manutenção planejada de maneira adequada costumam alcançar resultados extremamente positivos.

3.3 Estudos de Caso e Exemplos Prático

Tem-se, a seguir, no **Quadro 2**, alguns casos reais que demonstram a aplicação bem-sucedida da manutenção preditiva através do uso de tecnologias de monitoramento e diagnóstico:

Quadro 2. Casos de sucesso da aplicação da manutenção preditiva.

<p>General Electric (GE) - Aviação</p> <p>A GE Aviation utiliza sensores e análise avançada de dados para monitorar o desempenho de motores de aeronaves em tempo real. Essa abordagem permite identificar problemas potenciais antes que eles causem falhas catastróficas, melhorando significativamente a segurança e reduzindo os custos de manutenção.</p> <p>Rio Tinto - Mineração</p> <p>A Rio Tinto implementou um sistema de monitoramento preditivo em suas operações de mineração para prever falhas em equipamentos críticos, como caminhões e escavadeiras. Utilizando sensores e análise de dados em tempo real, a empresa conseguiu reduzir o tempo de inatividade não planejado em até 50%, aumentando a eficiência operacional e a produtividade.</p> <p>Schneider Electric - Indústria</p> <p>A Schneider Electric utiliza sensores IoT e análise de dados para monitorar o desempenho de sistemas elétricos em instalações industriais. Essa abordagem ajuda a detectar problemas elétricos, como sobrecargas e desequilíbrios de fase, antes que causem falhas no sistema, permitindo uma manutenção preventiva eficaz e reduzindo os riscos de interrupções na produção.</p> <p>Norfolk Southern Railway - Transporte Ferroviário</p> <p>A Norfolk Southern Railway implementou sensores de vibração e análise de dados para monitorar a condição de locomotivas e vagões. Isso permitiu prever falhas mecânicas antes que afetassem a operação, melhorando a segurança e reduzindo os custos de manutenção ao evitar reparos emergenciais.</p> <p>Procter & Gamble - Fabricação</p> <p>A Procter & Gamble utiliza análise avançada de dados e sistemas de gestão de ativos para monitorar e otimizar o desempenho de máquinas em suas linhas de produção. Isso inclui a previsão de quebras de equipamentos com base em dados históricos e em tempo real, permitindo manutenções programadas e minimizando o tempo de parada não planejada.</p>

Fonte: Pesquisado pelos autores.

Esses casos demonstram como empresas de diferentes setores têm utilizado tecnologias de monitoramento e diagnóstico para implementar com sucesso estratégias de manutenção preditiva. Ao adotar essas práticas, as organizações não apenas melhoram a confiabilidade de seus ativos, mas também reduzem custos operacionais e aumentam a eficiência geral de suas operações.

3.4 Análise de Resultados com a Implementação da Manutenção Preditiva

A implementação bem-sucedida de manutenção preditiva através de tecnologias avançadas de monitoramento e diagnóstico tem levado a diversos resultados positivos para as empresas, além de proporcionar importantes lições

aprendidas. Aqui estão alguns dos resultados alcançados após a análise dos estudos obtidos e selecionados para compor o presente artigo:

- **Redução do Tempo de Inatividade:** Empresas têm conseguido significativamente reduzir o tempo de inatividade não planejado em equipamentos críticos. Isso é possível detectando problemas antes que eles causem falhas, permitindo intervenções proativas.
- **Aumento da Confiabilidade dos Equipamentos:** A aplicação de manutenção preditiva tem levado a uma melhoria na confiabilidade dos equipamentos. Problemas são identificados e corrigidos antes que afetem a produção, aumentando a disponibilidade operacional.
- **Redução de Custos de Manutenção:** A capacidade de realizar manutenção apenas quando necessário, com base em dados reais de condição dos equipamentos, tem levado a uma redução significativa nos custos de manutenção preventiva e corretiva.
- **Aumento da Eficiência Operacional:** Com menos tempo gasto em reparos não planejados e maior confiabilidade dos equipamentos, as empresas têm conseguido operar de maneira mais eficiente, aumentando a produtividade e reduzindo desperdícios.
- **Melhoria da Segurança:** Detectar problemas potenciais antecipadamente não só evita falhas de equipamentos, mas também contribui para um ambiente de trabalho mais seguro, reduzindo o risco de acidentes relacionados a falhas mecânicas.

Das lições aprendidas, ficou evidente que a implementação da cultura da manutenção preditiva em uma empresa não só fortalece a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos, mas também posiciona a empresa de forma mais competitiva no mercado, proporcionando maior flexibilidade e adaptabilidade às demandas do ambiente industrial moderno:

- **Importância da Qualidade dos Dados:** A precisão e a confiabilidade dos dados coletados pelos sensores são fundamentais. Investir em sensores de alta qualidade e em sistemas robustos de análise de dados é fundamental para resultados precisos.

- **Necessidade de Capacitação e Treinamento:** Capacitar e treinar os funcionários para interpretar os dados gerados pelas tecnologias de monitoramento é essencial. Isso garante que as informações sejam utilizadas de forma eficaz para tomada de decisões informadas.
- **Integração de Sistemas:** Integrar as tecnologias de monitoramento preditivo com os sistemas de gestão de ativos e outras plataformas existentes é um desafio importante, mas necessário para maximizar os benefícios da manutenção preditiva.
- **Monitoramento Contínuo e Aprendizado:** A manutenção preditiva não é um processo estático. É importante monitorar continuamente os resultados obtidos, ajustar algoritmos e processos conforme necessário e aprender com cada ciclo de implementação.
- **Cultura Organizacional e Aceitação de Mudança:** Promover uma cultura organizacional que valorize a inovação e a adoção de novas tecnologias é fundamental. A aceitação das mudanças necessárias para implementar manutenção preditiva pode ser um desafio cultural que requer liderança eficaz e comunicação clara.

Os resultados alcançados pela implementação eficaz de manutenção preditiva são significativos em termos de redução de custos, aumento da eficiência operacional e melhoria da confiabilidade dos ativos. As lições aprendidas destacam a importância da qualidade dos dados, do treinamento adequado, da integração de sistemas e da adaptação contínua para obter o máximo benefício dessas tecnologias avançadas.

3.5. Tendências Futuras e Inovações

Na área de manutenção preditiva, tem-se sugerido constantemente novas tecnologias e avanços que prometem melhorar ainda mais a eficiência, precisão e capacidade preditiva dos sistemas. Algumas das tecnologias emergentes mais promissoras incluem (BROMBERGER, 2024; SANTOS et al., 2024; PECHIM, 2024; OLIVEIRA et al., 2024; PEIXOTO SOBRINHO; SILVA, 2024):

- **Internet das Coisas (IoT) e Edge Computing:** A IoT continua a evoluir, com mais dispositivos sendo conectados e capazes de coletar dados em tempo real.

O uso de *edge computing* permite processar esses dados mais perto da fonte, reduzindo a latência e melhorando a capacidade de resposta.

- **Inteligência Artificial (IA) e *Machine Learning***: IA e *machine learning* estão sendo aplicados para analisar grandes volumes de dados de sensores e históricos, identificando padrões complexos que podem prever falhas com maior precisão. Algoritmos de IA também estão sendo utilizados para otimizar os modelos de manutenção preditiva com aprendizado contínuo.
- ***Blockchain* para Integridade de Dados**: *Blockchain* está sendo explorado para garantir a integridade e a segurança dos dados de monitoramento e diagnóstico. Isso é particularmente importante em setores críticos onde a confiabilidade dos dados é essencial para tomadas de decisão precisas.
- **Realidade Aumentada (AR) e Realidade Virtual (VR)**: AR e VR estão sendo integradas às práticas de manutenção preditiva para fornecer informações contextuais e instruções visuais aos técnicos durante inspeções e reparos. Isso ajuda a reduzir o tempo de treinamento e melhorar a precisão das intervenções.
- **Sensores Avançados e Internet das Coisas Industrial (IIoT)**: Sensores mais avançados estão sendo desenvolvidos para monitorar uma gama ainda maior de variáveis, como condições químicas, estruturais e ambientais. A IIoT permite uma conectividade mais robusta e segura em ambientes industriais complexos.
- **Computação em Nuvem e *Big Data Analytics***: A computação em nuvem facilita o armazenamento e processamento escalável de grandes volumes de dados de monitoramento. Isso permite análises mais profundas e preditivas utilizando técnicas avançadas de *big data analytics*.
- **Manutenção Baseada em Estado (CBM - *Condition-Based Maintenance*)**: A CBM está se tornando mais sofisticada com o uso de tecnologias avançadas. Ela se concentra na monitorização contínua das condições reais de operação de um equipamento para determinar o momento ideal para a manutenção, maximizando a vida útil do equipamento e reduzindo custos.

Essas tecnologias emergentes estão transformando a maneira como a manutenção preditiva é realizada, permitindo uma gestão mais inteligente e eficiente dos ativos industriais e infraestruturais. À medida que essas tecnologias se

desenvolvem, espera-se que elas não apenas melhorem a confiabilidade operacional, mas também contribuam para a sustentabilidade ambiental e a segurança no local de trabalho.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A manutenção preditiva, impulsionada por tecnologias avançadas de monitoramento e diagnóstico, representa um avanço significativo na gestão de ativos e na operação eficiente de sistemas industriais, comerciais e críticos. Ao invés de depender de manutenções periódicas baseadas em calendário ou de aguardar por falhas para intervir, a abordagem preditiva permite identificar problemas potenciais antes que eles causem impactos negativos, como tempo de inatividade não planejado, custos elevados de reparo e perda de produtividade.

As principais tecnologias que sustentam a manutenção preditiva, como IoT, sensores avançados, IA, *machine learning* e análise de big data, oferecem uma capacidade sem precedentes de coletar, processar e interpretar dados em tempo real. Isso não só possibilita a criação de modelos preditivos mais precisos, mas também facilita a implementação de estratégias de manutenção proativas e personalizadas para cada equipamento ou sistema.

Além dos benefícios tangíveis, como redução de custos operacionais, aumento da disponibilidade de equipamentos e melhoria na segurança no local de trabalho, a manutenção preditiva também promove uma cultura organizacional voltada para a eficiência e a inovação. A capacidade de prever e evitar problemas antes que eles ocorram não apenas otimiza recursos, mas também fortalece a competitividade das empresas em um mercado global cada vez mais exigente.

No entanto, para obter sucesso na implementação da manutenção preditiva, é fundamental considerar alguns pontos críticos:

- **Investimento em Tecnologia e Infraestrutura:** Assegurar que as tecnologias utilizadas sejam robustas, seguras e capazes de integrar-se com os sistemas existentes é essencial para garantir a eficácia e a aceitação dentro da organização.

- **Capacitação e Desenvolvimento de Talentos:** Treinar e capacitar os colaboradores para operar e interpretar os dados gerados pelas tecnologias é fundamental. Isso inclui não apenas habilidades técnicas, mas também uma compreensão clara dos benefícios e da importância da manutenção preditiva.
- **Monitoramento e Melhoria Contínuos:** A manutenção preditiva é um processo contínuo de aprendizado e adaptação. É necessário monitorar constantemente os resultados obtidos, realizar ajustes nos modelos preditivos e nas estratégias conforme necessário, e estar aberto a incorporar novas tecnologias emergentes.

A manutenção preditiva não é apenas uma evolução tecnológica, mas uma transformação cultural e operacional que pode impulsionar a eficiência e a competitividade das organizações. Ao adotar e implementar essas práticas de forma eficaz, as empresas não apenas melhoram seu desempenho operacional, mas também se posicionam de maneira estratégica para enfrentar os desafios futuros com maior resiliência e eficácia.

REFERÊNCIAS

BARAN, L. R.; TROJAN, F. Desenvolvimento e análise de um modelo de implantação da MCC aplicado na redução de falhas em sistemas industriais. **II Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**. Ponta Grossa, PR, 2012. Disponível em: <https://encurtador.com.br/eTx5h>

BEZERRA, J. et al. Avaliação de sensor de ultrassom como técnica preditiva na manutenção de subestações e linhas de transmissão e distribuição. **P&D Revista Pesquisa e Desenvolvimento Da ANEEL**, n. 3, p. 107-109, 2009. Disponível em: <https://encurtador.com.br/pSggF>

BROMBERGER, D. A. **Abordagens de *machine learning* aplicadas à manutenção preditiva industrial para a detecção de falhas**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2024. 112 p. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/31838>

CAMPOS, D. C. M. P. **Implementação de técnicas e ferramentas para manutenção preditiva**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2011. Disponível em: <https://encurtador.com.br/vhhqa>

CAMPOS, M.; CAMPOS, L. C. R. Melhoria contínua e manutenção preditiva: estudo de caso de fábrica de óleo lubrificante. **Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula**, v. 7, n. 1, p. 73-84, 2024. Disponível em: <https://revistas.icesp.br/index.php/TEC-USU/article/view/5394/3119>

CARNEIRO, J. C. **Manutenção centrada em confiabilidade**. 2024. Disponível em: <https://repositorio.faculdefama.edu.br/xmlui/handle/123456789/282> Acesso em: 29 jun. 2024.

COMPER, C. R. **Utilização das ferramentas de gestão e planejamento de manutenção para minimizar as falhas em esteiras transportadoras de PVC**. 2023. 26 f. Trabalho de conclusão de curso (Pós Graduação em Gestão Empresarial) - Instituto Federal do Espírito Santo, Linhares, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/4696>

FARIAS, P. C. Mineração 4.0: otimização da manutenção preditiva através da análise de vibração. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 5, p. e6690-e6690, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.5-056>

ESPINDULA, L. G. **Manutenção preditiva e a indústria 4.0**: um estudo de caso da implementação de um sistema de monitoramento on-line de ativos. 2021. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Associação Educativa Evangélica, Faculdade Evangélica de Goianésia – FACEG. Goianésia, 2021. 44 p. Disponível em: <http://repositorio.aee.edu.br/jspui/handle/aee/18342>

FABRICIO, M. A.; BEHRENS, F.; BIANCHINI, D. Monitoramento de equipamentos elétricos para manutenção preditiva utilizando IoT. In: **Proceedings of the Brazilian Technology Symposium, PA-49**. 2016. Disponível em: <https://encurtador.com.br/fx96o>

FERREIRA, R. A **Evolução da manutenção preditiva em compressores volumétricos**: Uma revisão. 2017. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário Anhanguera de Campo Grande. Campo Grande, MS, 2017. 43 p. Disponível em: <https://encurtador.com.br/craUn>

FERREIRA, R. H. M. S. **Sistema de manutenção preditiva para motores elétricos utilizando de sinais de vibração e aprendizado de máquina**. 2019. 42f. (Trabalho de Conclusão de Curso - Monografia), Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba - Brasil, 2019. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/19091>

FIGUEIREDO, G. M. Inteligência artificial aplicada à manutenção preditiva em equipamentos elétricos. **I Seven International Engineering Congress**, p. 1-5, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.56238/sevenengineering-039>

FRANCO, I. T. **Manutenção preditiva utilizando técnicas de machine learning em um sistema embarcado**. 2020. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2020. 73 p. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/11237>

GUIMARÃES, L. M.; NOGUEIRA, C. F.; SILVA, M. D. B. Manutenção industrial: implementação da manutenção produtiva total (TPM). *Revista E-xacta*, v. 5, n. 1, p. 175-197, 2012. <https://openaccesslegada.emnuvens.com.br/dcet/article/view/735/452>

192

GOMES, A. C. A. **Implementação da manutenção preditiva para detecção de falhas em sistemas mecânicos por meio da análise de vibração**. 2022. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Associação Educativa Evangélica, Faculdade Evangélica de Goianésia – FACEG. Goianésia, 2023. 35 p. Disponível em: <http://repositorio.aee.edu.br/jspui/handle/aee/20691>

LAGO, D. F. **Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante**. 2007. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, SP, 2007. 179 p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/94548>

LAGO, D. F.; GONÇALVES, A. C. Manutenção preditiva de um redutor usando análise de vibrações e de partículas de desgaste. **16º POSMEC–Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia**, 2006. Disponível em: <https://www.encur.me/#:~:text=e%20saiba%20mais%3A-,i3d.me/vhmywg,-Para%20acessar%20o>

LOUVAIN, L. C.; CABRAL, L. G.; GOMES, K. R. Aplicação da Termografia na Manutenção preditiva. *Bolsista de Valor*, v. 1, p. 109-112, 2010. Disponível em: <https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/view/1801>

MARCORIN, W. R.; LIMA, C. R. C. Análise dos custos de manutenção e de não manutenção de equipamentos produtivos. *Revista Ciência e Tecnologia*, v. 11, n. 22, p. 35-42, 2003. Disponível em:

MARCHI, C. S. et al. Utilização das tecnologias da indústria 4.0 na manutenção preditiva através do monitoramento de equipamentos e instalações. 2021. **XXVIII SIMPEP- Simpósio de Engenharia de Produção**. Bauru, SP, 2021. Disponível em: <https://www.drb-m.org/av1/11Custodemantencao.pdf>

MAIA, C. R. **Manutenção Em Equipamentos Industriais**. 2024. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/66053/1/Cleber+Rodrigues+Maia.pdf> Acesso em: 29 jun, 2024.

MARINS, A. P. O.; MELO, R. A. S.; ANDRETTI, G. F. Termografia na inspeção preditiva. **Bolsista de Valor**, v. 2, p. 95-100, 2012. Disponível em: [file:///C:/Users/User/Downloads/essentia,+11-termografia\(95-99\).pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/essentia,+11-termografia(95-99).pdf)

MARQUES, A. C.; BRITO, J. N. Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 7, p. 8913-8923, 2019. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv5n7-095>

MORAIS, D. A. et al. Manutenção preditiva: sua história, importância e aplicação na indústria 4.0. **Revista FT Engenharia**, v. 27, p. 1-25, 2023. DOI: 10.5281/zenodo.10204898. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10204898>

NERIS, R. F. Instrumentação e controle de processos na indústria. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 8, n. 3, p. 1269-1276, 2022. DOI: <https://doi.org/10.51891/rease.v8i3.4698>

NETO, Agnaldo et al. **Eficiência operacional, um estudo aplicado a promover a maximização da disponibilidade mecânica de veículos equipamentos**. 2018. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão do Negócio) - Fundação Dom Cabral; Instituto de Transporte e Logística, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <http://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/72>

NOVAES, D. R, et al. A eficiência na tomada de decisão por meio da análise preditiva integrada aos sistemas ERP. **Revista Tópicos**, v. 2, n. 6, p. 1-12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10720638>

OLIVEIRA, A. P. A. **A evolução da manutenção industrial**. 2019. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade Pitágoras. São Luís, 2019. 39 p. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br/handle/123456789/66062>

OLIVEIRA, T. H. G. et al. Transformação da engenharia civil através da inteligência artificial: Um novo horizonte de inovação. **Nativa–Revista de Ciências Sociais do Norte de Mato Grosso**, v. 13, n. 1, p. 3-23, 2024. Disponível em: <http://www.revistanativa.com.br/index.php/nativa/article/view/515/808>

PEREIRA, R. Q. et al. Implantação da manutenção produtiva total em uma indústria química do Sul de Santa Catarina. **Revista ESPACIOS**, v. 37, n. 10, p. 6 (on-line), 2016. <https://www.revistaespacios.com/a16v37n10/16371006.html>

PANDOLFO, C. **Análise de viabilidade para a implementação de metodologia de manutenção preditiva na indústria automotiva**. 2023. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/266353>

PEIXOTO SOBRINHO, E.; SILVA, SIMONE V. Projeto manutenção prescritiva: a manutenção da indústria 4.0. In: ARAÚJO FILHO, A. Z. (org.). **Ciências em Sintonia: Explorando Conexões entre Exatas e Naturais**, E-book, v. 2, São Paulo: Dialética Editora 2024. Disponível em: <https://encurtador.com.br/SwHrG>

PECHIM, M. M. F. O papel estratégico do departamento contábil: práticas, desafios e inovações. **RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar**, v. 5, n. 5, p. e555290-e555290, 2024. DOI: <https://doi.org/10.47820/recima21.v5i5.5290>

PIRES, C. A.; OKADA, R. H. Manutenção preditiva: estratégia de produção e redução de custos. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 635-647, 2020. DOI: <https://doi.org/10.31510/infav.17i1.781>

REZENDE, E. C.; GOMES, D. L. Análise dos resultados obtidos com aplicação de princípios da gestão de ativos no processo de inspeção de equipamentos em uma pelotização. **Anais do IV Simpósio de Engenharia de Produção**, Recife, PE, 2016. Disponível em: <https://encurtador.com.br/XW7s6>

SANTOS, D. M. P. **MEMP**: método de manutenção preditiva aplicado em máquinas de solda industriais. 2019. 74 f. Trabalho de conclusão de curso de graduação (Bacharelado em Engenharia de Software) - Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara-AM, 2019. Disponível em: <http://rii.ufam.edu.br/handle/prefix/5706>

SANTOS, P. et al. Avaliando o potencial da integração da inteligência artificial ao building information modelling (BIM) na Indústria 4.0. **5º Congresso Português de Building Information Modelling**, p. 275-286, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21814/uminho.ed.142.22>

SELLITTO, M A. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Production**, v. 15, p. 44-59, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132005000100005>

SEVERO, B. B.; TROJAN, F.; KOVALESKI, J. L. Manutenção preditiva por ultrassom. **III Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**. Ponta Grossa, PR, 2013. Disponível em: <https://encurtador.com.br/WNaTY>

SILVA, M. R. S. **Confiabilidade e manutenção industrial**. 2022. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Faculdade Pitágoras de Uberlândia. Uberlândia, MG, 2022. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br//handle/123456789/52307>

SILVA, D. L. F. F.; ABREU, T. A.; DUARTE, J. P. B. S. Análise de vibração e os seus benefícios no ambiente industrial. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 9, n. 10, p. 3451-3462, 2023. DOI: <https://doi.org/10.51891/rease.v9i10.11673>

SILVA, D. O. et al. Manutenção preditiva-análise de vibrações na indústria 4.0. **Revista Foco**, v. 16, n. 11, p. e3628-e3628, 2023. DOI: <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v16n11-104>

SOUZA, V. C. et al. Utilização das tecnologias da indústria 4.0 na manutenção preditiva através do monitoramento de equipamentos e instalações. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 1, p. 7063-7083, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv7n3-691>

SOUZA, R. A. **Planejamento estratégico de manutenção**: Otimização do processo industrial metalúrgico reduzindo o tempo de parada das máquinas (prensa, fresadora, torno mecânico, máquina de solda, ponte rolante e compressor de ar comprimido). 2017. 68 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Universitário Augusto Motta, Rio de Janeiro, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.18665.85601>

TOLEDO JÚNIOR, E. G. Manutenção predial. **Revista Obras Civis**, v. 9, n. 1, p. 34-37, 2020. Disponível em: <https://portaldeperiodicos.marinha.mil.br/index.php/obrascivis/article/view/1839/1811>

TONDATO, R. **Manutenção produtiva total: estudo de caso na indústria**. 2004. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 119. 2004. 118 p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/5167>

TORRES, F. P. **Aumento da disponibilidade operacional por meio da manutenção preventiva aplicada em chave hidráulica de tubos na indústria do petróleo**. 2022. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/7865>

TREVISAN, R.; REGULY, A. Análise de desgaste em mancais de rolamento através de lubrificação assistida por ultrassom. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, v. 6, n. 3, p. 122-139, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.4013/ete.2010.63.02>

VIEGAS JUNIOR, D. M. Otimização na disponibilidade física de máquinas e equipamentos de mineração. **Humanas em Perspectiva**, v. 10, p. 416-439, 2023. DOI: <https://doi.org/10.51249/hp10.2024.1933>

Os autores declaram não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.