

APLICAÇÃO DE SENSORES NA MANUTENÇÃO PREDITIVA: DESAFIOS E BENEFÍCIOS EM EMPRESAS DE USINAGEM DE PANAMBI

Kauane Bottega Oliveski¹, Julian Cezar Giacomini¹

¹Instituto Federal Farroupilha, Panambi – RS, Brasil

e-mail: kauane.2022005698@aluno.iffar.edu.br, julian.giacomini@iffarroupilha.edu.br

Resumo – O presente estudo analisa a aplicação de tecnologias de sensores na manutenção preditiva em empresas do setor de usinagem metálica em Panambi, com foco nos tipos de sensores utilizados, desafios práticos e benefícios observados na eficiência operacional. A pesquisa combina revisão bibliográfica sobre sensores e manutenção preditiva com um estudo de caso qualitativo, incluindo entrevistas e reuniões com gestores de empresas de usinagem (Kepler Weber e Bruning Tecnometal) e fornecedores de sensores (Acoem e Dynamox). Os resultados revelam que, apesar dos desafios específicos do ambiente de usinagem, como variações de rotação e interferências, a implementação de sensores de vibração e temperatura proporciona benefícios significativos, incluindo redução de paradas não programadas e proteção de equipamentos críticos. O estudo de caso da Kepler Weber demonstra uma economia significativa de custos evitados, equivalente a aproximadamente 1,174% do valor investido, evidenciando a eficácia da manutenção preditiva baseada em sensores. O tempo para alcançar essa economia foi de 180 dias, o que demonstra a rápida recuperação do investimento e os benefícios financeiros decorrentes da redução de paradas não programadas, reparos e danos aos equipamentos. A análise comparativa dos sensores disponíveis no mercado (Tractian Smart Trac Ultra, WEG WEGscan 100, Acoem Eagle e Dynamox DynaLogger HF+) fornece orientações para seleção adequada conforme as necessidades específicas de cada indústria. Conclui-se que, apesar dos desafios iniciais de implementação, a manutenção preditiva com sensores representa uma evolução necessária para as empresas de usinagem que buscam maior competitividade através da redução de custos operacionais e aumento da disponibilidade dos equipamentos.

Palavras-Chave - Manutenção preditiva; Sensores industriais; Vibração; Temperatura; Usinagem.

APPLICATION OF SENSORS IN PREDICTIVE MAINTENANCE: CHALLENGES AND BENEFITS IN MACHINING COMPANIES IN PANAMBI

Abstract – This study analyzes the application of sensor technologies in predictive maintenance within companies in the metal machining sector in Panambi, focusing on the types of sensors used, practical challenges, and observed benefits in operational efficiency. The research combines a literature review on sensors and predictive maintenance with a qualitative case study, including interviews and meetings with managers from machining companies (Kepler Weber and Bruning Tecnometal) and

sensor suppliers (Acoem and Dynamox). The results reveal that despite the specific challenges of the machining environment, such as rotation variations and interference, the implementation of vibration and temperature sensors provides significant benefits, including reduced unplanned downtime and protection of critical equipment. The case study of Kepler Weber demonstrates a significant cost avoidance, equivalent to approximately 1,174% of the invested amount, highlighting the effectiveness of predictive maintenance based on sensors. The time to achieve this saving was 180 days, which demonstrates the rapid recovery of the investment and the financial benefits resulting from the reduction of unplanned downtime, repairs, and equipment damage. A comparative analysis of sensors available on the market (Tractian Smart Trac Ultra, WEG WEGscan 100, Acoem Eagle, and Dynamox DynaLogger HF+) provides guidance for appropriate selection according to the specific needs of each industry. It is concluded that, despite the initial implementation challenges, predictive maintenance with sensors represents a necessary evolution for machining companies seeking greater competitiveness through reduced operational costs and increased equipment availability.

Keywords - Predictive maintenance; Industrial sensors; Vibration; Temperature; Machining.

NOMENCLATURA

RCM	Reliability Centered Maintenance.
TPM	Total Productive Maintenance.
ROI	Return on Investment.
TCC	Trabalho de conclusão de curso.
PF	Potencial de falha
CNC	Computer Numerical Control.
IoT	Internet of Things.
ISO	International Organization for Standardization.
RPM	Rotações por minuto.
CLP	Controlador Lógico Programável
IP	Índice de Proteção
FFT	Fast Fourier Transform
IA	Inteligencia Artificial

I. INTRODUÇÃO

A manutenção industrial tem evoluído significativamente nas últimas décadas, passando de abordagens puramente reativas para estratégias cada vez mais preventivas e preditivas. Nesse contexto, a aplicação de sensores para

monitoramento de condições de máquinas e equipamentos tem se mostrado uma ferramenta valiosa para identificar potenciais falhas antes que ocorram, permitindo intervenções planejadas e minimizando paradas não programadas [1].

No setor de usinagem metálica, caracterizado por processos de alta precisão e equipamentos de valor elevado, a implementação de tecnologias de manutenção preditiva apresenta tanto oportunidades quanto desafios específicos. A cidade de Panambi, conhecida como a "Cidade das Máquinas" no Rio Grande do Sul, abriga importantes empresas do setor metalúrgico, tornando-se um campo relevante para investigação das práticas de manutenção preditiva e seus impactos na eficiência operacional.

Este trabalho tem como objetivo analisar como as empresas de usinagem de Panambi utilizam sensores industriais na manutenção preditiva, identificando os tipos de sensores empregados, suas aplicações, os principais desafios enfrentados na implementação e os benefícios percebidos na operação das máquinas. A pesquisa busca contribuir para o entendimento das melhores práticas e oportunidades de melhoria neste campo, fornecendo *insights* valiosos para empresas que buscam aprimorar suas estratégias de manutenção.

A relevância deste estudo se justifica pelo potencial impacto econômico e operacional que a manutenção preditiva pode proporcionar às empresas do setor, incluindo redução de custos com manutenção corretiva, aumento da vida útil dos equipamentos, diminuição de paradas não programadas e melhoria na qualidade dos produtos. Além disso, a análise comparativa de diferentes tecnologias de sensores disponíveis no mercado pode auxiliar na tomada de decisão sobre investimentos nesta área.

Nas seções seguintes, serão apresentadas a metodologia utilizada na pesquisa, uma revisão bibliográfica sobre manutenção preditiva e sensores industriais, os resultados obtidos a partir das entrevistas e análises realizadas, e as conclusões do estudo, incluindo recomendações para implementação eficaz de sistemas de monitoramento baseados em sensores no contexto da indústria de usinagem.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A manutenção industrial é um conjunto de atividades que visa garantir a disponibilidade, confiabilidade e segurança dos equipamentos e instalações, ao menor custo possível. Ao longo do tempo, as estratégias de manutenção evoluíram significativamente, passando de abordagens reativas para métodos cada vez mais preventivos e preditivos. Essa evolução reflete a crescente complexidade dos equipamentos industriais e a necessidade de maximizar sua disponibilidade e vida útil [2].

A. Tipos de Manutenção Industrial

A literatura classifica a manutenção em três tipos principais: corretiva, preventiva e preditiva. Cada uma dessas abordagens possui características, vantagens e limitações específicas que determinam sua adequação a diferentes contextos. A Tabela 1 sintetiza as principais diferenças, destacando as principais características de cada uma.

TABELA 1
Tipos de manutenção industrial

	Corretiva	Preventiva	Preditiva
Motivo	Falha	Tempo/ Uso	Condição/ Dados
Objetivo	Reparar	Prevenir	Prever/ Otimizar
Custo Típico	Alto/Imprevisível	Médio/ Planejado	Otimizado/ Variável
Vantagem	Simples	Reduz Falhas	Maximiza vida útil
Desvantagem	Paradas não planejadas	Intervenções desnecessárias	Requer investimento inicial

Fonte: [2], [4].

A manutenção corretiva é realizada após a ocorrência de uma falha, com o objetivo de restaurar o equipamento à sua condição operacional. Subdividida em não planejada (emergencial) e planejada. A manutenção corretiva não planejada ocorre de forma aleatória, quando o equipamento falha inesperadamente, geralmente resultando em paradas não programadas e custos elevados. Já a manutenção corretiva planejada é realizada quando se detecta uma anomalia, mas opta-se por continuar a operação até um momento oportuno para intervenção [3].

A manutenção preventiva, por sua vez, é realizada em intervalos predeterminados, seguindo critérios prescritos, com o objetivo de reduzir a probabilidade de falha ou degradação do funcionamento do equipamento. Baseia-se em intervalos fixos de tempo ou ciclos de operação, independentemente da condição real do equipamento. Embora reduza a incidência de falhas inesperadas, essa abordagem pode resultar em intervenções desnecessárias e substituição prematura de componentes [4].

A manutenção preditiva representa uma evolução, pois baseia-se na condição real do equipamento, determinada por meio de monitoramento contínuo ou periódico de parâmetros que indicam seu estado de funcionamento. Permite prever o momento mais adequado para a intervenção, maximizando a vida útil dos componentes e minimizando paradas desnecessárias. Esta abordagem requer investimentos em tecnologias de monitoramento, como sensores e sistemas de análise de dados, mas oferece potencial para redução significativa dos custos totais de manutenção [5].

Além dos três tipos principais, a literatura menciona a manutenção detectiva, focada na identificação de falhas ocultas em sistemas de proteção, e a manutenção proativa, que busca identificar e eliminar as causas fundamentais das falhas. Mais recentemente, conceitos como Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM - *Reliability Centered Maintenance*) e Manutenção Produtiva Total (TPM - *Total Productive Maintenance*) têm ganhado destaque como abordagens integradas que combinam elementos dos diferentes tipos de manutenção [2], [6].

Um aspecto fundamental a ser destacado refere-se às gerações da manutenção industrial, que atualmente são classificadas em quatro distintas fases evolutivas. Cada uma dessas gerações representa uma abordagem e um nível de desenvolvimento tecnológico e gerencial na área de manutenção. Para melhor compreensão, a Figura 1 ilustra essas quatro gerações, evidenciando suas características e a evolução do setor.

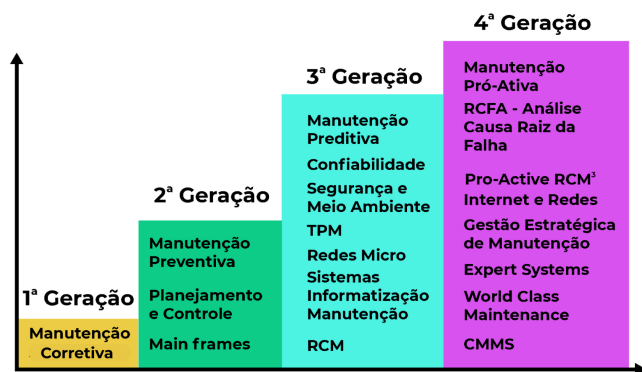


Fig. 1. Gerações da Manutenção. Fonte: [7].

B. Sensores na Manutenção Preditiva

Os sensores são dispositivos que convertem grandezas físicas em sinais elétricos que podem ser interpretados por sistemas de monitoramento. Na manutenção preditiva, os sensores são fundamentais para a coleta de dados sobre a condição dos equipamentos. Os principais parâmetros monitorados na manutenção preditiva incluem vibração, temperatura, pressão, vazão, análise de óleo, corrente elétrica e emissão acústica [8].

A vibração é um dos parâmetros mais utilizados na manutenção preditiva, especialmente para equipamentos rotativos. A análise de vibração permite detectar uma ampla gama de problemas, como desbalanceamento, desalinhamento, folgas mecânicas, falhas em rolamentos e engrenagens, entre outros. Os sensores de vibração mais comuns são acelerômetros piezoelétricos, que medem a aceleração do movimento vibratório [9].

A temperatura é outro parâmetro fundamental, pois muitas falhas mecânicas e elétricas manifestam-se através de aumento anormal de temperatura. O monitoramento pode ser realizado por meio de termopares, termistores, sensores infravermelhos ou câmeras termográficas. O aumento de temperatura pode indicar problemas como atrito excessivo, sobrecarga, falhas de lubrificação ou problemas em circuitos elétricos [10].

Os sensores de pressão são utilizados principalmente em sistemas hidráulicos e pneumáticos, permitindo detectar vazamentos, obstruções ou desgaste de componentes. Já os sensores de vazão monitoram o fluxo de fluidos, sendo úteis para identificar problemas em bombas, válvulas e tubulações [8]. A análise de óleo, embora não utilize sensores fixos nos equipamentos, é uma técnica importante de manutenção preditiva que permite avaliar o estado de lubrificação e identificar desgaste anormal através da presença de partículas metálicas no óleo. Sensores de corrente elétrica, por sua vez, são utilizados para monitorar motores e outros equipamentos elétricos, detectando problemas como sobrecarga, curto-circuito ou falhas de isolamento [10]. Mais recentemente, sensores de emissão acústica têm sido aplicados para detectar falhas incipientes em estágio muito inicial, captando ondas de alta frequência geradas por processos como formação de trincas, atrito ou impacto [11].

C. Aplicação de Sensores em Ambientes de Usinagem

A usinagem é um processo fundamental na indústria de manufatura, consistindo na remoção controlada de material

de uma peça bruta (geralmente metálica, mas também aplicável a outros materiais) para conferir-lhe forma, dimensões e acabamento superficial precisos, conforme especificado em um projeto. Esse processo é realizado por meio de ferramentas de corte e máquinas-ferramenta, como tornos, fresadoras e centros de usinagem, que moldam a matéria-prima através do desgaste mecânico e corte [12, 13].

A aplicação de sensores em ambientes de usinagem apresenta desafios específicos devido às características desses processos, como condições variáveis de operação, mudanças de velocidade, carga e temperatura, o que pode dificultar a interpretação dos dados coletados pelos sensores [14]. No contexto da usinagem, os sensores podem ser aplicados tanto para monitoramento do processo quanto para manutenção preditiva dos equipamentos. O monitoramento do processo visa garantir a qualidade do produto e detectar anomalias como desgaste excessivo de ferramentas, vibrações indesejadas ou problemas de fixação. Já o monitoramento para manutenção preditiva foca na condição dos componentes da máquina, como rolamentos, fusos, guias e sistemas hidráulicos [15].

No ambiente de usinagem, os dispositivos de monitoramento mais utilizados incluem sensores de força (dinamômetros), sensores de vibração (acelerômetros), sensores de emissão acústica, sensores de temperatura e sensores de corrente elétrica. Cada tipo de sensor oferece vantagens e limitações específicas, sendo comum a utilização de múltiplos sensores para obter uma visão mais completa da condição do equipamento [16].

Um desafio particular em ambientes de usinagem é a presença de fluidos de corte, cavacos e poeira metálica, que podem afetar o funcionamento dos sensores. Isso requer a utilização de sensores com proteção adequada [classificação de Índice de Proteção (IP)] e posicionamento estratégico para evitar danos e garantir medições confiáveis [14].

Outro aspecto relevante é a integração dos dados dos sensores com sistemas de controle e gestão da manutenção. A tendência é a implementação de sistemas ciber-físicos que combinam sensores, comunicação em rede e análise avançada de dados para criar "máquinas inteligentes" capazes de autodiagnóstico e, em alguns casos, autocorreção. Destaca-se a importância da análise adequada dos dados coletados pelos sensores, como o uso de técnicas de análise espectral, *wavelets* (são funções matemáticas usadas para decompor sinais em diferentes escalas ou frequências), redes neurais e outras abordagens de Inteligência Artificial (IA) que têm sido aplicadas para extrair informações relevantes dos sinais e identificar padrões indicativos de falhas incipientes [9], [17].

D. Benefícios e Desafios da Manutenção Preditiva

A implementação de manutenção preditiva baseada em sensores oferece diversos benefícios potenciais, incluindo a redução de paradas não programadas, aumento da vida útil dos equipamentos, redução de custos de manutenção, melhoria na qualidade dos produtos e aumento da segurança operacional [18], [19].

Um conceito fundamental que sustenta a eficácia da manutenção preditiva é a curva PF (Potencial de Falha), conforme a Figura 2. Esta curva representa graficamente a

relação entre a condição de um ativo e o tempo, ilustrando intervalo entre o ponto em que uma falha potencial se torna detectável (P) e o ponto em que ocorre a falha funcional (F), ou seja, a parada do equipamento. A manutenção preditiva, com o auxílio de sensores, visa justamente identificar os sinais de degradação o mais próximo possível do ponto P, permitindo que a intervenção de manutenção seja planejada e executada antes da falha funcional, maximizando assim os benefícios mencionados [20], [7].

No entanto, a implementação de manutenção preditiva com sensores também enfrenta desafios significativos, como os altos custos iniciais de aquisição e instalação de sensores e sistemas de monitoramento, necessidade de pessoal qualificado para interpretar os dados, dificuldades na integração com sistemas existentes e resistência à mudança por parte das equipes de manutenção. Outro desafio importante é a definição de parâmetros e limites adequados para identificação de condições anormais, a determinação de limiares que minimizem falsos alarmes e falhas não detectadas requer conhecimento especializado e, muitas vezes, um período de aprendizado para ajuste fino do sistema [21], [22].

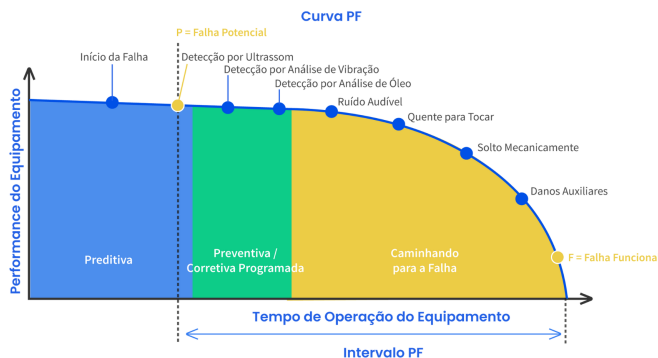


Fig. 2. Curva potencial de falha. Fonte: [7].

A literatura enfatiza a importância de implementar sistemas de manutenção preditiva gradualmente, começando pelos equipamentos críticos, onde o impacto de falhas é maior. Recomenda-se expandir o escopo à medida que a equipe ganha experiência e confiança na tecnologia. A análise bibliográfica comprova a eficácia das técnicas preditivas na otimização da manutenção, inclusive em áreas correlatas, conforme demonstram os estudos de caso a seguir.

O primeiro caso analisou a vibração e a temperatura em um torno CNC (Controle Numérico Computadorizado) modelo ROMI GL 240M. Para isso, foram instalados dois sensores de vibração e dois sensores de temperatura, organizados em conjuntos de temperatura e vibração, distribuídos em dois pontos do equipamento: no eixo X superior e no eixo motriz. Vale ressaltar que o torno possui cinco eixos. O monitoramento foi realizado em quatro pontos: os sensores S1 e S2 foram responsáveis pela medição da vibração, enquanto os sensores S3 e S4 monitoram a temperatura. No eixo X superior, foram instalados os sensores S1 (vibração) e S3 (temperatura), e no eixo motriz, os sensores S2 (vibração) e S4 (temperatura). Os resultados indicaram que o sensor S1 manteve um nível de vibração constante ao longo do tempo. Por outro lado, o sensor S2 apresentou uma tendência de aumento gradual nos níveis de vibração. Apesar desse crescimento, os valores registrados

pelo S2 permaneceram dentro do limite aceitável estabelecido pela Organização Internacional de Normalização (ISO - *International Organization for Standardization*), conforme a norma ISO 2372 para máquinas Classe 1 (até 1,8 mm/s). No entanto, essa tendência ascendente requer atenção contínua, pois a manutenção desse padrão pode eventualmente ultrapassar os limites, sinalizando a necessidade de intervenção para garantir a integridade e o desempenho do equipamento. Paralelamente, o monitoramento da temperatura pelos sensores S3 e S4 demonstrou estabilidade térmica, sem variações significativas nos dados, que se mantiveram constantes. Isso indica que os componentes operam dentro das faixas de temperatura esperadas e seguras, conforme as referências do fabricante SKF, não havendo indícios de anomalias térmicas. [23], [24].

Um segundo estudo elaborou um plano de manutenção preventiva para ser implementado em um Centro de Usinagem CNC ROMI *Discovery* 760. Esse plano contempla inspeção, limpeza, lubrificação e monitoramento dos componentes essenciais, com o objetivo de aumentar a confiabilidade operacional do equipamento. Além disso, foram incorporadas a filosofia Kaizen (melhoria contínua) e o método 5S (Utilização, Organização, Limpeza, Padronização e Disciplina), promovendo maior eficiência na manutenção e fomentando uma mudança cultural, que estimula a responsabilidade compartilhada [25].

O terceiro caso consistiu na implementação de uma metodologia adaptada de gestão da manutenção, com foco na melhoria da disponibilidade dos equipamentos, aplicada em um setor de usinagem que contava com tornos mecânicos, fresas e torno CNC. A análise revelou um impacto positivo e rápido da metodologia, evidenciado por um aumento significativo de 8,53% na disponibilidade geral em um curto período. Esse ganho refletiu diretamente no aumento da capacidade produtiva do setor. O estudo concentrou-se no motor elétrico, identificado como componente crítico, avaliando a frequência de falhas antes e após a adoção da nova gestão. Foi observada uma redução acentuada nas falhas desse componente, o que justifica sua escolha como indicador-chave, dada a influência direta na disponibilidade geral dos equipamentos. A diminuição das falhas foi atribuída, em grande parte, à capacitação e conscientização dos colaboradores, que promoveram uma transformação cultural essencial para superar o cenário anterior de negligência em relação à manutenção. Como resultado, houve um aumento na confiabilidade dos equipamentos e uma redução significativa nas paradas não planejadas causadas por falhas nos motores [26].

O quarto estudo propôs um programa de manutenção preventiva para o centro de usinagem ROMI *Discovery*, fundamentado em revisão bibliográfica e manuais técnicos. O programa detalhou um cronograma abrangente de atividades, que variam desde intervenções diárias até anuais. Os resultados evidenciaram melhorias significativas na eficiência operacional e na vida útil dos equipamentos. Entretanto, o sucesso da implementação depende diretamente da qualificação dos profissionais envolvidos e da disponibilidade adequada de tempo para a realização das intervenções [13], [16].

Concluindo, a manutenção preditiva, embora valiosa, é baseada em sensores e dados, não substitui outras abordagens de manutenção. Uma estratégia eficaz combina elementos das modalidades corretiva, preventiva e preditiva. A aplicação de cada tipo deve ser adaptada a cada equipamento, considerando sua criticidade, padrões de falha e custos associados.

III. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo combina pesquisa bibliográfica sobre sensores e manutenção preditiva com um estudo de caso qualitativo. Foram realizadas entrevistas com gestores de manutenção no segmento de usinagem (Kepler Weber e Bruning Tecnometal) e fornecedores de sensores (Acoem e Dynamox). Os dados coletados foram analisados para mapear práticas, dificuldades e resultados práticos do uso de sensores, sendo comparados com a literatura para identificar boas práticas e oportunidades de melhoria.

A pesquisa bibliográfica abrangeu artigos científicos, livros, manuais técnicos e publicações especializadas sobre manutenção industrial, com ênfase em manutenção preditiva e tecnologias de sensores aplicáveis ao setor de usinagem. Foram consultadas bases de dados acadêmicas e publicações técnicas do setor para estabelecer o referencial teórico que fundamentou a análise dos dados coletados em campo [27].

O estudo de caso qualitativo caracteriza-se por ser uma investigação minuciosa de um fenômeno particular, seja ele um indivíduo, grupo ou situação, conduzida em seu ambiente natural e real. Esse método utiliza diversas fontes de informação para alcançar uma compreensão ampla e profunda do caso analisado, buscando captar sua complexidade e especificidade em detalhes [28]. No presente estudo, a pesquisa envolveu duas empresas representativas do setor de usinagem em Panambi: Kepler Weber e Bruning Tecnometal.

A seleção dessas empresas considerou sua relevância no setor, o uso de tecnologias de sensores em seus processos de manutenção e a disponibilidade para participar da pesquisa. Foram realizadas entrevistas semiestruturadas com gestores de manutenção e técnicos responsáveis pela implementação e operação dos sistemas de monitoramento baseados em sensores.

Adicionalmente, foram consultados dois fornecedores de tecnologias de sensores: Acoem e Dynamox. Essas consultas permitiram compreender as características técnicas dos sensores disponíveis no mercado, suas aplicações recomendadas, limitações e tendências tecnológicas. Também foram coletados dados sobre custos, modelos de negócio (compra ou assinatura) e suporte técnico oferecido.

Os dados coletados foram organizados e analisados qualitativamente, buscando identificar padrões, desafios comuns, soluções implementadas e resultados obtidos. A análise considerou aspectos técnicos (tipos de sensores, parâmetros monitorados, integração com sistemas), organizacionais (processos de manutenção, capacitação de equipes) e econômicos (investimentos, retorno sobre investimento, custos evitados).

Por fim, foi realizada uma análise comparativa entre as práticas observadas nas empresas estudadas e as

recomendações da literatura, identificando convergências, divergências e oportunidades de melhoria. Esta comparação permitiu elaborar recomendações fundamentadas tanto na teoria quanto na prática observada no contexto específico das empresas de usinagem de Panambi.

É pertinente observar que, como toda pesquisa qualitativa baseada em estudo de caso, este trabalho apresenta algumas limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A dependência dos dados fornecidos pelas empresas pode restringir a abrangência e a profundidade da análise, uma vez que as informações estão sujeitas à disponibilidade e à precisão dos dados compartilhados pelos gestores e técnicos. Além disso, há a possibilidade de vies nas entrevistas, decorrente de interesses institucionais, restrições de confidencialidade ou percepções subjetivas dos participantes. Por se tratar de um estudo focado em duas empresas específicas do setor de usinagem de Panambi, os resultados e recomendações obtidos podem não ser totalmente generalizáveis para outros contextos industriais ou regiões. Também é importante considerar que o acesso restrito a informações sensíveis pode ter limitado a análise detalhada de certos aspectos do uso de sensores.

IV. RESULTADOS

O objetivo era alcançar as maiores empresas de Panambi na área de usinagem metálica, incluindo qualquer empresa com etapas de usinagem em seu processo produtivo. No entanto, foram realizadas entrevistas e reuniões online com empresas representativas do setor, o que permitiu coletar dados relevantes para a pesquisa. As empresas que participaram foram a Kepler Weber e a Bruning Tecnometal. As empresas fabricantes de sensores consultadas foram a Acoem e a Dynamox, sendo que somente a Dynamox forneceu sensores para as empresas mencionadas no passado, porém atualmente não realiza mais esse fornecimento.

A. Resultados obtidos com a Acoem

Nas conversas com a Acoem, foram identificados três tipos principais de aplicações de sensores, segundo a Figura 3. Os sensores portáteis realizam medições *offline*, com a leitura disponível apenas no aparelho. Os *wireless* usam conceitos de *Internet das Coisas* (IoT - *Internet of Things*) para transferir dados, realizando medições em intervalos de tempo definidos, com a leitura *online* mostrando o último valor medido. Já os sensores cabeados monitoram em tempo real, com comunicação por cabo que garante estabilidade, enviando as leituras para um Controlador Lógico Programável (CLP) que pode tomar decisões, como parar o equipamento se necessário [29].



Fig. 3. Modelos desenvolvidos pela Acoem. Fonte: [29].

Um ponto importante destacado pela Acoem é que, atualmente, não existem sensores no mercado que atuem verdadeiramente *online*, pois os sensores fixos nas máquinas não fazem leituras em tempo real, mas são programados para medir em intervalos específicos. Para ser considerada *online*, a medição precisaria ocorrer em menos de um segundo. Os sensores da Acoem usam Inteligência Artificial para analisar e identificar falhas, comparando vibrações e temperaturas coletadas com dados de referência dos fabricantes [29], [30]. É importante notar que, apesar de fornecer informações técnicas, a Acoem não forneceu sensores para as empresas pesquisadas, pois seu foco de mercado está mais voltado para os setores de gases e armamento.

B. Resultados obtidos com a Dynamox

A Dynamox forneceu informações técnicas detalhadas sobre seus sensores de vibração. Segundo a empresa, existem sensores de alta frequência (até 13.000 Hz) e baixa frequência (até 2.500 Hz). Considera-se alta frequência acima de 3.000 Hz. Um dado relevante é que problemas de manutenção geralmente começam com sinais de alta frequência e, conforme se agravam, a frequência diminui. A falha costuma ocorrer quando a máquina emite sinais próximos a 500 Hz, frequência geralmente audível [31]. A Dynamox já forneceu sensores de baixa frequência para a Bruning Tecnometal, além de sensores de temperatura, frequência e outras medições de variáveis não especificadas para a Kepler Weber. Atualmente, a empresa concentra seus negócios nos setores de mineração e celulose, tendo descontinuado o fornecimento para as empresas mencionadas.

O representante da Dynamox destacou as dificuldades em realizar medições preditivas em setores de usinagem (tornos CNC, centros de usinagem). O principal desafio é definir uma condição de trabalho padrão nas máquinas para identificar falhas, pois os processos de fabricação variam muito (mudanças de rotação, troca de ferramentas). Além disso, o ciclo de trabalho da máquina dificulta o controle e a detecção de falhas devido a interferências como rotações irregulares, vibrações de rolamentos, desgaste da ferramenta e ruídos do motor. Outro obstáculo é distinguir essas interferências das condições reais de falha [31].

C. Resultados da Kepler Weber e Bruning Tecnometal

Na Kepler Weber, as principais análises de manutenção preditiva envolvem medição de vibração, temperatura e análise de óleo. Atualmente, usam sensores WEGscan 100 da WEG (sem fio) em 40 pontos de monitoramento, o que permite identificar o comportamento padrão das máquinas e centralizar o monitoramento. A distribuição atual da manutenção na empresa é: 40% corretiva não planejada (emergencial), 30% corretiva planejada, 20% preventiva e 10% preditiva, mostrando uma predominância de abordagens reativas.

A Bruning Tecnometal possui atualmente 74 pontos de monitoramento, todos com sensores da Tractian, distribuídos em máquinas de usinagem, compressores, torres de resfriamento e jato a granel. Essa ampla cobertura demonstra um investimento significativo da empresa em manutenção preditiva. Embora a Dynamox tenha fornecido sensores para

a Bruning no passado, a empresa optou por padronizar seu sistema com a tecnologia da Tractian, buscando maior integração e consistência nos dados.

D. Estudo de Caso: Aplicação de Sensores na Kepler Weber

Um estudo de caso detalhado da Kepler Weber demonstra resultados concretos da aplicação de sensores WEGscan para manutenção preditiva em três equipamentos críticos da empresa, de acordo com a Figura 4 [30]. A documentação apresenta os problemas detectados, ações tomadas, e uma análise financeira.

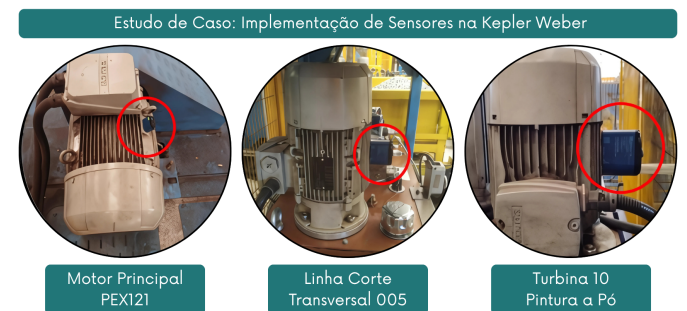


Fig. 4. Aplicação de sensores na Kepler Weber. Fonte: [30].

O primeiro caso analisado foi o Motor Principal – PEX121, um motor de 75 kW que aciona o sistema principal de perfilação na linha de produção de silos metálicos. Este equipamento é considerado crítico, pois sua parada interrompe completamente a linha de produção, com impacto direto na capacidade de entrega da fábrica. Os sensores detectaram correias apresentando desgaste através de padrões anormais de vibração. Os gráficos de vibração mostraram claramente as "janelas de atuação" onde as anomalias foram detectadas, com picos de vibração que ultrapassaram em 40% os valores de referência estabelecidos para operação normal. O investimento total foi de R\$ 3.800,00 (sensor WEGscan: R\$ 1.800,00, conjunto de 6 correias: R\$ 1.500,00 e 2 rolamentos: R\$ 500,00), enquanto os custos evitados somaram R\$ 27.900,00 (motor: R\$ 12.000,00 e 4 dias de linha parada: R\$ 15.900,00), considerando que o custo de linha parada por hora é de R\$ 659,89 [30].

O segundo caso envolveu a Linha de Corte Transversal (LCT005), um equipamento de corte automatizado utilizado para dimensionar chapas metálicas conforme especificações de projeto. Esta máquina possui um sistema hidráulico complexo que, historicamente, apresentava falhas recorrentes. Os sensores detectaram um aumento abrupto de vibração no motor da unidade hidráulica, com valores 65% acima do padrão normal de operação. As ações tomadas incluíram a troca de filtro saturado, aplicação de paliativo e posterior substituição do rolamento com folga excessiva no motor, além do reposicionamento do sensor que havia sido deslocado devido à alta vibração. O histórico mostrou que ocorrências similares anteriores resultaram em 81 horas de máquina parada em 2018 (custo atualizado de R\$24.279,65) e 64 horas em 2023 (custo de R\$27.714,77). Com um investimento de apenas R\$ 1.800,00 (sensor WEGscan), a empresa evitou custos de R\$ 72.100,00 (bomba hidráulica: R\$ 24.000,00, motor: R\$ 15.000,00 e 4 dias de linha parada: R\$ 33.100,00), com custo de linha parada por hora de R\$ 344,52 [30]. Este caso é particularmente significativo porque

demonstra como a detecção precoce evitou danos em cascata que tipicamente ocorrem quando falhas no sistema hidráulico não são tratadas a tempo.

O terceiro caso foi na Turbina 10 – Pintura a Pó, um equipamento utilizado no sistema de acabamento de peças metálicas. Esta turbina faz parte de um conjunto de 12 unidades que operam no sistema de pintura, sendo responsável pela aplicação uniforme do revestimento em pó. Os sensores identificaram um aumento contínuo de vibração e ruído, com valores que cresceram gradualmente até atingir 85% acima do padrão normal em um período de três semanas. A análise diagnóstica identificou o rolamento danificado, levando à substituição do conjunto. O investimento foi de R\$2.900,00 (sensor WEGscan: R\$1.800,00 e 3 rolamentos: R\$1.100,00), evitando o custo de R\$6.500,00 com a substituição do motor. Neste caso específico, foi observado que "a parada de uma turbina não influencia na parada da linha completa", pois o sistema pode operar com capacidade reduzida utilizando as demais turbinas, o que reduz o impacto financeiro da falha, mas ainda justifica o investimento em monitoramento para evitar a degradação da qualidade do acabamento das peças [32]. A análise comparativa dos três casos revela padrões interessantes sobre o Retorno sobre Investimento (ROI - *Return on Investment*.) em diferentes tipos de equipamentos:

1. Motor Principal – PEX121: ROI de 634% (R\$ 27.900,00 em custos evitados para um investimento de R\$ 3.800,00);
2. LCT005: ROI de 3.906% (R\$ 72.100,00 em custos evitados para um investimento de R\$ 1.800,00);
3. Turbina 10: ROI de 124% (R\$6.500,00 em custos evitados para um investimento de R\$2.900,00).

Esta comparação demonstra que, embora todos os casos apresentem retorno positivo, os sistemas hidráulicos e equipamentos críticos de linha oferecem os maiores benefícios financeiros para implementação de sensores de monitoramento. O retorno total sobre o investimento documentado pela Kepler Weber foi de R\$98.000,00, representando aproximadamente 12,8 vezes o valor investido em sensores e componentes (R\$7.700,00) [32]. Este caso ilustra claramente a eficácia da detecção precoce, onde sensores de custo relativamente baixo (R\$1.800,00 por unidade) demonstraram capacidade de identificar problemas antes de falhas, prevenindo paradas prolongadas que, historicamente, duravam entre 64 e 81 horas.

Além do retorno financeiro, o estudo de caso da Kepler Weber demonstra uma abordagem estruturada de manutenção, com processo claro de identificação, diagnóstico, intervenção e acompanhamento posterior da efetividade. Esta metodologia, aliada à tecnologia de sensores, evitou paradas não programadas, e protegeu componentes de alto valor (motores, bombas) de danos que exigiram substituição completa.

E. Análise Comparativa de Sensores Industriais

A análise comparativa de sensores industriais disponíveis no mercado mostra diferenças importantes em características técnicas, conectividade, autonomia, aplicações e custos. Os principais sensores analisados foram o Tractian Smart Trac Ultra, WEG WEGscan 100, Acoem Eagle e Dynamox

DynaLogger HF+, conforme apresenta a Figura 5. A seleção desses sensores foi motivada por sua relevância prática e recomendações do setor. Especificamente, o Tractian Smart Trac Ultra é atualmente utilizado na empresa Bruning Tecnometal, enquanto o WEGscan 100 é utilizado pela Kepler Weber. Além disso, os sensores da Dynamox possuem um histórico de utilização em ambas as companhias, e a inclusão dos modelos da Acoem atende a uma recomendação direta dos gestores de manutenção. Essa combinação de critérios garante uma análise baseada na experiência real das empresas e em indicações de especialistas da área.



Fig. 5. Sensores avaliados neste estudo. Fonte: [30]-[34].

O **Tractian Smart Trac Ultra** monitora vibração, temperatura, tempo de funcionamento e rotações por minuto (RPM) em tempo real. Possui recursos como diagnóstico automático de falhas (mais de 75 modos), certificações para ambientes perigosos (ATEX, IECEx, NFPA), proteção IP69K (água e poeira), e funções como *Always Listening* (máquinas intermitentes) e RPM Encoder (RPM variável). Sua autonomia é de cerca de 3 anos (amostrando a cada 10 min) e usa comunicação sem fio de 2,4 GHz (alcance 30-50m). É recomendado para indústrias com equipamentos críticos em ambientes perigosos [33]. Em termos de custo, está na faixa premium (R\$2.500 - R\$3.500 por unidade), com modelo de assinatura mensal (a partir de R\$150/sensor) que inclui *software* e suporte.

O **WEG WEGscan 100** monitora temperatura, vibração triaxial, campo magnético e ruído estrutural. Usa tecnologias WEGsense e WEGsync, tem proteção IP66, *Bluetooth* 5.1 (alcance 100m) e autonomia da bateria de 1 ano. É adequado para empresas com muitos equipamentos e necessidade de integração com IA (compatível com WEG *Motion Fleet Management*) [34]. Apresenta boa relação custo-benefício (R\$1.800 - R\$2.200 por unidade) e licenciamento de *software* mais acessível (cerca de R\$100/mês por sensor). É a opção usada pela Kepler Weber, que busca eficiência com menor custo inicial, como demonstrado no estudo de caso que documentou um expressivo retorno sobre investimento.

O **Dynamox DynaLogger HF+** é um sensor sem fio compacto para diversas aplicações, medindo vibração triaxial e temperatura (análise espectral até 13 kHz). Tem dois modos de operação, mais de 40 métricas e é adequado para baixa velocidade (menor que 10 RPM). Possui certificações IP66/IP68/IP69/EX. É recomendado para equipamentos de baixa velocidade ou que precisam de análise de alta frequência [29]. Custa entre R\$2.000 e R\$3.000 por unidade, com opção de venda ou aluguel (a partir de R\$180/mês por sensor, com manutenção). Essa flexibilidade tem sido um

diferencial nos setores de mineração e celulose, foco da Dynamox.

O **Acoem Eagle** é um sensor sem fio para monitoramento contínuo de máquinas rotativas (vibração triaxial e temperatura). É autoalimentado (autonomia até 5 anos), tem alcance de 100 m e processamento local de sinal [indicadores avançados, (FFT - *Fast Fourier Transform* - Transformada Rápida de Fourier: é um algoritmo utilizado na matemática, engenharia e áudio, que permite a decomposição de sinais em suas componentes senoidais, facilitando a análise no domínio da frequência) FFT de envelope, filtro *Shock Finder*]. Possui sistema de alarme com 4 níveis. É recomendado para locais com limitações de infraestrutura ou difícil acesso, ideal para máquinas a partir de 100 rpm e ambientes severos [30]. Custa entre R\$3.000 e R\$4.000 por unidade, com licença de *software* em torno de R\$200/mês. Seu custo maior se justifica pela autonomia e robustez, sendo mais focado nos setores de gases e armamento.

Conforme apresenta a Tabela 2, é realizada uma análise comparativa das especificações técnicas dos sensores industriais estudados. Esta comparação abrange critérios para a seleção e aplicação desses dispositivos, incluindo os parâmetros físicos que cada um monitora, a tecnologia de comunicação sem fio empregada, o alcance efetivo de transmissão de dados, as características de alimentação (como tipo e autonomia da bateria), o grau de proteção contra intempéries (classificação IP) e as funcionalidades de processamento de sinais embarcadas.

TABELA 2
Análise Comparativa dos Sensores

Aspecto	Smart Trac Ultra	WEGscan 100	Acoem Eagle	DynaLogger HF+
Parâmetros	Vibração, temperatura, tempo de horímetro, RPM	Temperatura, vibração nos três eixos, campo magnético, ruído estrutural	Vibração em três eixos, temperatura	Vibração triaxial, temperatura
Transmissão de Dados	Protocolo sem fio de 2,4 GHz	Sem fio (<i>Bluetooth</i> 5.1)	Sem fio (ISA 100.11a / 802.15.4)	Sem fio (<i>Bluetooth</i> LE 5.3)
Alcance	30 a 50 m (raio)	100 m (ambiente industrial)	100 m	100 m (campo livre)
Alimentação	Bateria de Lítio	Bateria Li-SOC12 3.6V 17Ah	Bateria Li-SOC12 3.6V 17Ah	Bateria 3V
Autonomia	3 anos	1 ano	5 anos	4 anos
Proteção	IP69	IP66	IP67	IP68
Sistema	<i>Fault Finding Auto Diagnosis</i>	WEGsense e WEGsync	Processamento de sinal incorporado	Espectral e forma de onda e telemetria

Fonte: [30]-[34].

F. Análise de Custos dos Sensores e ROI

A análise de custos dos sensores mostra que, além do investimento inicial, as empresas devem considerar custos contínuos com licenças de *software*, manutenção, baterias e treinamento. O retorno sobre o investimento (ROI) geralmente ocorre entre 12 e 24 meses, dependendo do tamanho da empresa e da criticidade dos equipamentos [35]. Empresas maiores como a Bruning (74 pontos) conseguem

negociar melhores preços e diluir custos de infraestrutura. Empresas menores podem começar com poucos pontos em equipamentos críticos e expandir gradualmente.

O caso da Kepler Weber fornece uma análise detalhada de custos e retorno sobre investimento que merece destaque. A empresa implementou um programa piloto de monitoramento preditivo focado inicialmente em três categorias de equipamentos: motores principais de linha, sistemas hidráulicos e turbinas de acabamento. A Figura 6 apresenta uma comparação detalhada dos custos e benefícios para cada categoria.

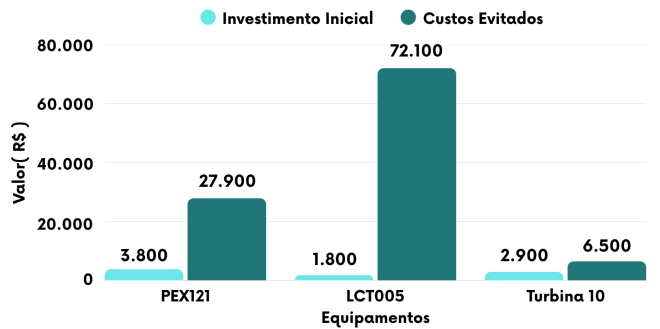


Fig. 6. Comparativo financeiro por Equipamento. Fonte: [30]

Os custos operacionais anuais incluem licenciamento de *software*, manutenção preventiva dos sensores, calibração periódica e treinamento contínuo da equipe. É importante notar que o valor total do investimento (R\$8.500,00) difere ligeiramente do valor mencionado anteriormente (R\$7.700,00) porque inclui custos adicionais de instalação e configuração inicial [32].

A análise de sensibilidade realizada pela Kepler Weber também demonstrou que, mesmo em cenários pessimistas (onde apenas 50% das falhas são detectadas precocemente), o ROI ainda permanece positivo para todos os equipamentos monitorados. Isso reforça a robustez do investimento em tecnologias de monitoramento preditivo.

G. Recomendações de Uso

Com base na análise comparativa e nos casos estudados, recomenda-se: Tractian Smart Trac Ultra para equipamentos críticos em ambientes perigosos; WEG WEGscan 100 para empresas com muitos equipamentos e necessidade de integração com IA; Acoem Eagle para locais com limitações de infraestrutura ou difícil acesso; e Dynamox DynaLogger HF+ para equipamentos de baixa velocidade ou análise de alta frequência [36].

A escolha do sensor ideal depende das necessidades de cada indústria, considerando tipos de equipamentos, ambiente, comunicação, integração, monitoramento específico, infraestrutura e orçamento (inicial e contínuo). A tendência do mercado é de sensores mais inteligentes, com maior processamento local, melhor autonomia e integração com IA, o que deve torná-los mais acessíveis e eficientes [37].

Para maximizar o retorno do investimento, recomenda-se avaliar detalhadamente as necessidades de cada planta, considerando o custo inicial, e o valor agregado na prevenção de falhas, redução de paradas e otimização da manutenção. Uma implementação gradual, começando pelos

equipamentos mais críticos, permite validar os benefícios antes de expandir para toda a planta, otimizando o uso dos recursos financeiros [38]. O estudo de caso da Kepler Weber exemplifica esta abordagem, onde a implementação focada em equipamentos estratégicos resultou em benefícios financeiros significativos e validou a eficácia da tecnologia de sensores na manutenção preditiva.

V. CONCLUSÃO

A pesquisa sobre a aplicação de sensores na manutenção preditiva em empresas de usinagem de Panambi revelou aspectos importantes relacionados aos desafios e benefícios dessa tecnologia no contexto industrial específico. A análise dos dados coletados junto às empresas Kepler Weber e Bruning Tecnometal, bem como aos fornecedores de sensores Acoem e Dynamox, possibilitou a identificação de padrões, tendências e recomendações relevantes para o setor.

Os resultados indicam que, apesar dos desafios inerentes ao ambiente de usinagem — como variações de rotação, troca frequente de ferramentas e interferências diversas —, a implementação de sensores para monitoramento de vibração e temperatura traz benefícios significativos. O estudo de caso da Kepler Weber, por exemplo, evidencia uma economia expressiva em custos evitados, totalizando R\$98.000,00 para um investimento de R\$7.700,00 em sensores e componentes, o que valida a eficácia econômica da abordagem preditiva.

A análise comparativa dos sensores disponíveis no mercado — Tractian Smart Trac Ultra, WEG WEGscan 100, Acoem Eagle e Dynamox DynaLogger HF+ — revelou que cada tecnologia apresenta características específicas que a tornam mais adequada para determinados contextos. Dessa forma, a escolha do sensor ideal deve levar em consideração fatores como o tipo de equipamento, o ambiente operacional, as necessidades de comunicação e integração, os parâmetros a serem monitorados, a infraestrutura disponível e o orçamento, tanto inicial quanto contínuo.

Outro ponto relevante identificado na pesquisa é a importância de uma abordagem estruturada para a implementação da manutenção preditiva. O caso da Kepler Weber demonstra que um processo claro de identificação, diagnóstico, intervenção e acompanhamento da efetividade é fundamental para o sucesso da estratégia. De modo semelhante, a experiência da Bruning Tecnometal, que conta com 74 pontos de monitoramento, indica que a padronização tecnológica pode trazer benefícios significativos em termos de integração e consistência dos dados.

Os desafios apontados pelos fornecedores, especialmente pela Dynamox, quanto à aplicação de sensores em ambientes de usinagem, corroboram a literatura especializada. A dificuldade em estabelecer condições padrão de operação e em distinguir interferências normais do processo de sinais indicativos de falhas demanda conhecimento especializado e, muitas vezes, um período de aprendizado para o ajuste fino dos sistemas.

Em relação à distribuição dos tipos de manutenção, os dados da Kepler Weber (40% corretiva não planejada, 30% corretiva planejada, 20% preventiva e 10% preditiva) sugerem que, mesmo em empresas que já adotam tecnologias de monitoramento, há um caminho considerável a ser

percorrido para avançar na transição para abordagens mais preditivas, indicando oportunidades para expansão e aprimoramento dos sistemas existentes.

Diante disso, as recomendações deste estudo incluem a implementação gradual dos sistemas de monitoramento, priorizando os equipamentos mais críticos; a avaliação do custo não apenas sob a ótica do investimento inicial, mas também considerando o valor agregado pela prevenção de falhas e redução de paradas; e a capacitação das equipes para a correta interpretação dos dados gerados pelos sensores.

Com base na análise realizada, o sensor WEGscan 100 destaca-se como a opção mais recomendada para aquisição entre os modelos estudados. Isso se deve ao seu custo mais baixo em comparação aos concorrentes, aliado a um alcance de comunicação aprimorado, que o torna eficaz em ambientes industriais. Embora sua bateria tenha uma autonomia estimada em um ano (a 25 °C com 24 aquisições diárias), ela pode ser facilmente substituída, garantindo a continuidade da operação. Além disso, o WEGscan coleta dados essenciais, como temperatura, vibração em três eixos e campo magnético, utilizando tecnologias WEGsense e WEGsync para a detecção antecipada de falhas. O sensor também oferece flexibilidade no monitoramento, podendo ser configurado com um, dois ou três sensores, e transmite informações em tempo real para a nuvem via Wi-Fi, Ethernet ou 3G/4G, por meio de um receptor.

Em síntese, a pesquisa conclui que, apesar dos desafios iniciais na implementação, a manutenção preditiva baseada em sensores representa uma evolução necessária para as empresas de usinagem que buscam maior competitividade, por meio da redução dos custos operacionais e do aumento da disponibilidade dos equipamentos. Os casos analisados demonstram que, quando bem aplicada, essa abordagem proporciona retornos financeiros significativos e contribui para a modernização dos processos industriais, alinhando-se às tendências da Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

- [1] 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*, Curitiba, v. 8, n. 1. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br>.
- [2] MOUBRAY, J. *Reliability-centered maintenance*. 2. ed. New York: Industrial Press, 1997.
- [3] KARDEC, A. *et al.* *Manutenção: função estratégica*. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.
- [4] XENOS, H. G. *Gerenciando a manutenção produtiva*. 2. ed. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços, 2014.
- [5] VIANA, H. R. G. *PCM: planejamento e controle da manutenção*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.
- [6] NAKAJIMA, S. *Introduction to TPM: total productive maintenance*. Cambridge: Productivity Press, 1988.
- [7] MARINELLI, I. (2022). *Manutenção Centrada na Confiabilidade - Curva do potencial de falha*. Tractian.
- [8] MOBLEY, R. K. *An introduction to predictive maintenance*. 2. ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2002.

- [9] RANDALL, R. B. Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- [10] SCHEFFER, C.; GIRDHAR, P. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- [11] MURAVIN, B. Acoustic emission science and technology. Journal of Building and Infrastructure Engineering of the Israeli Association of Engineers and Architects, v. 1, p. 4-5, 2009.
- [12] MARTINS, FJ; FABRO, E. Uso do sensor inteligente na manutenção preditiva do motor de uma extrusora. Scientia cum Industria, v. 12, n. 1, p. 45-60, 2020. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org>.
- [13] RODRIGUES NETO, J.C. Manutenção preditiva de um centro de usinagem CNC através de análise de vibrações. 2021. TCC – Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br>
- [14] TETI, R. et al. Advanced monitoring of machining operations. CIRP Annals, v. 59, n. 2, p. 717-739, 2010.
- [15] BYRNE, G. et al. Tool condition monitoring (TCM) the status of research and industrial application. CIRP Annals, v. 44, n. 2, p. 541-567, 1995
- [16] GARCIA, F. L. Proposta de implantação de manutenção preventiva em um centro de usinagem vertical: um estudo de caso. Revista Tecnologia e Tendências, v. 9, n. 2, 2017. Disponível: <https://periodicos.feevale.br>
- [17] LEE, J. et al. Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. Procedia CIRP, v. 16, p. 3-8, 2014.
- [18] JARDINE, A. K.; LIN, D.; BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 20, n. 7, p. 1483-1510, 2006.
- [19] ALBERTO, J. V. R. Sensores e sua importância: descrição e uso na indústria 4.0. TCC, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2023.
- [20] ARAÚJO, G. R. Impacto da manutenção produtiva total na disponibilidade de máquinas operatrizes de usinagem. 2019. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté, Taubaté. Disponível: <http://repositorio.unitau.br>
- [21] FERREIRA, W. A. A importância da manutenção preditiva na indústria. 2021. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica), Anhanguera, Belo Horizonte. Disponível: <https://repositorio.pgsscogna.com.br>
- [22] MOREIRA, C. A. Sensores industriais: finalidade e aplicações dos sensores industriais, 2021. TCC (Graduação em Engenharia de Controle e Automação), Anhanguera de Jacareí, São Paulo. Disponível: <https://repositorio.pgsscogna.com.br>
- [23] CATTANI, M. B. Avaliação de parâmetros de manutenção preditiva em torno CNC de usinagem de painéis. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica) – UCS, 2022. Disponível: <https://repositorio.ucs.br>
- [24] LIMA, J. L. et al. Aumento produtivo aplicado a máquinas de usinagem CNC utilizando fundamentos da manutenção. Revista Interface Tecnológica, 2021. Disponível: <https://revista.fatectq.edu.br>
- [25] BRANCO, H. A. J. N. et al. Elaboração de um plano de manutenção preventiva para o centro de usinagem CNC ROMI DISCOVERY 760, 2017. TCC, Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Disponível: <https://repositorio.ufu.br>
- [26] BRITO, F. C. Análise e desenvolvimento de melhorias no processo de produção de uma indústria têxtil. 2019. TCC (Graduação em Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia de Produção, Faculdade de Indústria de Engenharia da Bahia, Salvador. Disponível: <http://repositoriosenaiba.fieb.org.br>
- [27] GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- [28] YIN, R. K. (2015). Case study research and applications: Design and methods.
- [29] ACOEM GROUP. Guia de seleção de sensores para manutenção preditiva. Lyon: Acoem Group, 2023.
- [30] ACOEM GROUP. Acoem Eagle: Wireless vibration monitoring system. Technical Datasheet. Lyon: Acoem Group, 2023.
- [31] DYNAMOX. Manual técnico DynaLogger HF+: Sensor de vibração e temperatura para manutenção preditiva. São Paulo: Dynamox, 2023.
- [32] KEPLER WEBER. Estudo de caso: Implementação de sensores WEGscan para manutenção preditiva. Panambi: Kepler Weber, 2024.
- [33] TRACTIAN. Smart Trac Ultra: Especificações técnicas e manual do usuário. São Paulo: Tractian, 2023.
- [34] WEG. WEGscan 100: Manual técnico e guia de aplicação. Jaraguá do Sul: WEG, 2023.
- [35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ATIVOS (ABRAMAN). Documento Nacional: A situação da manutenção no Brasil. Rio de Janeiro: ABRAMAN, 2023.
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 17359: Monitoramento de condição e diagnóstico de máquinas - Diretrizes gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [37] CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). Manutenção 4.0: Tendências e desafios para a indústria brasileira. Brasília: CNI, 2022.
- [38] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 13374-1: Monitoramento de condições e diagnóstico de máquinas: Processamento, comunicação e apresentação de dados - Parte 1: General guidelines. Geneva: ISO, 2021.

DADOS BIOGRÁFICOS

Kauane Bottega Oliveski, nascida em 15/05/2004, em Cruz Alta-RS, é técnica em Automação Industrial (2021) e, atualmente, acadêmica do curso superior em Tecnologia da Automação Industrial pelo Instituto Federal Farroupilha - Campus Panambi-RS.