

SENSORES DE VIBRAÇÃO NA MANUTENÇÃO PREDITIVA INDUSTRIAL: ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO ONLINE

Andrey Gabriel Rodrigues Pimentel. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri UFVJM

andrey.gabriel@ufvjm.edu.br

Erik Gabriel Cruz Sena. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri UFVJM

erik.gabriel@ufvjm.edu.br

Jáder Fernando Dias Breda. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri UFVJM

jader.breda@ufvjm.edu.br

RESUMO

O monitoramento de vibrações constitui uma ferramenta relevante para a manutenção preditiva de máquinas industriais, porém as soluções disponíveis diferem quanto à aquisição e transmissão dos dados, ao grau de automação e aos recursos oferecidos para análise e tomada de decisão. A comparação dessas características sob critérios comuns ainda é necessária para compreender as potencialidades e limitações de diferentes arquiteturas de monitoramento. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo comparar sistemas baseados em sensores de vibração aplicados à manutenção preditiva industrial. Adotou-se uma pesquisa exploratória, qualitativa e bibliográfica, de caráter não sistemático, combinada à análise de informações e registros disponibilizados pela Nexa Resources. Foram examinadas quatro abordagens: um protótipo baseado em Internet das Coisas para motores elétricos, motores inteligentes, um sensor da WEG e o sistema Dynamox empregado na aplicação industrial. A comparação considerou variáveis monitoradas, aquisição e transmissão dos dados, intervenção humana, análise espectral, geração de alertas e apoio à tomada de decisão. Os resultados evidenciam diferentes níveis de automação e capacidade analítica. Na solução WEG analisada, a temperatura é registrada a cada 10 minutos e a vibração a cada uma hora, com sincronização dependente da aproximação do usuário. No sistema Dynamox empregado pela Nexa Resources, os registros de vibração são realizados a cada cinco minutos e os de temperatura a cada 10 minutos, com transmissão automatizada por gateway, além de análise espectral e priorização dos ativos. No caso do motor de um agitador de polpa, observou-se redução acentuada da aceleração após uma intervenção de manutenção. Conclui-se que a integração entre sensores e plataformas online amplia os recursos disponíveis para acompanhamento dos ativos e planejamento das intervenções, embora a ausência de indicadores quantitativos comparáveis de custo, disponibilidade e confiabilidade limite conclusões sobre superioridade econômica ou operacional entre as soluções.

Palavras-chave: Sensores de vibração; Manutenção preditiva; Monitoramento online; Confiabilidade de equipamentos; Internet das Coisas.

Data de recebimento: 02/08/2026

Data do aceite de publicação: 31/08/2026

Data da publicação: 31/08/2026

VIBRATION SENSORS IN INDUSTRIAL PREDICTIVE MAINTENANCE: A COMPARATIVE ANALYSIS OF ONLINE MONITORING SYSTEMS

ABSTRACT

Vibration monitoring is a relevant tool for the predictive maintenance of industrial machinery; however, available solutions differ in terms of data acquisition and transmission, degree of automation, and resources for analysis and decision support. Comparing these characteristics under common criteria is still necessary to understand the potential and limitations of different monitoring architectures. In this context, this study aims to compare vibration-sensor-based systems applied to industrial predictive maintenance. An exploratory, qualitative, and non-systematic bibliographic study was combined with the analysis of information and records provided by Nexa Resources. Four approaches were examined: an Internet of Things-based prototype for electric motors, smart motors, a WEG sensor, and the Dynamox system used in the industrial application. The comparison considered monitored variables, data acquisition and transmission, human intervention, spectral analysis, alert generation, and decision support. The results reveal different levels of automation and analytical capability. In the analyzed WEG solution, temperature is recorded every 10 minutes and vibration every hour, with synchronization depending on user proximity. In the Dynamox system used by Nexa Resources, vibration data are recorded every five minutes and temperature data every 10 minutes, with automated transmission through a gateway, in addition to spectral analysis and asset prioritization. In the case of a pulp agitator motor, a marked reduction in acceleration was observed after a maintenance intervention. It is concluded that the integration of sensors and online platforms expands the resources available for asset monitoring and maintenance planning, although the lack of comparable quantitative indicators of cost, availability, and reliability limits conclusions regarding the economic or operational superiority of the analyzed solutions.

Keywords: Vibration sensors; Predictive maintenance; Online monitoring; Equipment reliability; Internet of Things.

1 INTRODUÇÃO

As vibrações mecânicas estão presentes no funcionamento de máquinas e equipamentos industriais e podem fornecer informações relevantes sobre suas condições operacionais. Alterações na amplitude, na frequência ou no comportamento dos sinais vibratórios podem estar associadas a ocorrências como desbalanceamento, folgas mecânicas, problemas de lubrificação e ressonância. Dessa forma, o acompanhamento desses sinais constitui uma ferramenta importante para identificar anomalias e orientar intervenções de manutenção antes que ocorram falhas mais severas (Chu et al., 2024).

Nesse contexto, a manutenção preditiva fundamenta-se no acompanhamento de variáveis relacionadas ao processo de degradação dos equipamentos. Diferentemente das intervenções realizadas somente após a falha ou em períodos previamente determinados, essa estratégia utiliza informações sobre a condição operacional dos ativos para apoiar o planejamento da manutenção, reduzir intervenções emergenciais e evitar o agravamento de danos (Kardec & Nascif, 2009; Mallioris et al., 2024).

O desenvolvimento de sensores, redes de comunicação e plataformas digitais ampliou as possibilidades de monitoramento de equipamentos industriais. Nesse cenário, a análise de vibrações permanece como uma das principais técnicas para avaliação da condição de máquinas, especialmente pela possibilidade de relacionar alterações nos sinais a diferentes mecanismos de falha (Chu et al., 2024). Paralelamente, a integração entre sensores, Internet das Coisas e plataformas digitais tem permitido coletar, armazenar e transmitir dados de forma remota, além de disponibilizar históricos, alertas e recursos de apoio à tomada de decisão. Entretanto, as soluções de manutenção preditiva diferem quanto às variáveis monitoradas, à frequência de aquisição, à forma de transmissão, ao processamento dos sinais e ao nível de intervenção humana necessário (Mallioris et al., 2024).

A relevância desta investigação decorre da necessidade de compreender como diferentes arquiteturas de monitoramento podem apoiar a manutenção preditiva em contextos industriais, especialmente diante da crescente disponibilidade de sensores conectados e plataformas digitais. A comparação torna-se viável pela existência de estudos publicados com descrição técnica das soluções e pela disponibilidade de registros de aplicação industrial fornecidos pela Nexa Resources, permitindo confrontar características de sistemas apresentados na literatura com funcionalidades observadas em uma aplicação real.

Embora diferentes estudos apresentem aplicações de sensores no monitoramento de motores e outros equipamentos, a comparação entre essas soluções é necessária para compreender suas potencialidades e limitações no contexto industrial. Assim, formula-se a seguinte questão de pesquisa: quais características distinguem os sistemas de monitoramento online baseados em sensores de vibração e como essas diferenças influenciam sua aplicação na manutenção preditiva industrial?

Diante disso, este artigo tem como objetivo comparar diferentes sistemas de monitoramento baseados em sensores de vibração, considerando um protótipo fundamentado em Internet das Coisas, motores inteligentes, um sensor comercial da WEG e o sistema Dynamox utilizado pela Nexa Resources. Especificamente, busca-se: (i) caracterizar as principais funcionalidades e variáveis monitoradas por cada solução; (ii) comparar os procedimentos de aquisição e transmissão dos dados, o grau de intervenção humana e os recursos de análise e geração de alertas; e (iii) discutir as potencialidades e limitações das soluções para aplicação em estratégias de manutenção preditiva industrial. Como contribuição, o estudo organiza esses elementos em uma análise comparativa e discute sua aplicação a partir de registros de um sistema empregado em ambiente industrial.

2 VIBRAÇÕES MECÂNICAS E ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO

Esta seção apresenta os fundamentos necessários à análise dos sistemas de monitoramento considerados no estudo. Inicialmente, são abordados os principais conceitos relacionados às vibrações mecânicas e às falhas identificáveis por meio de sinais vibratórios. Em seguida, discutem-se as estratégias de manutenção e a aplicação de sensores no contexto da manutenção preditiva industrial.

2.1 VIBRAÇÕES MECÂNICAS

Vibrações mecânicas correspondem aos movimentos oscilatórios de um corpo em torno de uma posição de equilíbrio. O comportamento vibratório de um sistema está associado à interação entre massa, rigidez e amortecimento, elementos que influenciam sua resposta às forças internas e externas aplicadas durante a operação (Rao, 1995).

A análise das vibrações considera parâmetros como amplitude, frequência e direção do movimento. A amplitude representa a intensidade da oscilação, enquanto a frequência indica o número de ciclos realizados em determinado intervalo de tempo. Em máquinas rotativas, alterações nesses parâmetros podem revelar mudanças nas condições de funcionamento e auxiliar na identificação de falhas mecânicas.

Um conceito relevante nesse contexto é o de frequência natural, que corresponde à frequência com que um sistema tende a oscilar após sofrer uma perturbação. Quando a frequência de uma força de excitação se aproxima da frequência natural do sistema, pode ocorrer ressonância, caracterizada pelo aumento significativo da amplitude de vibração e pela possibilidade de esforços excessivos sobre os componentes (Rao, 1995).

Assim, o monitoramento dos sinais vibratórios permite acompanhar a condição operacional de máquinas e equipamentos. A análise no domínio do tempo possibilita observar a evolução das amplitudes, enquanto a análise no domínio da frequência auxilia na identificação de componentes espectrais associadas a diferentes mecanismos de falha. Essas informações constituem a base para o uso de sensores de vibração em estratégias de manutenção preditiva.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DE VIBRAÇÕES

As vibrações mecânicas podem ser classificadas conforme a origem da excitação, a dissipação de energia, o comportamento do sistema e a previsibilidade do sinal. Quanto à origem, são denominadas livres quando ocorrem após uma perturbação inicial, sem atuação contínua de uma força externa, e forçadas quando resultam da aplicação de uma excitação durante o movimento do sistema (Rao, 1995).

Em relação à dissipação de energia, as vibrações podem ser não amortecidas, quando as perdas são desconsideradas, ou amortecidas, quando mecanismos como atrito e resistência reduzem progressivamente a energia do movimento. Embora modelos não amortecidos sejam úteis para simplificar determinadas análises, o amortecimento deve ser considerado em sistemas reais, especialmente em condições próximas à ressonância (Rao, 1995).

Quanto ao comportamento dos elementos que compõem o sistema, as vibrações são classificadas como lineares quando a resposta mantém proporcionalidade com a excitação aplicada e como não lineares quando essa relação não é preservada. Sistemas não lineares podem apresentar respostas mais complexas e demandar procedimentos específicos de análise (Rao, 1995).

As excitações também podem ser determinísticas ou aleatórias. Nas determinísticas, sua evolução pode ser descrita ao longo do tempo, enquanto, nas aleatórias, o comportamento é caracterizado por parâmetros estatísticos obtidos a partir dos registros do sinal. Essa distinção influencia a seleção das técnicas de processamento e interpretação dos dados coletados pelos sensores.

No monitoramento industrial, essas classificações auxiliam na compreensão da origem e do comportamento dos sinais vibratórios. Entretanto, o diagnóstico de falhas depende principalmente da análise de alterações nas amplitudes, frequências e padrões observados durante a operação dos equipamentos.

2.3 FALHAS ASSOCIADAS ÀS VIBRAÇÕES MECÂNICAS

Máquinas rotativas estão sujeitas ao desgaste e à alteração de suas condições operacionais ao longo do tempo. Desbalanceamentos, folgas mecânicas, problemas de lubrificação e ressonância estão entre as ocorrências que podem modificar os níveis e os padrões de vibração. A identificação dessas alterações depende da análise dos sinais coletados no domínio do tempo e, principalmente, no domínio da frequência, no qual componentes espectrais podem ser associadas a determinados mecanismos de falha.

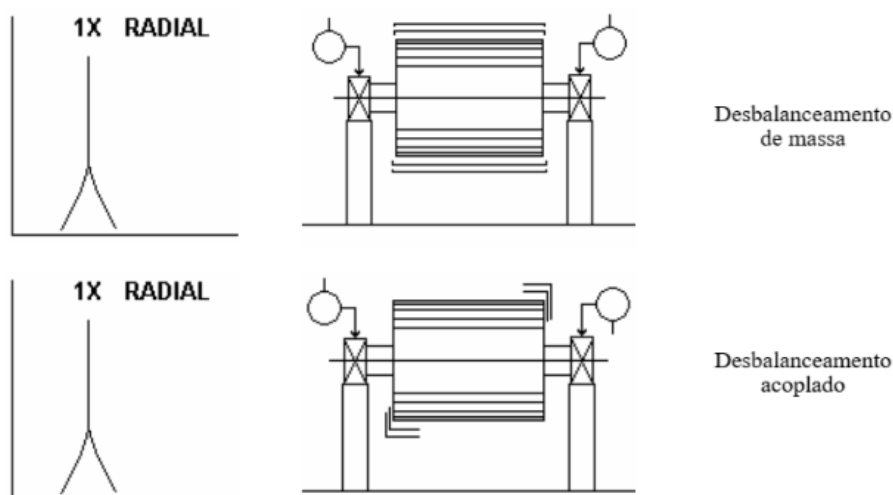
2.3.1 Desbalanceamento

O desbalanceamento ocorre quando a distribuição de massa do conjunto rotativo não se encontra adequadamente alinhada ao eixo de rotação. Essa condição pode resultar de desgaste, erros de fabricação ou montagem, deformações e acúmulo de material, produzindo forças periódicas capazes de elevar os níveis de vibração e afetar outros componentes da máquina (Arco-Verde, 2008).

O desbalanceamento pode ser classificado como estático, quando o centro de massa não coincide com o eixo de rotação, ou dinâmico, quando o eixo principal de inércia não coincide com o eixo geométrico de rotação. Na prática, as duas condições podem ocorrer simultaneamente, caracterizando um desbalanceamento combinado.

Na análise espectral, o desbalanceamento geralmente se manifesta por uma componente predominante correspondente a uma vez a frequência de rotação do equipamento, representada por $1\times$ RPM, com maior evidência na direção radial. A amplitude dessa componente tende a aumentar com a velocidade de rotação. A Figura 1 apresenta o espectro característico dessa condição, destacando a predominância da componente associada à frequência de rotação da máquina (Sá, 2000).

Figura 1 – Espectro característico de desbalanceamento.



Fonte: Sá (2000).

2.3.2 Folga mecânica

A folga mecânica decorre do excesso de espaço entre componentes rotativos ou entre elementos estruturais de uma máquina. Essa condição pode alterar a resposta dinâmica do conjunto, elevar os níveis de vibração e comprometer o desempenho e a integridade do equipamento.

A folga rotacional está associada ao aumento do espaço entre elementos móveis e seus suportes, como ocorre em mancais e rolamentos submetidos ao desgaste. Já a folga estrutural resulta do afrouxamento entre partes estacionárias, como o mancal e sua base, podendo ser causada por conexões inadequadamente apertadas, desgaste, movimentações ou vibrações contínuas (Goldman, 1999).

Na análise espectral, a folga pode produzir múltiplos componentes harmônicos da frequência de rotação e, em determinadas situações, componentes fracionárias, como $1/2\times$ ou $1/3\times$ RPM. A configuração do espectro depende da origem e da intensidade da folga, razão pela qual sua interpretação deve considerar também as características construtivas e operacionais da máquina (Sá, 2000).

2.3.3 Problemas de Lubrificação

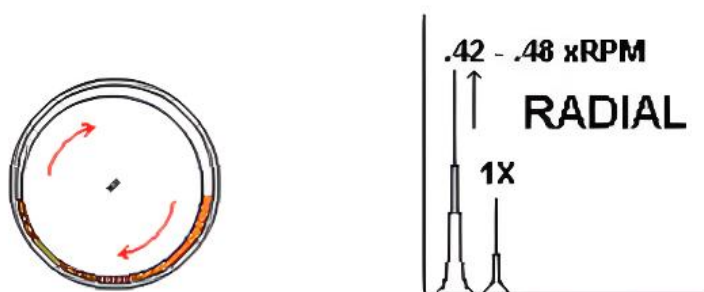
Problemas de lubrificação podem alterar o comportamento vibratório de máquinas que utilizam mancais de deslizamento, especialmente quando há instabilidade no filme de óleo

responsável por separar o eixo da superfície do mancal. A distribuição inadequada do lubrificante, sua contaminação ou a presença de fluido aprisionado podem reduzir a capacidade de sustentação do eixo e provocar contato, desgaste e elevação dos níveis de vibração (Abreu, 2023; Goldman, 1999).

Entre os fenômenos associados a essa condição encontra-se o turbilhonamento do filme de óleo, caracterizado pelo movimento instável do eixo no interior do mancal. Na análise espectral, esse fenômeno costuma produzir uma componente subsíncrona situada aproximadamente entre $0,42\times$ e $0,48\times$ a frequência de rotação. Caso essa frequência se aproxime de uma frequência natural do rotor, a instabilidade pode se intensificar e comprometer o funcionamento do equipamento (Sá, 2000).

A Figura 2 apresenta o espectro característico do turbilhonamento do filme de óleo, evidenciando a componente de vibração abaixo da frequência de rotação da máquina.

Figura 2 – Espectro característico do turbilhonamento do filme de óleo.



Fonte: Sá (2000).

2.3.4 Ressonância

A ressonância ocorre quando a frequência de uma excitação se aproxima de uma frequência natural do sistema, provocando aumento significativo da amplitude de vibração. Em máquinas rotativas, essa condição pode surgir durante a aceleração, a desaceleração ou a operação próxima a determinadas velocidades críticas, elevando os esforços sobre os componentes e favorecendo a ocorrência de danos.

A identificação da ressonância pode ser realizada pela observação da variação dos níveis de vibração em função da velocidade de rotação. Quando a máquina se afasta da região correspondente à frequência natural excitada, a amplitude tende a diminuir, tanto com o aumento quanto com a redução da velocidade (Arco-Verde, 2008).

Diferentemente de falhas que apresentam componentes espectrais diretamente relacionadas à frequência de rotação, a análise da ressonância exige considerar a resposta dinâmica do conjunto e suas condições operacionais. Por isso, a interpretação dos dados deve combinar informações sobre velocidade, amplitude e frequência, evitando atribuir o aumento da vibração exclusivamente a uma falha localizada.

2.4 ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO

A manutenção compreende o conjunto de ações técnicas e administrativas destinadas a conservar um equipamento ou restabelecer sua capacidade de desempenhar a função requerida. A escolha da estratégia de manutenção depende de fatores como criticidade do ativo, consequências da falha, disponibilidade de recursos e possibilidade de acompanhar sua condição operacional (Lemos et al., 2011).

As estratégias de manutenção podem ser classificadas, de maneira geral, como corretivas, preventivas e preditivas. Embora essas modalidades possam coexistir em uma organização, elas se diferenciam principalmente pelo momento da intervenção e pelas informações utilizadas para determinar sua execução.

2.4.1 Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva é realizada após a identificação de uma falha ou da perda de desempenho do equipamento, com o objetivo de restabelecer suas condições de funcionamento. Quando não planejada, essa modalidade depende da disponibilidade imediata de mão de obra, materiais e componentes, o que pode ampliar o período de indisponibilidade do ativo e dificultar a previsão dos custos da intervenção (Vieira et al., 2022).

Apesar de ser necessária em determinadas situações, a predominância de intervenções corretivas não planejadas pode comprometer a continuidade do processo produtivo. Nesse contexto, o monitoramento das condições operacionais contribui para identificar indícios de degradação antes da interrupção completa do equipamento, permitindo que parte das intervenções seja programada.

2.4.2 Manutenção Preventiva

A manutenção preventiva é executada de forma planejada, em intervalos previamente definidos ou conforme critérios estabelecidos para o equipamento. Seu objetivo é reduzir a probabilidade de falha por meio de inspeções, ajustes, substituições e outras intervenções realizadas antes da perda de funcionamento do ativo (Kardec & Nascif, 2009).

Essa estratégia permite programar recursos, mão de obra e períodos de parada, contribuindo para maior previsibilidade das atividades de manutenção. Entretanto, como as intervenções são determinadas principalmente por tempo de uso, número de ciclos ou recomendações do fabricante, componentes ainda em condições adequadas podem ser substituídos, enquanto falhas ocorridas entre os intervalos programados podem não ser identificadas antecipadamente.

Nesse sentido, o acompanhamento contínuo ou periódico das condições reais do equipamento pode complementar a manutenção preventiva, fornecendo informações para ajustar os intervalos de intervenção e priorizar os ativos que apresentam sinais de degradação.

2.4.3 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva baseia-se no acompanhamento de variáveis capazes de indicar alterações na condição operacional e no processo de degradação dos equipamentos. As intervenções são planejadas a partir da análise dessas informações, buscando realizá-las antes da ocorrência da falha e somente quando os dados demonstrarem sua necessidade (Mallioris et al., 2024).

Entre os métodos utilizados para avaliar a condição dos ativos estão a análise de vibrações, a análise de óleos e as avaliações estruturais. No caso das máquinas rotativas, o monitoramento das vibrações permite acompanhar alterações de amplitude e frequência relacionadas a desbalanceamentos, folgas, problemas de lubrificação, ressonância e outras anomalias.

A incorporação de sensores e sistemas de monitoramento online amplia essa estratégia ao permitir a aquisição periódica ou automatizada dos dados, seu armazenamento em históricos e sua apresentação em plataformas digitais. Dependendo da solução adotada, também podem

ser disponibilizados limites de alerta, análises espectrais e mecanismos de priorização dos equipamentos que demandam avaliação.

Entretanto, a disponibilidade dos dados não elimina a necessidade de interpretação técnica. A eficácia da manutenção preditiva depende da qualidade das medições, da configuração adequada dos sensores e dos limites de alerta, bem como da capacidade de relacionar os padrões observados às condições reais de operação. Essas diferenças entre os sistemas de aquisição e análise constituem o objeto da comparação apresentada nas seções seguintes.

2.5 SENSORES E SISTEMAS DE MONITORAMENTO ONLINE

Os sistemas atuais de monitoramento de vibrações integram diferentes etapas, que incluem aquisição dos sinais, transmissão dos dados, processamento e identificação de condições anormais. Em máquinas rotativas, os acelerômetros estão entre os transdutores mais empregados devido à possibilidade de registrar vibrações em diferentes faixas de frequência e direções. A qualidade das informações obtidas depende não apenas do sensor utilizado, mas também de características como sensibilidade, faixa de medição, resposta em frequência e condições de instalação (Romanssini et al., 2023).

O método de fixação do sensor também deve ser considerado, pois a interface entre o transdutor e a superfície monitorada pode influenciar sua resposta em frequência e, conseqüentemente, a qualidade do sinal adquirido. Dessa forma, a seleção e a instalação do sensor devem ser compatíveis com as frequências de interesse, as características do equipamento e as condições do ambiente industrial (Romanssini et al., 2023).

A integração desses sensores a redes de comunicação possibilita arquiteturas de monitoramento online baseadas em Internet das Coisas e Internet das Coisas Industrial (IIoT). Nessas arquiteturas, os dados podem ser transmitidos para sistemas locais ou plataformas remotas, permitindo armazenamento de históricos, geração de alertas e acompanhamento de múltiplos ativos. A literatura recente destaca que a cadeia de monitoramento não se restringe à medição da vibração, envolvendo também transmissão, tratamento dos sinais e mecanismos de suporte ao diagnóstico e à decisão de manutenção (Romanssini et al., 2023; Mallioris et al., 2024).

Quanto ao processamento, os sinais podem ser analisados nos domínios do tempo, da frequência e do tempo-frequência. A Transformada Rápida de Fourier é amplamente utilizada para obtenção do espectro de frequências, enquanto técnicas como transformadas wavelet e análises tempo-frequência são empregadas principalmente quando os sinais apresentam comportamento não estacionário. Essas abordagens permitem extrair características relacionadas às condições de funcionamento e aos diferentes mecanismos de falha (Tiboni et al., 2022).

Paralelamente, técnicas de aprendizado de máquina e aprendizado profundo vêm sendo investigadas para classificação automática de condições e diagnóstico de falhas a partir de sinais de vibração. Redes neurais convolucionais, redes recorrentes e outras arquiteturas de aprendizado profundo podem extrair características diretamente dos dados adquiridos, reduzindo parte da etapa manual de seleção de atributos. Entretanto, sua aplicação industrial ainda envolve desafios relacionados à disponibilidade de dados representativos, variações nas condições operacionais, interpretabilidade dos modelos e generalização para equipamentos distintos (Tama et al., 2023).

Embora essas técnicas inteligentes representem uma tendência relevante no estado da arte, sua presença não constitui requisito para os sistemas comparados neste estudo. A análise

desenvolvida concentra-se nas funcionalidades efetivamente documentadas em cada solução, incluindo aquisição, transmissão, análise espectral, alertas e apoio à tomada de decisão.

3 METODOLOGIA

Este estudo possui caráter exploratório, abordagem qualitativa e combina pesquisa bibliográfica com análise comparativa de registros relacionados a sistemas de monitoramento industrial. A pesquisa bibliográfica teve como finalidade identificar aplicações de sensores de vibração voltadas à manutenção preditiva e reunir informações que permitissem comparar diferentes níveis de automação e capacidade analítica.

Inicialmente, foi realizada busca bibliográfica no Google Acadêmico, complementada por consultas a páginas institucionais e empresariais para obtenção de informações técnicas sobre sistemas comerciais de monitoramento. A busca foi realizada ao longo de 2023, com consultas registradas até dezembro daquele ano, utilizando os descritores “sensores de vibrações mecânicas na indústria”, “sensores de monitoramento na manutenção preditiva” e “tecnologias para detecção de falhas prematuras”. Não se pretendeu realizar uma revisão sistemática da literatura, mas identificar estudos com informações técnicas suficientes para subsidiar uma comparação exploratória entre diferentes soluções de monitoramento.

Foram adotados como critérios de inclusão: (i) trabalhos relacionados à aplicação de sensores de vibração ou sistemas de monitoramento na manutenção preditiva; (ii) estudos que apresentassem aplicação prática ou descrição suficientemente detalhada da solução empregada; e (iii) trabalhos que disponibilizassem informações sobre variáveis monitoradas, aquisição, transmissão ou análise dos dados. Foram excluídos materiais duplicados, estudos sem descrição técnica suficiente para aplicação das categorias comparativas e trabalhos cujo objeto não estivesse diretamente relacionado ao monitoramento de condição de máquinas. A partir desses critérios, foram selecionados os estudos de Khan et al. (2019), Dol e Bhinge (2018) e Martins e Fabro (2020), por representarem arquiteturas distintas de monitoramento e apresentarem informações compatíveis com as categorias definidas para a comparação. A Tabela 1 apresenta as referências selecionadas.

Tabela 1 – Estudos selecionados para fundamentação da análise comparativa.

Autores	Título	Ano de Publicação
Khan et al.	<i>IoT based health monitoring system for electrical motors</i>	2019
Dol e Bhinge	<i>SMART Motor for Industry 4.0</i>	2018
Martins e Fabro	Uso do sensor inteligente na manutenção preditiva do motor de uma extrusora	2020

Fonte: Elaborada pelos autores.

A etapa aplicada baseou-se em informações e registros disponibilizados pela Nexa Resources sobre o emprego de sensores Dynamox em ativos industriais. Foram considerados dados referentes à forma de instalação, periodicidade de aquisição, transmissão por gateway, recursos de visualização, limites de alerta, análise espectral e assistência à tomada de decisão. Também foi analisado o registro do motor de um agitador de polpa, no qual os níveis de vibração foram acompanhados antes e depois de uma intervenção de manutenção.

Para a comparação qualitativa, foram adotadas as seguintes categorias: variáveis monitoradas; periodicidade e forma de aquisição; método de transmissão dos dados;

necessidade de intervenção humana; disponibilidade de análise espectral; geração de alertas; recursos de apoio à tomada de decisão; aplicabilidade industrial; e limitações identificadas. As características de cada solução foram descritas individualmente e, posteriormente, organizadas em um quadro comparativo.

As especificações metrológicas dos sensores, como sensibilidade, faixa de medição, faixa dinâmica e resposta em frequência, foram consideradas sempre que explicitamente disponibilizadas nas fontes analisadas. Entretanto, essas informações não são apresentadas de forma padronizada para todas as soluções examinadas, impossibilitando sua utilização como critério quantitativo uniforme de comparação. Essa limitação deve ser considerada na interpretação dos resultados, uma vez que diferenças nessas características podem influenciar a capacidade de detecção e a resposta dos sistemas a diferentes níveis e frequências de vibração. O método de fixação do sensor ao equipamento também constitui fator relevante, pois pode alterar a transmissão das vibrações entre a superfície monitorada e o transdutor e, conseqüentemente, afetar a resposta obtida em determinadas faixas de frequência. Como os estudos analisados não descrevem de maneira homogênea os procedimentos de montagem e fixação dos sensores, esse aspecto não foi utilizado como critério comparativo entre as soluções.

A análise não contempla a mensuração quantitativa dos impactos econômicos ou operacionais das soluções. Não foram disponibilizados indicadores comparáveis de custo total de implantação, disponibilidade dos equipamentos, tempo médio entre falhas, tempo médio para reparo ou redução do tempo de parada. Além disso, as fontes de evidência utilizadas não são equivalentes entre todas as soluções analisadas: os sistemas de Khan et al. (2019), Dol e Bhinge (2018) e Martins e Fabro (2020) foram examinados a partir das informações apresentadas em trabalhos publicados, enquanto a análise do sistema Dynamox também incorporou registros de sua aplicação industrial disponibilizados pela Nexa Resources. Essa assimetria limita a comparação direta entre as soluções e pode proporcionar maior nível de detalhamento para o sistema empregado pela empresa analisada. A seleção bibliográfica possui caráter intencional e não sistemático e, portanto, os resultados devem ser interpretados como uma análise comparativa exploratória das soluções selecionadas, não sendo possível generalizá-los para todos os sistemas de monitoramento disponíveis no mercado.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

Esta seção apresenta as características dos sistemas de monitoramento selecionados e discute suas diferenças com base nas categorias definidas na metodologia. Inicialmente, são examinadas as soluções descritas na literatura e, em seguida, o sistema Dynamox empregado pela Nexa Resources. A comparação considera as variáveis monitoradas, a aquisição e a transmissão dos dados, a necessidade de intervenção humana, os recursos de análise espectral, a geração de alertas e o apoio à tomada de decisão.

4.1 *IoT based health monitoring system for electrical motors*

Khan et al. (2019) desenvolveram um protótipo para o monitoramento remoto da condição de motores elétricos. A solução integra um microcontrolador, sensores de corrente, vibração e temperatura, módulo de comunicação GSM e display LCD. O microcontrolador recebe os sinais provenientes dos sensores, enquanto o display apresenta informações sobre o funcionamento do sistema. Os dados também podem ser transmitidos para uma plataforma de monitoramento remoto.

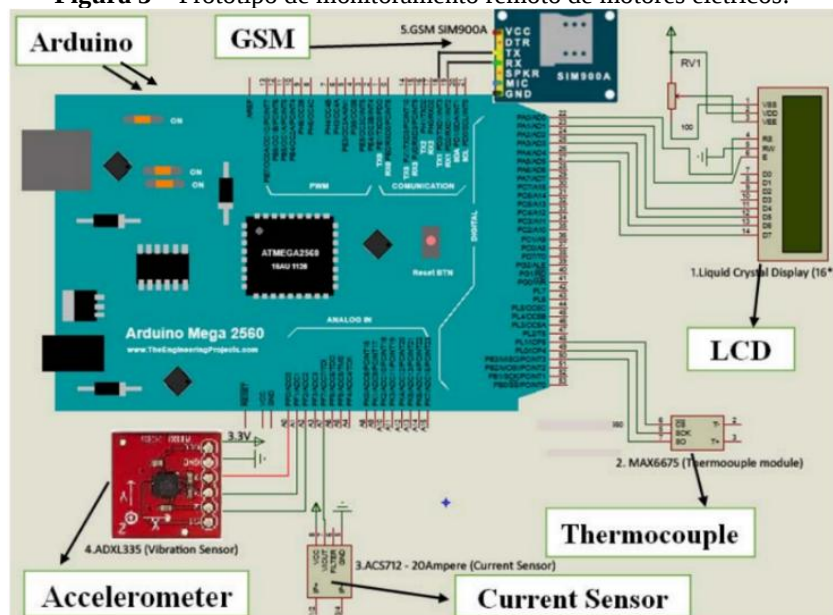
A arquitetura do protótipo é apresentada na Figura 3. A solução demonstra a possibilidade de integrar diferentes variáveis operacionais em um único sistema baseado em

SENSORES DE VIBRAÇÃO NA MANUTENÇÃO PREDITIVA INDUSTRIAL: ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO ONLINE

Internet das Coisas, utilizando componentes eletrônicos de menor complexidade quando comparados a plataformas industriais comerciais.

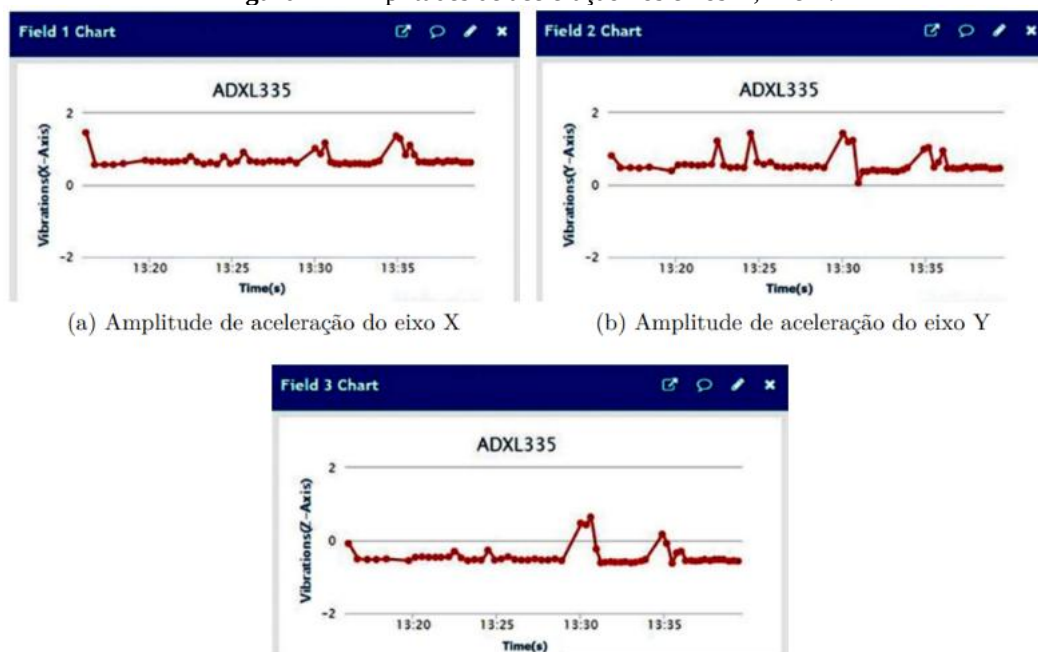
Os acelerômetros empregados no protótipo registram as amplitudes de aceleração nos eixos X, Y e Z. A Figura 4 apresenta exemplos desses registros no domínio do tempo, permitindo observar a variação da aceleração em cada direção durante o funcionamento do motor.

Figura 3 – Protótipo de monitoramento remoto de motores elétricos.



Fonte: Khan et al. (2019).

Figura 4 – Amplitudes de aceleração nos eixos X, Y e Z.



Fonte: Khan et al. (2019).

A aquisição de dados em três eixos amplia a possibilidade de identificar alterações no comportamento vibratório do equipamento. Entretanto, os resultados apresentados concentram-se principalmente na visualização das amplitudes ao longo do tempo. No estudo analisado, não são demonstrados recursos mais avançados de diagnóstico, como análise espectral integrada, definição de níveis de criticidade ou priorização automática dos ativos.

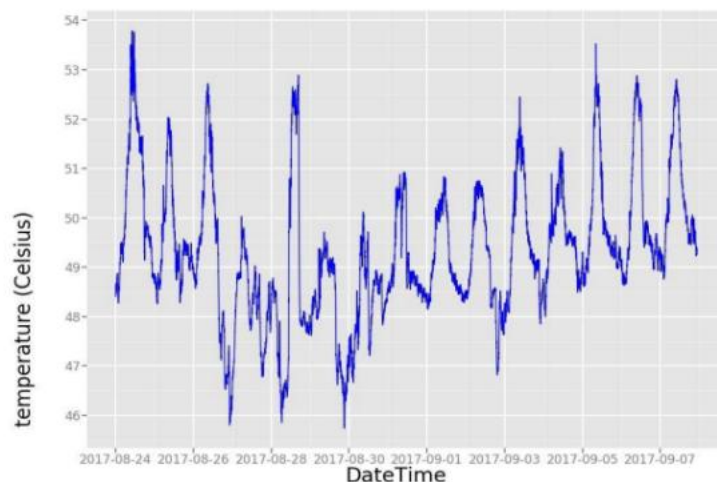
Dessa forma, a principal contribuição dessa solução está na demonstração de uma arquitetura de monitoramento remoto baseada em sensores e comunicação sem fio. Sua aplicação evidencia o potencial de sistemas de Internet das Coisas para acompanhar motores elétricos, embora a utilização em ambientes industriais mais complexos dependa de recursos adicionais de robustez, armazenamento, tratamento dos sinais e suporte à tomada de decisão.

4.2 SMART Motor for Industry 4.0

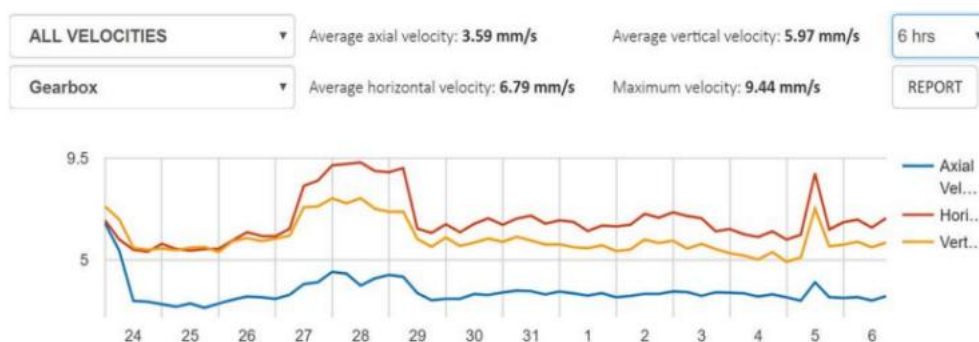
Dol e Bhinge (2018) analisaram uma solução de monitoramento online baseada em motores inteligentes equipados com sensores. O sistema possibilita acompanhar variáveis como temperatura, vibração, rotação, tempo de funcionamento e parâmetros relacionados à produtividade do equipamento. Os dados são disponibilizados em uma plataforma desenvolvida pelo fabricante, que também oferece recursos de visualização e geração de relatórios.

A Figura 5 apresenta registros de temperatura e velocidade de vibração obtidos em uma bomba de múltiplos estágios. Os gráficos permitem acompanhar a evolução dessas variáveis ao longo do tempo e observar diferenças entre as medições realizadas nas direções axial, vertical e horizontal.

Figura 5 – Temperatura e velocidade de vibração de uma bomba de múltiplos estágios.



(a) Temperatura da bomba por alta velocidade em relação ao tempo



Fonte: Dol e Bhinge (2018).

Um diferencial dessa solução em relação ao protótipo de Khan et al. (2019) é a possibilidade de converter os sinais de vibração do domínio do tempo para o domínio da frequência por meio da Transformada Rápida de Fourier. A análise espectral permite identificar componentes relacionadas à frequência de rotação e a outros padrões vibratórios, oferecendo informações mais adequadas ao diagnóstico de falhas.

Além da análise das vibrações, a integração dos sensores ao próprio motor reduz a necessidade de instalar externamente todos os componentes de aquisição. Essa característica favorece a padronização do monitoramento, embora também vincule a solução aos equipamentos e à infraestrutura tecnológica disponibilizados pelo fabricante.

Em comparação com o sistema de Khan et al. (2019), a abordagem apresentada por Dol e Bhinge (2018) oferece maior diversidade de variáveis e recursos analíticos. Entretanto, o estudo não apresenta uma avaliação quantitativa dos impactos do sistema sobre indicadores de manutenção, como redução de falhas, disponibilidade dos equipamentos ou custos operacionais.

4.3 Uso de sensor inteligente na manutenção preditiva do motor de uma extrusora

Martins e Fabro (2020) analisaram a aplicação de um sensor inteligente sem fio no motor de uma extrusora. A solução permite acompanhar parâmetros de temperatura e vibração por meio de um aplicativo para dispositivo móvel ou de uma plataforma digital. No caso estudado, a temperatura era registrada a cada 10 minutos, enquanto os parâmetros de vibração eram obtidos em intervalos de uma hora.

Como informação complementar, a documentação técnica do WEG Motor Scan indica medição da vibração global RMS em três eixos e resposta para avaliação da vibração global em frequências de até 820 Hz. A ficha técnica do equipamento informa ainda faixa de medição de aceleração de ± 16 g (WEG, 2021). Essas características devem ser consideradas juntamente com o ponto e o método de instalação do sensor, uma vez que a transmissão das vibrações da estrutura para o transdutor pode influenciar a resposta obtida em determinadas faixas de frequência (Romanssini et al., 2023).

Diferentemente de sistemas que enviam os dados continuamente por meio de uma infraestrutura fixa de comunicação, a sincronização das informações dependia da aproximação de uma pessoa com o aplicativo aberto e conectado à rede utilizada pelo sistema. A Figura 6 apresenta a interface empregada para a coleta dos registros de temperatura e vibração.

Figura 6 – Coleta dos dados de temperatura e vibração por dispositivo móvel.

SENSORES DE VIBRAÇÃO NA MANUTENÇÃO PREDITIVA INDUSTRIAL: ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO ONLINE



EX201	
PAINEL	
Medições do sensor	
Temperatura	40,2°C
Vibração axial	2.608 mm/s
Vibração radial-Y	2.333 mm/s
Vibração radial-X	2.608 mm/s
Medições avançadas	
As medições de temperatura foram feitas às 17:50 e de vibração às 17:00 em 06/11/19	
Informações do motor	
Alimentação	380V
Carcaça	355M/L
Classe térmica	F
Eficiência	95,4
Fator de potência	0,82
Fator de serviço	1,00
Frequência	50Hz
I _p /I _n	6,1
Polaridade	6
Potência	250,0 kW

Fonte: Martins e Fabro (2020).

A solução também possibilita armazenar o histórico das medições e configurar limites de alerta. Conforme apresentado na Figura 7, os registros de vibração podem ser comparados com dois níveis previamente definidos: um limite inicial de alerta, representado pela linha amarela, e um limite crítico, indicado pela linha vermelha.

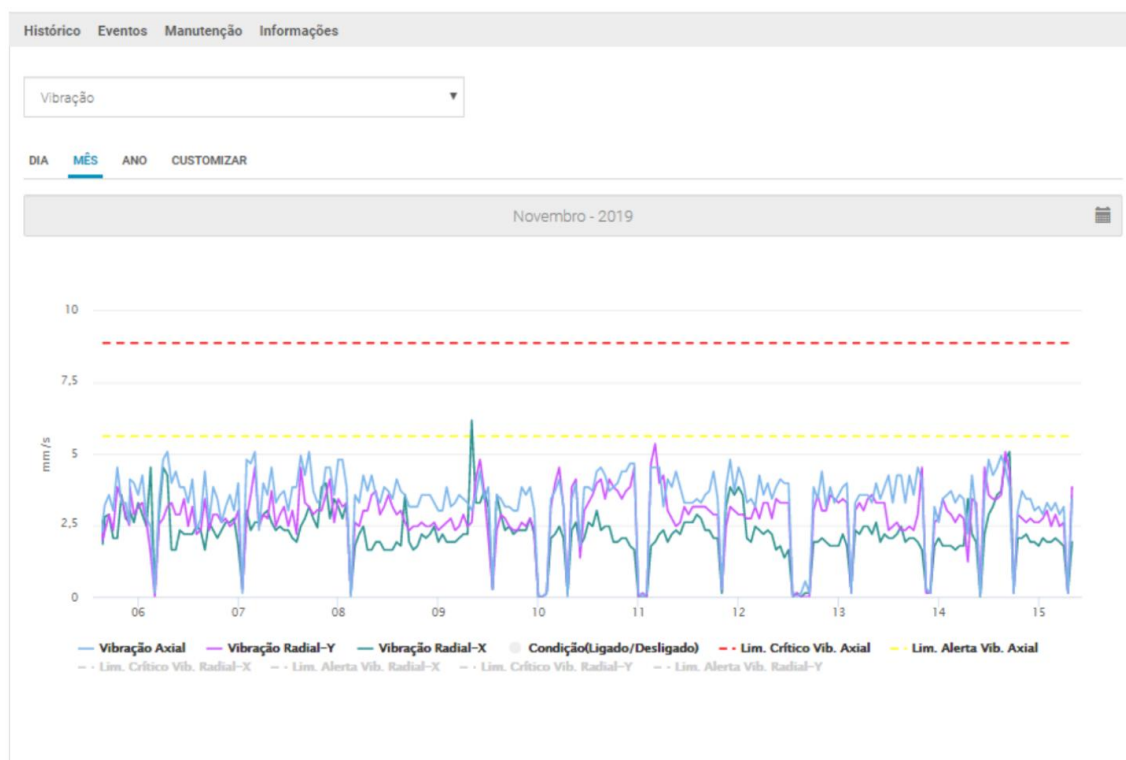
A utilização de limites de alerta facilita a identificação de alterações que demandam acompanhamento ou intervenção. Entretanto, no caso analisado, esses valores foram estabelecidos com base nas recomendações do fabricante, pois não havia histórico anterior suficiente da aplicação no equipamento para a definição de limites específicos.

Em comparação com as soluções apresentadas nas subseções anteriores, o sistema acrescenta recursos de histórico e classificação dos níveis de vibração. Sua principal limitação está na necessidade de aproximação de uma pessoa para sincronizar os dados, o que reduz o grau de automação e pode ampliar o intervalo entre a ocorrência de uma alteração e sua disponibilização para análise.

Dessa forma, a solução apresenta maior apoio ao acompanhamento da condição do equipamento do que um sistema restrito à visualização instantânea dos sinais, mas não corresponde, no caso estudado, a uma arquitetura de transmissão totalmente automatizada.

Figura 7 – Histórico dos dados de vibração e limites de alerta.

SENSORES DE VIBRAÇÃO NA MANUTENÇÃO PREDITIVA INDUSTRIAL: ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO ONLINE



Fonte: Martins e Fabro (2020).

4.4 Sistema de monitoramento empregado pela Nexa Resources

A Nexa Resources utiliza sensores Dynamox para o acompanhamento de vibração e temperatura em diferentes tipos de ativos industriais, incluindo estações de bombeamento, ventiladores, britadores, motores e equipamentos móveis pesados. A Figura 8 apresenta um sensor instalado na articulação de um caminhão fora de estrada, exemplificando a possibilidade de aplicação da solução em equipamentos submetidos a condições operacionais distintas.

Conforme os registros analisados, os parâmetros de temperatura são obtidos em intervalos de 10 minutos, com duas amostras por coleta, enquanto os dados de vibração são registrados a cada cinco minutos. Diferentemente da solução apresentada por Martins e Fabro (2020), a transmissão das informações ocorre por meio de gateways conectados à rede sem fio, reduzindo a necessidade de aproximação de uma pessoa para sincronização dos dados.

Figura 8 – Sensor Dynamox instalado na articulação de um caminhão fora de estrada.

SENSORES DE VIBRAÇÃO NA MANUTENÇÃO PREDITIVA INDUSTRIAL: ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO ONLINE

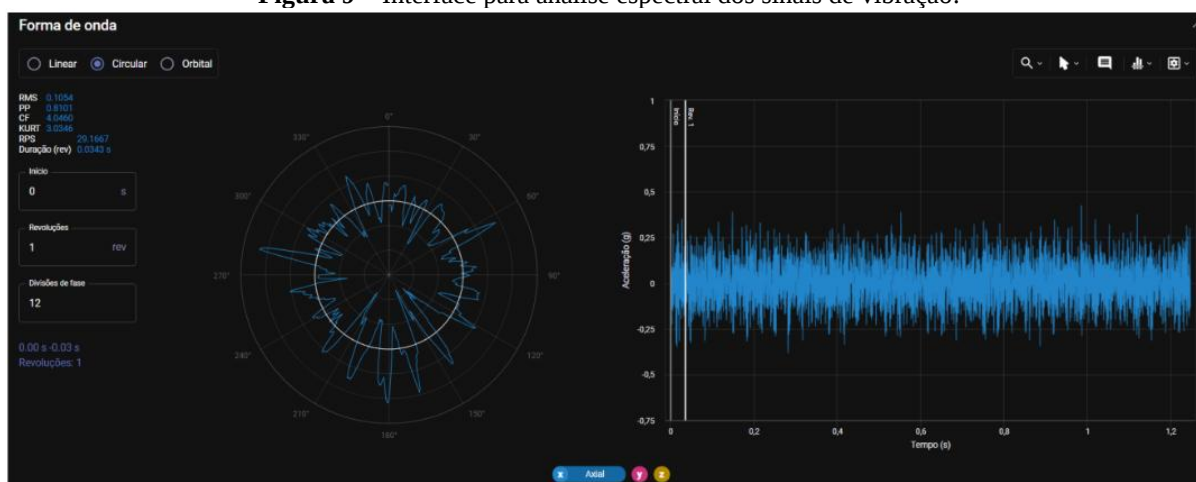


Fonte: Acervo dos autores.

Essa arquitetura permite que as medições sejam armazenadas e disponibilizadas em uma plataforma digital, na qual podem ser acompanhados históricos, níveis de alerta e indicadores relacionados à condição dos ativos. Embora a aquisição não seja contínua, os intervalos programados e a transmissão automatizada possibilitam acompanhamento frequente das alterações observadas nos equipamentos.

Além dos registros no domínio do tempo, a plataforma oferece recursos de análise espectral. A Figura 9 apresenta uma das interfaces destinadas à visualização dos sinais, na qual podem ser selecionados diferentes formatos de representação e eixos de medição.

Figura 9 – Interface para análise espectral dos sinais de vibração.



Fonte: Dynamox (2023).

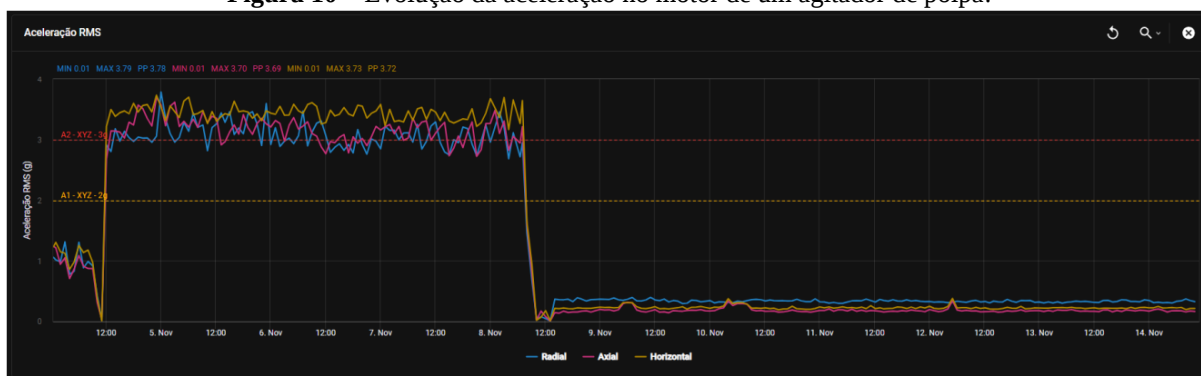
A disponibilidade do espectro de frequências amplia as possibilidades de interpretação quando comparada a sistemas restritos à apresentação da amplitude ao longo do tempo. Entretanto, a identificação da causa de uma anomalia depende da análise conjunta das componentes espectrais, da velocidade de rotação, das características do equipamento e de seu histórico operacional.

Entre os registros disponibilizados encontra-se o acompanhamento do motor de um agitador de polpa. Nesse caso, foram identificados níveis elevados de vibração associados à

SENSORES DE VIBRAÇÃO NA MANUTENÇÃO PREDITIVA INDUSTRIAL: ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO ONLINE

frequência de defeito do rolamento. Após a intervenção de manutenção, observou-se redução acentuada da aceleração, conforme apresentado na Figura 10.

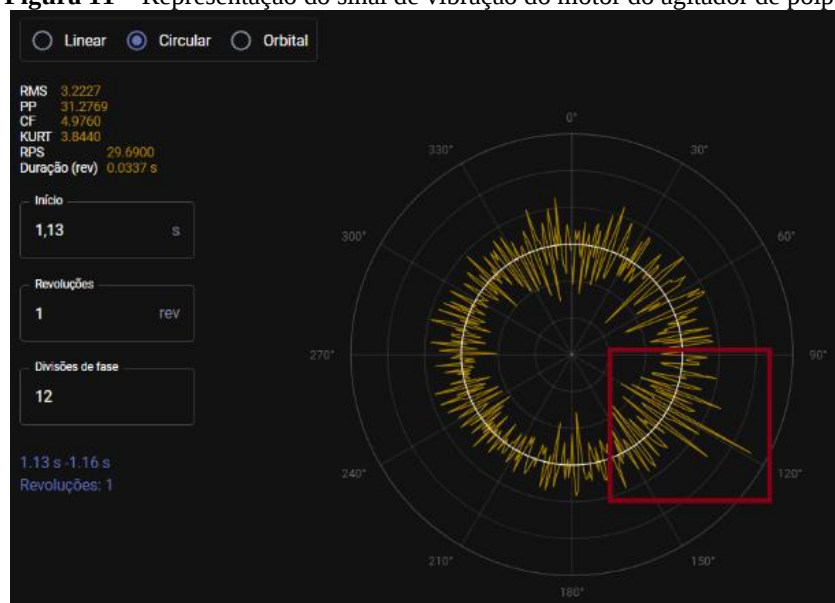
Figura 10 – Evolução da aceleração no motor de um agitador de polpa.



Fonte: Dynamox (2023).

A Figura 11 apresenta uma representação do sinal associada ao mesmo equipamento, na qual a região destacada indica a ocorrência de um pico de vibração. A análise dessas informações contribuiu para a programação da intervenção antes da evolução da condição para danos mais severos no rolamento ou no motor.

Figura 11 – Representação do sinal de vibração do motor do agitador de polpa.



Fonte: Dynamox (2023).

O sistema também disponibiliza um recurso de assistência à tomada de decisão, denominado *Decision Making Assistant* (DMA), que organiza os ativos de acordo com os níveis de alerta de vibração e temperatura. Na interface apresentada na Figura 12, os círculos verdes representam ativos sem alertas ativados, os amarelos indicam o primeiro nível de alerta e os vermelhos sinalizam condições classificadas como críticas.

A priorização visual dos ativos auxilia os profissionais de manutenção a direcionar a análise para os equipamentos que apresentam maior criticidade. Esse recurso não substitui o diagnóstico técnico, mas pode auxiliar na triagem dos registros e no direcionamento da análise para os ativos classificados com maior criticidade.

SENSORES DE VIBRAÇÃO NA MANUTENÇÃO PREDITIVA INDUSTRIAL: ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO ONLINE

Figura 12 – Interface do sistema de assistência à tomada de decisão.

Laudo	Máquina	Spot	Tendência	Vel. média (mm/s)	Temp. média (°C)	Acel. média (g)	BAT	MEM	Gateway	Sincronização	
										Telemetria	Espectro
	7210-BEN-USC-041-PE-01	MT - MC LA		15,84 -	28,90 -	0,17 -			DyG.10.A18.1061	há 2 horas	há 5 horas
	7210-LV-VZ-N700-VT08	MT - MC LA		5,99 -	59,62 -	0,21 -			DyG.00.A09.0010	há um minuto	há 10 horas
	7210-BEN-USC-041-PE-01	MT - MC LQA		12,67 -	26,86 -	0,16 -			DyG.10.A18.1061	há 2 horas	há 6 horas
	7210-BEN-USW-031-TC-03	MT - MC LA		4,01 -	43,75 -	0,69 -			DyG.10.A18.1270	há uma hora	há 20 horas
	7210-BEN-USW-031-TC-03	MT - MC LQA		5,98 -	31,49 -	0,85 -			DyG.10.A18.1270	há uma hora	há 21 horas
	7210-BEN-USW-031-TC-12	MT - CARCAÇA		2,36 -	37,34 -	0,21 -			DyG.10.A18.1270	há 2 horas	há um dia
	7210-BEN-USW-031-TC-12	RD - CARCAÇA		1,91 -	36,78 -	0,19 -			DyG.10.A18.1270	há 2 horas	há um dia
	7210-BEN-USW-031-TC-05	MT - MC LQA		0,06 -	36,09 -	0,01 -			DyG.10.A18.1042	há 2 horas	há 2 dias
	7210-BEN-USW-031-TC-06	MT - MC LA		5,61 -	38,18 -	1,32 -			DyG.10.A18.1270	há 2 horas	há um dia
	7210-BEN-USW-031-AP-01	RD - EE		0,99 -	40,49 -	0,60 -			DyG.00.007.0086	há 3 horas	há 3 horas
	7210-LV-EN-N347-BA02	MT - MC LQA		3,40 -	46,93 -	1,39 -			DyG.10.A18.1295	há 34 minutos	há 9 horas
	7210-LV-EN-N347-BA02	BB - MC LA		7,52 -	41,99 -	1,90 -			DyG.10.A18.1295	há 26 minutos	há 9 horas
	7210-LV-EN-N347-BA03	BB - MC LA		9,56 -	53,16 -	2,14 -			DyG.10.A18.1295	há 18 minutos	há 9 horas

Fonte: Dynamox (2023).

Considerando as funcionalidades documentadas nas fontes analisadas, o sistema empregado pela Nexa Resources apresenta transmissão automatizada dos dados e reúne, em uma única plataforma, históricos, limites de alerta, análise espectral e priorização dos ativos. Entretanto, a comparação deve considerar que, para esse sistema, também foram disponibilizados registros de aplicação industrial, proporcionando maior nível de detalhamento do que aquele disponível para algumas das demais soluções. Além disso, não foram obtidas informações quantitativas comparáveis sobre custos de aquisição e implantação, precisão dos diagnósticos ou impactos sobre indicadores de disponibilidade e confiabilidade. Dessa forma, as características observadas não constituem comprovação de superioridade econômica ou operacional do sistema.

4.5 Análise comparativa dos sistemas

As soluções examinadas apresentam diferenças quanto ao grau de automação, às variáveis monitoradas e aos recursos disponíveis para interpretação dos dados. O sistema de Khan et al. (2019) demonstra uma arquitetura baseada em Internet das Coisas capaz de integrar sensores e comunicação remota, mas se concentra principalmente na aquisição e visualização dos sinais. A solução apresentada por Dol e Bhinge (2018) acrescenta maior diversidade de variáveis e análise no domínio da frequência. O sistema analisado por Martins e Fabro (2020), por sua vez, incorpora histórico e limites de alerta, embora dependa da aproximação de uma pessoa para sincronização das informações.

No caso da Nexa Resources, a utilização de gateways reduz a necessidade de intervenção humana na transmissão dos dados. A plataforma também reúne histórico, limites de alerta, análise espectral e priorização dos ativos. Essas funcionalidades representam maior integração entre aquisição, visualização e apoio à tomada de decisão. Contudo, os dados disponíveis não permitem comparar quantitativamente custos, confiabilidade, disponibilidade ou redução das paradas entre as soluções.

O Quadro 1 sintetiza as características identificadas com base nas categorias definidas na metodologia.

A comparação evidencia diferentes níveis de integração funcional entre as soluções selecionadas, desde arquiteturas voltadas principalmente à aquisição e transmissão de sinais até plataformas que reúnem diferentes etapas do monitoramento. Entretanto, essas diferenças não permitem concluir, isoladamente, que uma solução seja superior em qualquer aplicação. A escolha do sistema deve considerar a criticidade dos ativos, a infraestrutura existente, a

SENSORES DE VIBRAÇÃO NA MANUTENÇÃO PREDITIVA INDUSTRIAL: ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO ONLINE

periodicidade necessária das medições, os recursos técnicos disponíveis e os objetivos da estratégia de manutenção.

Quadro 1 – Comparação entre os sistemas de monitoramento analisados

Sistema ou estudo	Variáveis monitoradas	Aquisição e transmissão	Recursos de análise e acompanhamento	Principais limitações identificadas
Khan et al. (2019)	Vibração, temperatura e corrente elétrica.	Sensores conectados a microcontrolador, com transmissão por módulos de comunicação sem fio.	Visualização dos registros e acompanhamento remoto das variáveis.	Não demonstra análise espectral integrada, níveis de criticidade ou priorização automática dos ativos.
Dol e Bhinge (2018)	Vibração, temperatura, rotação, tempo de funcionamento e parâmetros de produtividade.	Sensores integrados aos motores e dados disponibilizados em plataforma digital.	Histórico, relatórios e análise espectral por Transformada Rápida de Fourier.	Aplicação vinculada à infraestrutura tecnológica do fabricante e ausência de avaliação quantitativa dos impactos sobre a manutenção.
Martins e Fabro (2020)	Vibração e temperatura.	Registros periódicos, com sincronização dependente da aproximação de uma pessoa utilizando aplicativo móvel.	Histórico de medições e limites de alerta.	Menor grau de automação na transmissão e possível atraso entre a aquisição e a disponibilização dos dados.
Sistema Dynamox empregado pela Nexa Resources	Vibração e temperatura.	Aquisição programada e transmissão automatizada por gateways conectados à rede sem fio.	Histórico, limites de alerta, análise espectral e priorização dos ativos pelo DMA.	Ausência de dados quantitativos comparáveis sobre custos, precisão dos diagnósticos e efeitos sobre indicadores operacionais; maior nível de detalhamento decorrente da disponibilidade adicional de registros de aplicação industrial.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Também se observa que o aumento da automação não elimina a necessidade de análise especializada. Alertas, históricos e espectros auxiliam na identificação de alterações, mas sua interpretação depende das características do equipamento, das condições de operação e da qualidade dos dados coletados.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo comparou diferentes sistemas de monitoramento baseados em sensores de vibração aplicados à manutenção preditiva industrial, considerando as variáveis monitoradas, os procedimentos de aquisição e transmissão dos dados, a necessidade de intervenção humana, os recursos de análise espectral, a geração de alertas e o apoio à tomada de decisão.

Os resultados evidenciam diferentes níveis de automação e capacidade analítica entre as soluções selecionadas. O sistema de Khan et al. (2019) demonstra a possibilidade de integrar sensores e comunicação remota em uma arquitetura baseada em Internet das Coisas. A solução apresentada por Dol e Bhinge (2018) acrescenta maior diversidade de variáveis e análise no domínio da frequência, enquanto o sistema analisado por Martins e Fabro (2020) disponibiliza histórico e limites de alerta, embora a sincronização dos dados dependa da aproximação de uma pessoa com o aplicativo.

No caso da Nexa Resources, o sistema Dynamox apresenta maior integração entre aquisição, transmissão e interpretação dos registros observados. A utilização de gateways reduz a necessidade de intervenção humana na transferência dos dados, enquanto recursos de histórico, limites de alerta, análise espectral e priorização dos ativos apoiam o acompanhamento das condições operacionais. O caso do motor de um agitador de polpa exemplifica essa aplicação, tendo sido observada redução acentuada da aceleração após a intervenção de manutenção.

A comparação também evidencia que maior automação não elimina a necessidade de avaliação técnica. A interpretação dos registros depende da qualidade das medições, das características dos sensores, das condições de instalação e operação, da configuração dos limites de alerta e do conhecimento sobre o comportamento do equipamento.

Os resultados devem, entretanto, ser interpretados no contexto exploratório desta pesquisa. Os três sistemas provenientes da literatura e o sistema Dynamox empregado pela Nexa Resources não foram analisados a partir de fontes de evidência equivalentes, uma vez que, para este último, também foram disponibilizados registros de aplicação industrial. Além disso, não foram obtidos indicadores quantitativos comparáveis de custo, disponibilidade, confiabilidade, tempo de parada ou precisão dos diagnósticos. Assim, os resultados permitem comparar funcionalidades das soluções selecionadas, mas não demonstrar superioridade econômica ou operacional de determinado sistema.

Conclui-se, portanto, que a integração entre sensores de vibração e plataformas de monitoramento online pode ampliar os recursos disponíveis para acompanhamento dos ativos e apoiar o planejamento de intervenções de manutenção. Como continuidade da pesquisa, recomenda-se avaliar essas soluções por meio de indicadores quantitativos, como custo de implantação, disponibilidade dos equipamentos, tempo médio entre falhas, tempo médio para reparo e redução das paradas não programadas, além de ampliar o número de equipamentos e o período de acompanhamento.

REFERÊNCIAS

Abreu, R. A. de. (2023). *Lubrificantes e lubrificação*. Edição do autor.

Arco-Verde, M. M. (2008). *Identificação de falhas em sistemas rotativos empregando técnicas não-lineares* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro]. COPPE/UFRJ. https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrj-pem_upl/THESIS/135/pemufrj2008mscmelquesedequemeloarcoverde.pdf

- Chu, T., Nguyen, T., Yoo, H., & Wang, J. (2024). A review of vibration analysis and its applications. *Heliyon*, 10(5), e26282. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26282>
- Dol, S., & Bhinge, R. (2018). SMART motor for Industry 4.0. In *2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxt)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ETECHNXT.2018.8385291>
- Dynamox. (2023). *Plataforma Dynamox* [Plataforma de monitoramento de ativos].
- Goldman, S. (1999). *Vibration spectrum analysis: A practical approach* (2nd ed.). Industrial Press.
- Kardec, A., & Nascif, J. (2009). *Manutenção: Função estratégica* (3ª ed. rev. e ampl.). Qualitymark.
- Khan, N., Rafiq, F., Abedin, F., & Khan, F. U. (2019). IoT based health monitoring system for electrical motors. In *2019 15th International Conference on Emerging Technologies (ICET)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICET48972.2019.8994398>
- Lemos, M. A., Albernaz, C. M. R. M., & Carvalho, R. A. de. (2011). Qualidade na manutenção. In *Anais do XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. Associação Brasileira de Engenharia de Produção.
- Mallioris, P., Aivazidou, E., & Bechtsis, D. (2024). Predictive maintenance in Industry 4.0: A systematic multi-sector mapping. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 50, 80–103. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.02.003>
- Martins, F. J., & Fabro, E. (2020). Uso do sensor inteligente na manutenção preditiva do motor de uma extrusora. *Scientia cum Industria*, 8(2), 1–9. <https://doi.org/10.18226/23185279.v8iss2p1>
- Rao, S. S. (1995). *Mechanical vibrations* (3rd ed.). Addison-Wesley.
- Romanssini, M., de Aguirre, P. C. C., Compassi-Severo, L., & Girardi, A. G. (2023). A review on vibration monitoring techniques for predictive maintenance of rotating machinery. *Eng*, 4(3), 1797–1817. <https://doi.org/10.3390/eng4030102>
- Sá, M. (2000). *Curso de vibrações* [Apostila de curso]. Petrobras/E&P-BC/GELOG/GEOFI/GMAN.
- Tama, B. A., Vania, M., Lee, S., & Lim, S. (2023). Recent advances in the application of deep learning for fault diagnosis of rotating machinery using vibration signals. *Artificial Intelligence Review*, 56, 4667–4709. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10293-3>
- Tiboni, M., Remino, C., Bussola, R., & Amici, C. (2022). A review on vibration-based condition monitoring of rotating machinery. *Applied Sciences*, 12(3), 972. <https://doi.org/10.3390/app12030972>

**SENSORES DE VIBRAÇÃO NA MANUTENÇÃO PREDITIVA INDUSTRIAL: ANÁLISE
COMPARATIVA DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO ONLINE**

Vieira, R. C. da C., Pereira, A. G., Honório, C. da S., Souza, E. J. R. de, & Bezerra, N. C. de P. (2022). Aplicação da ferramenta FMEA no processo de manutenção. *Brazilian Journal of Development*, 8(6), 44026–44041. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n6-097>

WEG. (2021). *WEG Motor Scan: Manual geral de instalação e operação*. WEG.