



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

THOMAZ ÉDERSON DOS SANTOS PEREIRA

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES
MECÂNICAS: ESTUDO DE CASO

RUSSAS

2026

THOMAZ ÉDERSON DOS SANTOS PEREIRA

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS:
ESTUDO DE CASO

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia mecânica do campus de Russas Universidade Federal do Ceará como requisito para a obtenção do Título de Bacharel em engenharia mecânica.

Orientadora: Profa. Dra. Caroliny Gomes de Oliveira

RUSSAS

2026

THOMAZ ÉDERSON DOS SANTOS PEREIRA

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS:
ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação
em Engenharia mecânica do Centro de
tecnologia da Universidade Federal do Ceará
como requisito para a obtenção do Título de
Bacharel em engenharia mecânica.

Aprovada em: 22/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. Caroliny Gomes de Oliveira.
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira
Universidade Estadual do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ramon Rudá Brito Medeiros
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais, namorada, amigos e professores que me ajudaram e apoiaram nessa jornada de graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me mantido firme durante todo este projeto de pesquisa, com saúde, sabedoria e forças para superar os desafios e chegar até o final.

Aos meus pais, Celiane Oliveira e Antonio Soares, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando incondicionalmente ao longo de toda a minha trajetória acadêmica e pessoal, auxiliando em tudo que era necessário.

À minha professora orientadora, Profa. Dra. Caroliny Gomes de Oliveira, por aceitar me guiar neste trabalho, com paciência, dedicação e conhecimento técnico, contribuindo de forma essencial para a realização desta pesquisa.

A minha namorada Rafaela Albuquerque que sempre esteve comigo ao decorrer desses anos de formação, incentivando e ajudando em todos os momentos, com companheirismo e disposição. Aos meus avós tios e primos, que sempre apoiaram e me ajudaram da forma que foi possível. Aos meus colegas e amigos, que estiveram comigo durante toda essa jornada, sempre prontos a ajudar.

Também agradecimento aos professores Prof. Dr. Edvan Cordeiro de Miranda, Prof. Dr. Ramon Rudá Brito Medeiros, Profa. Dra. Sílvia Teles Viana, Prof. Mateus Do Nascimento Lira, Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães o, Prof. Dr. George Luiz e todos os demais professores que me auxiliaram, por todo apoio e ajuda nessa reta final de graduação.

Agradeço também aos amigos e gestores da empresa que colaboraram com a realização desta pesquisa, disponibilizando dados, suporte técnico e informações essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste projeto. Cada gesto de apoio fez diferença nessa conquista.

RESUMO

Este trabalho aborda a implementação de um sistema inteligente de análise de vibrações mecânicas, utilizando sensores IoT (*Internet of Things*) e inteligência artificial (IA) para aprimorar a manutenção preditiva em equipamentos industriais críticos, com foco em guindastes. Esse conhecimento se faz necessário para antecipar falhas antes que ocorram, reduzindo custos operacionais e aumentando a segurança. Foram instalados sensores acelerômetros conectados a uma plataforma digital, permitindo o monitoramento contínuo e a geração de alertas automáticos baseados em padrões de vibração. Os resultados demonstraram a eficácia do sistema ao detectar anomalias em tempo real que seriam de mais difícil visualização em comparação com métodos tradicionais, validando sua eficiência técnica. No estudo de caso, a substituição preventiva de um rolamento evitou prejuízos estimados em cerca de R\$ 12,9 milhões, reforçando o impacto econômico positivo da solução. Conclui-se que a integração entre dados precisos e conhecimento técnico humano é essencial para transformar a manutenção em um processo estratégico, alinhado às demandas da Indústria 4.0, contribuindo para o ramo da engenharia mecânica ao validar a aplicação de tecnologias IoT e IA na indústria, oferecendo informações para replicabilidade da aplicação.

Palavras-chave: vibração mecânica; manutenção preditiva; sensores iot; inteligência artificial; guindastes.

ABSTRACT

This work presents the implementation of an intelligent mechanical vibration analysis system, utilizing IoT (Internet of Things) sensors and artificial intelligence to enhance predictive maintenance in critical industrial equipment, with a focus on cranes. Such knowledge is essential to anticipate failures before they occur, thereby reducing operational costs and increasing safety. Accelerometer sensors were installed and connected to a digital platform, enabling continuous monitoring and automatic alert generation based on vibration patterns. The results demonstrated the system's effectiveness in detecting real-time anomalies that are more difficult to identify using traditional methods, validating its technical efficiency. In the case study, the preventive replacement of a bearing avoided estimated losses of approximately R\$ 12.9 million, reinforcing the positive economic impact of the solution. It is concluded that the integration of precise data and human technical expertise is essential to transform maintenance into a strategic process aligned with Industry 4.0 demands, contributing to the field of mechanical engineering by validating the application of IoT and AI technologies in industry, and providing information for replicability of the application.

Keywords: mechanical vibration; predictive maintenance; iot sensors; artificial intelligence. cranes.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Justificativa.....	11
1.2	Objetivo geral.....	12
1.3	Objetivos específicos	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Fundamentos teóricos de vibração mecânica	14
2.1.1	<i>Conceitos básicos de vibração</i>	<i>15</i>
2.1.2	<i>Tipos de vibração</i>	<i>17</i>
2.2	Princípios de análise de vibração.....	19
2.2.1	<i>Parâmetros de vibração</i>	<i>19</i>
2.2.2	<i>Métodos de análise.....</i>	<i>21</i>
2.2.3	<i>Normas regulamentadoras</i>	<i>21</i>
2.3	Métodos de medição e monitoramento de vibração.....	22
2.3.1	<i>Instrumentação para medição de vibração</i>	<i>22</i>
2.4	Aplicações de análise de vibração na manutenção industrial.....	23
2.4.1	<i>Vibração em máquinas industriais.....</i>	<i>24</i>
2.4.2	<i>Vibração em estruturas civis.....</i>	<i>25</i>
2.4.3	<i>Vibração em equipamentos automotivos.....</i>	<i>26</i>
2.4.4	<i>Sensores de vibração.....</i>	<i>26</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	Descrição do sistema de medição e monitoramento de vibração.....	28
3.1.1	<i>Equipamento e software.....</i>	<i>29</i>
3.1.2	<i>Configuração do sistema de medição</i>	<i>31</i>
3.2	Procedimentos para coleta de dados de vibração	33
3.3	Informações dos dados coletados.....	35
3.3.1	<i>Descrição dos dados coletados.....</i>	<i>35</i>

3.3.2	<i>Local e período de coleta de dados</i>	36
3.4	Justificativa da escolha dos métodos utilizados.....	36
3.5	Implementação do sistema de monitoramento de vibração	37
3.6	Descrição do sistema de hardware e software utilizado	38
3.6.1	<i>Características do equipamento de medição</i>	39
3.7	Detalhes da instalação do sistema no contexto específico.....	39
3.7.1	<i>Preparação do local de instalação</i>	39
3.8	Calibração do equipamento de medição de vibração	40
3.8.1	<i>Procedimentos de calibração</i>	40
3.9	Métodos de processamento e análise dos dados de vibração	41
3.9.1	<i>Limpeza e pré-processamento dos dados</i>	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1	Análise de dados coletados	42
4.1.1	<i>Discussão da análise preliminar dos dados</i>	50
4.2	Estimativa de economia financeira com base na falha evitada	51
4.3	Estudo de Caso	52
4.4	Apresentação e análise de caso	53
4.4.1	<i>Descrição do caso</i>	53
4.4.2	<i>Análise dos dados de vibração coletados</i>	53
5	CONCLUSÃO	59
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	59
	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

Manter uma máquina funcionando de forma segura e eficiente sempre foi um dos maiores desafios dentro da indústria. Ao passar do tempo, à medida que as operações se tornaram mais complexas e exigentes, a necessidade de entender o comportamento dos equipamentos antes que uma falha aconteça deixou de ser apenas uma vantagem e passou a ser uma exigência. Foi nesse contexto que a análise de vibrações começou a ganhar espaço, ainda na década de 1970, quando a indústria petroquímica buscava maneiras de prevenir quebras inesperadas e melhorar o desempenho de seus sistemas rotativos.

Com a evolução da tecnologia, diversas ferramentas e aplicações foram desenvolvidas em diversas áreas, e a indústria é um dos pontos principais dessas mudanças, aplicação de equipamentos tecnológicos, computadores de alta performance, ferramentas de uso cotidiano e específico, com o passar do tempo essas ferramentas se tornaram mais compactas e precisas. Hoje, com o avanço da conectividade e da inteligência artificial, é possível monitorar a saúde de um equipamento em tempo real, mesmo à distância, com alertas automáticos que indicam qualquer comportamento fora do padrão esperado. Essa revolução tecnológica tem transformado a forma como as empresas cuidam dos seus ativos, e é justamente nesse cenário que este trabalho se insere.

A proposta deste estudo nasce de uma pergunta prática e relevante, como um sistema moderno de análise de vibrações, com monitoramento contínuo e uso de inteligência artificial, pode tornar a manutenção preditiva mais eficiente em equipamentos industriais críticos, aqueles os quais a sua quebra causa um grande impacto na produção, como os guindastes de movimentação de containers em um porto, que conta com diversos componentes rotativos de alta criticidade, como redutores, motores elétricos e mancais de suporte de grandes cargas.

É buscado implementar e avaliar a aplicação de um sistema inteligente de análise de vibrações mecânicas, com foco na melhoria da manutenção preditiva. Para isso, busca-se: entender o funcionamento e as vantagens dos sensores utilizados, definir a melhor configuração de coleta de dados, avaliar o desempenho da plataforma online de monitoramento e comparar os resultados obtidos com os métodos tradicionais, considerando aspectos como confiabilidade, custos e segurança.

Através da instalação de sensores acelerômetros conectados a uma rede via internet móvel, responsáveis por captar sinais de vibração e enviá-los continuamente para

uma plataforma digital. Essa plataforma realiza análises automáticas e gera alertas quando há sinais de anomalias, permitindo que as equipes técnicas tomem decisões com base em informações atualizadas, sem a necessidade de se deslocar até o equipamento. Essa abordagem, além de prática, reduz riscos operacionais e proporciona uma visão detalhada da condição dos ativos ao longo do tempo.

Ao longo deste trabalho, será demonstrado como a integração de tecnologia, conectividade e conhecimento técnico pode mudar como a manutenção é feita. Mais do que evitar falhas, o objetivo é antecipá-las, de forma confiável, acessível e compatível com as exigências da indústria moderna. Ao tornar essas ferramentas mais conhecidas e aplicadas, é possível contribuir não apenas para o aumento da produtividade, mas também para uma cultura de manutenção mais estratégica, segura e inteligente.

1.1 Justificativa

A implementação de um sistema de análise de vibrações mecânicas utilizando sensores IoT e inteligência artificial é fundamental para reduzir custos e melhorar a eficiência operacional nas indústrias. Durante o acompanhamento da implementação do sistema foi possível perceber a eficácia da análise de vibrações como ferramenta para detectar falhas precocemente, conforme destacado por Mobley (2002).

A adoção de tecnologias preditivas, como a monitorização de vibrações, possibilita a antecipação de falhas e a otimização das manutenções, resultando em maior confiabilidade dos equipamentos e redução de custos inesperados. Segundo Jardine, Lin e Banjevic (2006), a manutenção baseada nas condições reais dos equipamentos não só melhora a confiabilidade, mas também otimiza o uso de recursos, algo que se pôde observar diretamente no ambiente de trabalho.

Este trabalho tem relevância para a Engenharia por explorar tecnologias avançadas de análise de vibração de dispositivos IoT e inteligência artificial, essenciais para a transformação da Indústria 4.0 e melhoria no entendimento dessa aplicação dentro da manutenção. A motivação para o estudo surgiu da experiência prática adquirida na implementação dessas tecnologias em uma empresa portuária, inspirando-se a aprofundar os conhecimentos sobre análise de vibrações mecânicas e contribuir para soluções mais inteligentes e eficientes para a manutenção de ativos.

O estudo parte da instalação dos equipamentos de medição, considerando os cuidados e configurações necessárias, e segue com a inserção das informações essenciais para o bom funcionamento do sistema. A interação com esses recursos e os dados fornecidos pela análise permitiram uma aprendizagem prática sobre como interpretar os espectros de vibração e aplicar essas ferramentas de forma eficiente na identificação de falhas em ambientes industriais.

1.2 Objetivo Geral

Implementar um sistema de monitoramento de vibrações mecânicas utilizando sensores IoT e inteligência artificial.

1.3 Objetivos Específicos

- Validar a eficácia do sistema proposto por meio de testes em equipamentos reais, utilizando sensores IoT e inteligência artificial, e comparando os resultados com métodos tradicionais de análise vibracional, tanto em termos de detecção de falhas quanto de custo-benefício da operação.
- Comparar os custos médios praticados por empresas terceirizadas de análise vibracional com o investimento mensal no sistema implantado, considerando a frequência de monitoramento, suporte técnico, tempo de resposta e praticidade.
- Analisar o impacto da implementação do sistema na redução de paradas não programadas, a partir do monitoramento contínuo dos componentes críticos e da troca preventiva de peças identificadas como em risco de falha, como no caso do mancal do dromo.
- Avaliar os efeitos diretos na redução dos custos de manutenção corretiva, com base em estudos de caso que mostram a substituição planejada de componentes antes da falha total e seus impactos financeiros diretos na operação.
- Analisar o aumento da segurança operacional por meio da eliminação de inspeções manuais em áreas de risco, usando o monitoramento remoto como substituto de procedimentos de inspeção presencial.

- Avaliar a viabilidade de replicação do sistema em outras máquinas e contextos industriais semelhantes, a partir da análise dos resultados obtidos e das configurações utilizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundamentos teóricos de vibração mecânica

A análise vibracional estuda os movimentos repetitivos dos objetos com o objetivo de compreender os fundamentos teóricos, os princípios de análise vibracional, os métodos de medição e as aplicações práticas de diversos fenômenos. Uma base sólida nesses conceitos permite aos profissionais identificar, analisar e solucionar problemas complexos, promovendo a eficiência e a segurança em diferentes sistemas e estruturas (Rao, 2011).

Além disso, o conhecimento aprofundado dessas áreas é essencial para a implementação de novas tecnologias, o que pode levar a melhorias significativas na produtividade e na sustentabilidade (Jardine, Lin e Banjevic, 2006). No campo da engenharia, por exemplo, a análise detalhada de fenômenos físicos permite o desenvolvimento de máquinas e estruturas mais robustas e duráveis (Kelly, 2012). Na área das ciências aplicadas, esses conhecimentos são utilizados para criar soluções inovadoras que atendem às necessidades específicas de diversos setores, desde a indústria automotiva até a construção civil.

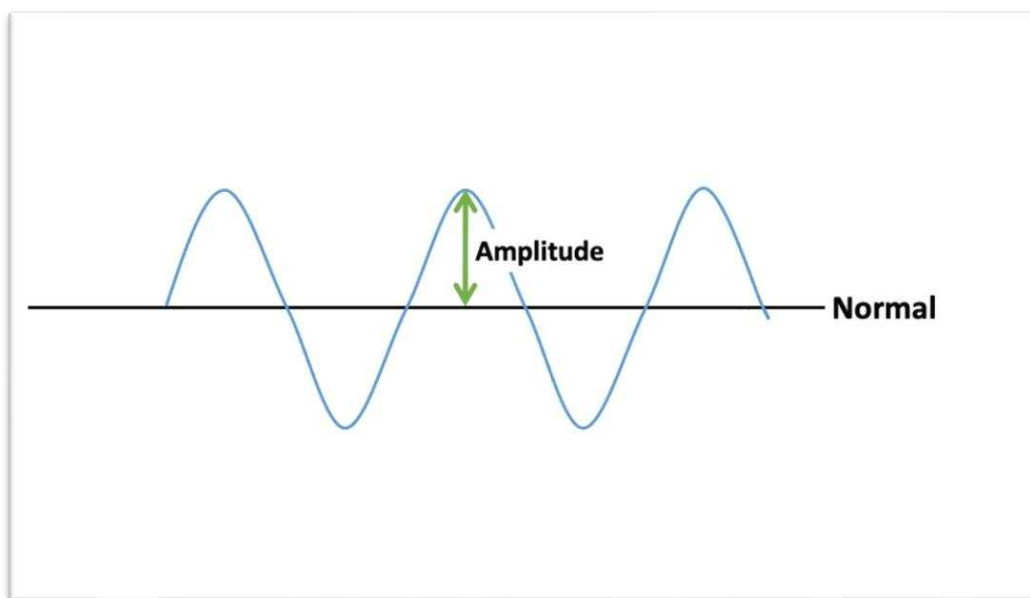
O domínio dos métodos de medição e monitoramento também é crucial, pois garante que as soluções implementadas sejam eficazes e seguras. Além disso, a aplicação prática desses conhecimentos promove a capacidade de prever e mitigar possíveis falhas e riscos, o que é vital para a segurança e o desempenho de sistemas complexos. A integração dessas abordagens teóricas e práticas não só facilita a resolução de problemas técnicos, mas também fomenta a criatividade e a inovação, essenciais para o progresso contínuo em qualquer campo científico ou de engenharia (Inman, 2014).

Por fim, a interdisciplinaridade envolvida no estudo desses conceitos amplia a compreensão e a colaboração entre diferentes áreas do conhecimento, resultando em soluções mais assertivas e eficazes. Dessa forma, a educação e a pesquisa contínua nesses fundamentos são indispensáveis para a evolução tecnológica e para o desenvolvimento de soluções que melhoram a qualidade de vida e promovem um futuro mais sustentável e avançado (Harris & Piersol, 2002).

2.1.1 Conceitos básicos de vibração

A vibração é o estudo dos movimentos repetitivos que objetos realizam em torno de uma posição de equilíbrio. Esse fenômeno está presente em diversos cenários, desde oscilações naturais, como as de uma ponte balançando ao vento, até em sistemas projetados pela engenharia, como motores e máquinas industriais. Entender seus conceitos básicos é fundamental para diagnosticar problemas, evitar falhas e garantir a segurança e eficiência de estruturas e equipamentos, na Figura 1 se tem um exemplo do que se trata a amplitude de uma onda.

Figura 1 - Amplitude de onda

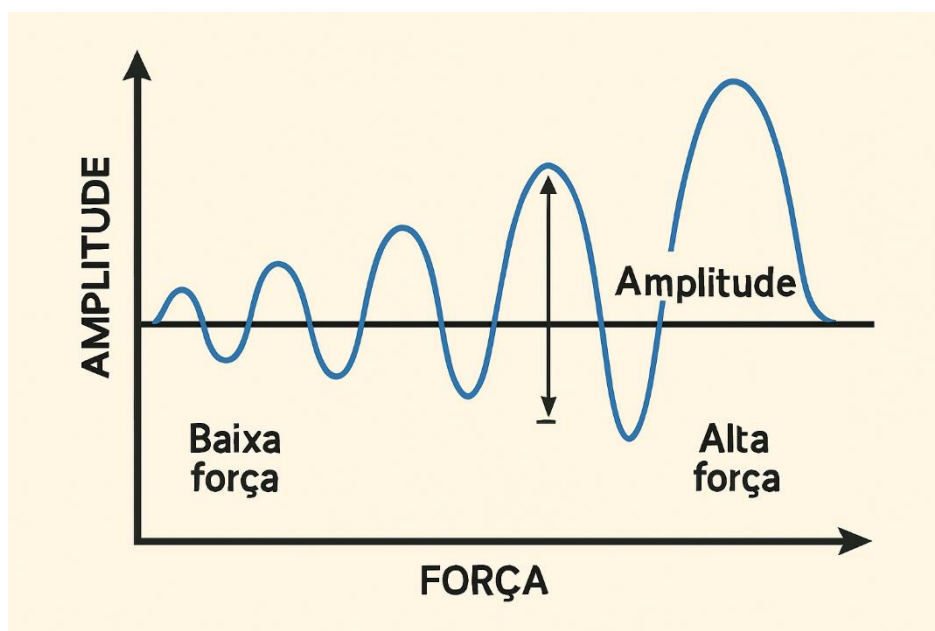


Fonte: Adaptado de Primary science online (2025).

Um dos principais aspectos da vibração é a amplitude, que representa a intensidade do movimento, seja em termos de deslocamento, velocidade ou aceleração. Quanto maior a amplitude, maior a energia envolvida na oscilação, o que pode indicar desde um funcionamento normal até um possível risco de dano (Inman, 2013; Rao, 2011).

Na Figura 2, há uma representação do comportamento da amplitude de acordo com a intensidade de força exercida no corpo, que logo está atrelada a intensidade de vibração.

Figura 2 - Intensidade e amplitude



Fonte: Autoria, própria 2025.

Outro conceito essencial é a frequência, medida em Hertz (Hz), que indica quantos ciclos de vibração ocorrem a cada segundo. Ela depende das características do sistema, como rigidez e massa, e é crucial para prever como um objeto responderá a diferentes estímulos (Thomson & Dahleh, 1997). Já o período é o tempo que um ciclo completo leva para se repetir, enquanto a fase ajuda a entender a sincronia entre diferentes vibrações, sendo muito útil em análises mais complexas (Harris & Piersol, 2002).

Além disso, o amortecimento desempenha um papel importante, pois representa a perda gradual de energia devido a resistências internas e externas, como o atrito. Sem amortecimento, certos sistemas poderiam entrar em ressonância, um fenômeno perigoso em que as vibrações se amplificam excessivamente, podendo levar a falhas catastróficas (Tse, Morse & Hinkle, 1978).

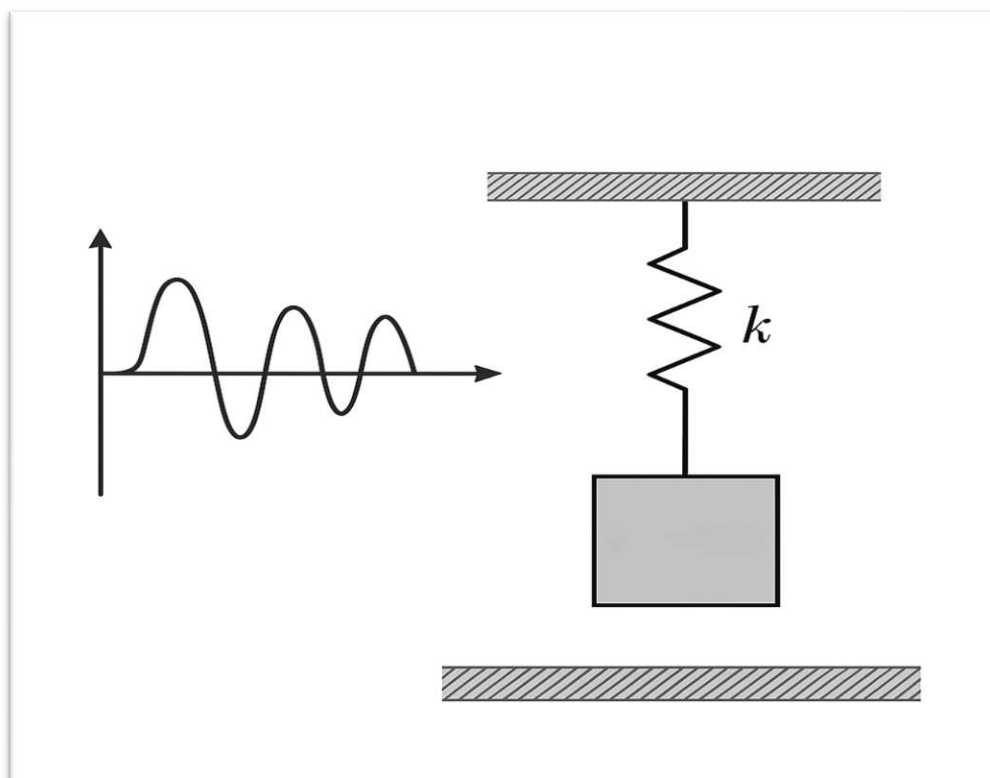
Por fim, todo sistema possui uma frequência natural, que é a taxa na qual ele tende a oscilar quando perturbado. Conhecê-la é vital para evitar a ressonância, já que, se uma força externa vibrar na mesma frequência, as oscilações podem se tornar incontroláveis (Rao, 2011). Dominar esses conceitos não só ajuda a prevenir desgastes e quebras, mas também a otimizar o desempenho de máquinas e estruturas no dia a dia da engenharia.

2.1.2 Tipos de vibração

A vibração pode ser classificada em diferentes tipos, dependendo da origem e das características do movimento oscilatório. Compreender esses tipos é essencial para a análise e o controle das vibrações em sistemas mecânicos. Os principais tipos de vibração são: vibração livre, vibração forçada e vibração amortecida.

A vibração livre ocorre quando um sistema mecânico sofre a influência de uma força momentânea e depois é deixado para oscilar por conta própria, sem a influência contínua de forças externas. A característica principal da vibração livre é que ela ocorre em função das propriedades do sistema, como massa e rigidez, e segue suas frequências naturais. Um exemplo bem comum é o de uma massa ligada a ponta de uma mola, como visto na Figura 3, ao exercermos a força ela oscilará em torno dessa posição devido à ação restauradora da mola. A frequência dessa oscilação é chamada de frequência natural do sistema, e a amplitude da vibração diminui ao longo do tempo devido ao amortecimento (Rao, 2011).

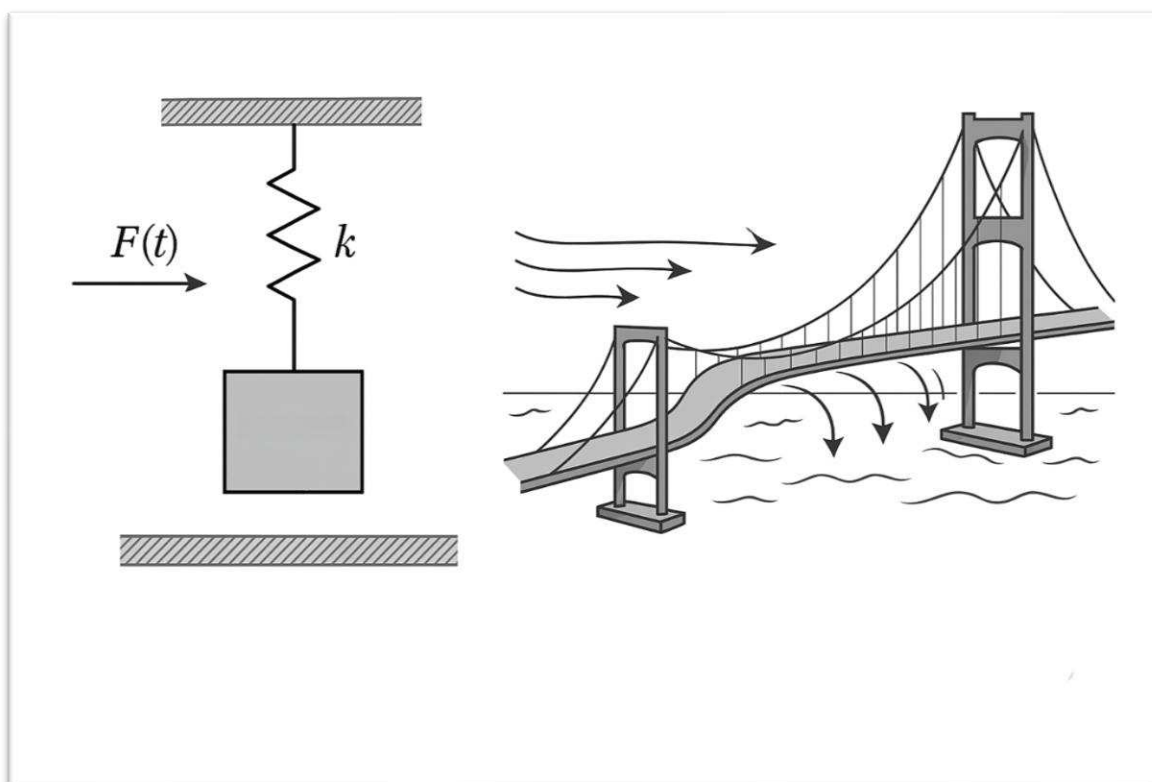
Figura 3 - Amortecimento livre



Fonte: Autoria, própria (2025).

A vibração forçada acontece quando um sistema é energizado durante o período de vibração. Ao contrário da vibração livre, onde o sistema oscila em sua frequência natural, na vibração forçada o sistema oscila na frequência da força aplicada que pode ser harmônica, não-harmônica, periódica ou aleatória. A resposta do sistema depende da relação entre a frequência da força externa e a frequência natural. Se essas frequências coincidirem, pode ocorrer ressonância, resultando em grandes amplitudes de vibração (Thomson, 2018), um grande exemplo de um caso de ressonância foi no colapso da ponte de Tacoma em 1940, onde por conta dos fortes ventos, que fez com que o material da estrutura entrasse em vibração, a estrutura viesse a desabar, um esquema exemplificado pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 - Vibrações forçadas

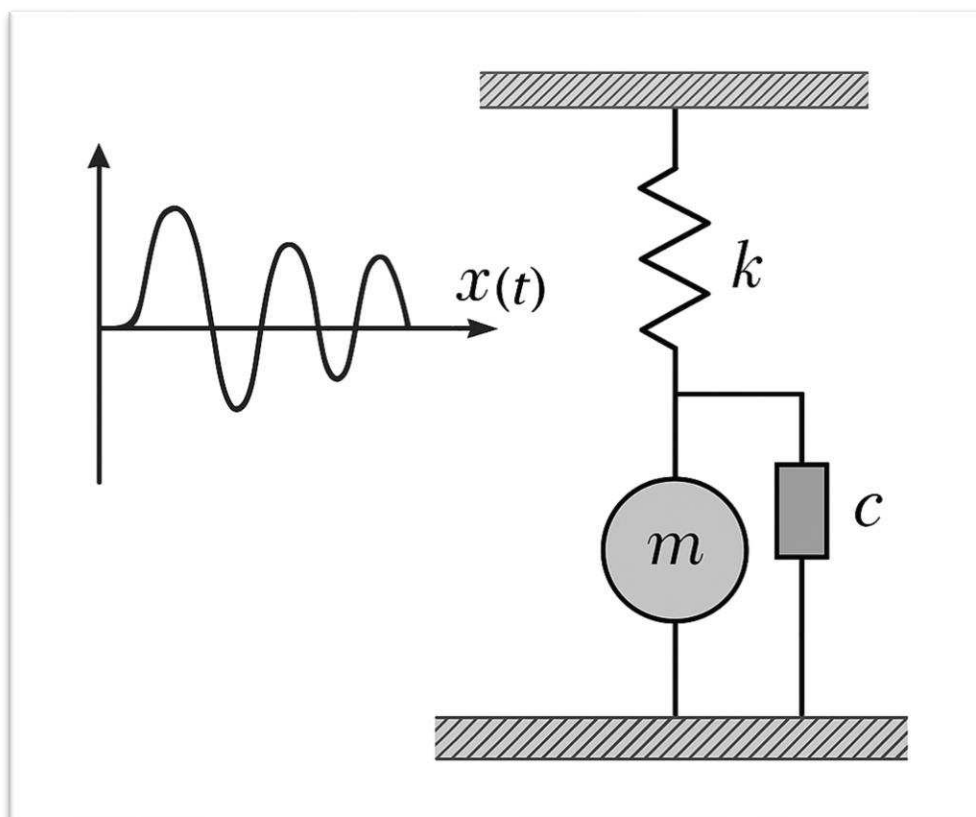


Fonte: Autoria, própria (2025).

A vibração amortecida ocorre quando há um mecanismo de dissipação de energia no sistema que reduz a amplitude das oscilações ao longo do tempo. O amortecimento é crucial para a estabilidade dos sistemas mecânicos, pois evita o aumento excessivo das vibrações. Amortecimento Viscoso é o tipo mais comum, que ocorre quando a força de

amortecimento é proporcional à velocidade do movimento. Exemplos incluem a resistência ao movimento em fluidos, na Figura 5 é possível ver um exemplo do comportamento de onda em sistema amortecido. Amortecimento Coulombiano (ou Seco) acontece da fricção entre superfícies sólidas em contato, onde a força de amortecimento é constante e independente da velocidade.

Figura 5 - Vibração com sistema amortecido



Fonte: Autoria, própria (2025).

2.2 Princípios de análise de vibração

2.2.1 Parâmetros de vibração

A análise de vibração envolve a avaliação de diversos parâmetros que descrevem o comportamento dinâmico de um sistema vibratório. Essas características são essenciais para entender a natureza das vibrações e são indispensáveis para o diagnóstico de problemas e a implementação de soluções no sistema implementado. Os principais pontos

de estudo de vibração incluem a amplitude, a frequência e a fase. Junto a esses parâmetros ainda temos as variáveis de deslocamento, velocidade e aceleração, que são captadas para cada um dos três eixos x, y, z.

A amplitude o pico máximo do deslocamento, velocidade ou aceleração de um ponto a partir de sua posição de equilíbrio. A amplitude fornece informações sobre a intensidade das vibrações e é muito importante para identificar possíveis falhas ou desgastes em componentes mecânicos. Existem três formas principais de expressar a amplitude:

Deslocamento é a distância máxima que um ponto se desloca de sua posição de equilíbrio durante a vibração, medida em unidades de comprimento, como metros (m) ou milímetros (mm).

Velocidade é a taxa de variação do deslocamento com o tempo, medida em metros por segundo (m/s) ou milímetros por segundo (mm/s), sendo mais comumente utilizada em mm. A velocidade é particularmente útil em diagnósticos de vibração porque está relacionada à energia cinética do sistema.

Aceleração é a taxa de variação da velocidade com o tempo, medida em metros por segundo ao quadrado (m/s^2) ou milímetros por segundo ao quadrado (mm/s^2). A aceleração é importante para avaliar as forças dinâmicas atuando no sistema.

Frequência natural é a taxa na qual um objeto vibra quando é perturbado. Um objeto vibrante pode ter uma ou várias frequências naturais. Os osciladores harmônicos simples podem ser usados para modelar a frequência natural de um objeto, além disso é possível descobrir a frequência natural dos sistemas com o *bump test*, que se trata de utilizar de um martelo de borracha para causar uma perturbação externa, e assim com ferramentas de medição, obter a frequência natural do sistema.

Frequência de excitação é a frequência de um equipamento ou fenômeno externos. Como exemplo de fontes de excitação temos a frequência de rotação de uma bomba, uma turbina, ventilador e etc.

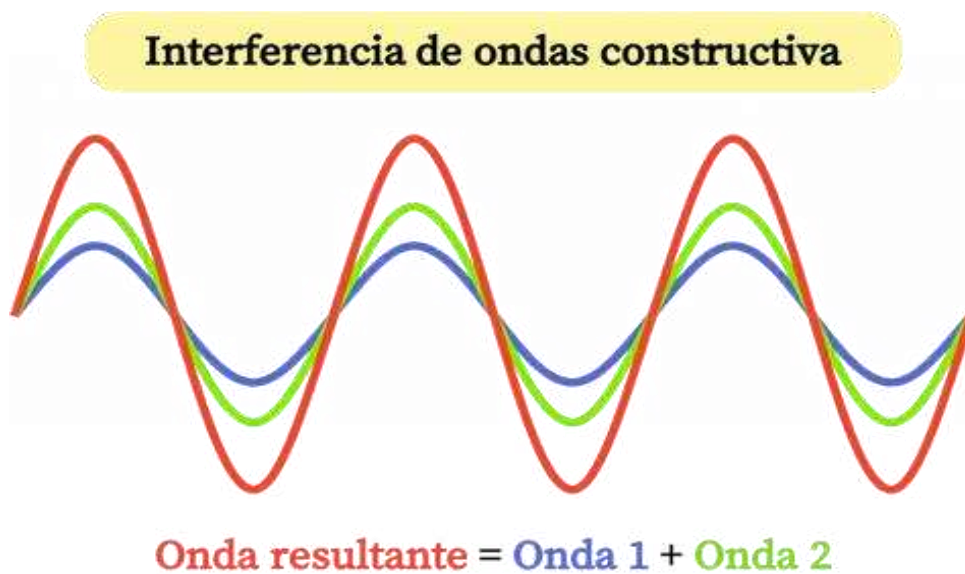
Frequência Harmônica são múltiplos inteiros da frequência fundamental e podem surgir em sistemas vibratórios, onde componentes diferentes vibram em frequências diferentes. A análise de frequência é essencial para identificar ressonâncias e para o design de sistemas que evitam essas condições.

A fase descreve a posição de um ponto em um ciclo de vibração em determinado momento, geralmente medida em graus ou radianos. A fase é particularmente importante

quando se analisa a interação de várias fontes de vibração e a sincronização de movimentos em sistemas.

Diferença de fase entre duas ondas de vibração pode indicar como as vibrações de diferentes partes de um sistema estão interagindo. Se duas ondas estão em fase (0° de diferença), elas podem se somar e resultar em uma amplitude maior. Se estão fora de fase (180° de diferença), podem se cancelar parcialmente, a Figura 6 a seguir é possível ver um exemplo desse fenômeno.

Figura 6 - interferência de ondas construtivas



Fonte: View of manutenção preditiva na indústria 4.0. scientia cum industria

2.2.2 Métodos de análise

Existem vários métodos de análise de vibração, cada um oferecendo *insights* valiosos sobre o comportamento dinâmico de um sistema. A análise de FFT (Transformada Rápida de Fourier) é amplamente utilizada para decompor sinais de vibração no domínio da frequência, facilitando a identificação de componentes de frequência específicos. Por outro lado, a análise de forma de onda permite avaliar as características temporais dos sinais, incluindo forma, ciclo e tempo de duração.

2.2.3 Normas regulamentadoras

Para análise vibracional temos duas normas vigentes, são elas a ISO 10816 e a ISO 20816 que traz algumas mudanças para alguns conceitos e divisões da sua predecessora.

A ISO 10816 nos disponibiliza os critérios para análise de vibração em máquinas rotativas através de medições feitas na estrutura da mesma, que são feitas geralmente por acelerômetros, velocímetros ou sensores de deslocamento. Nela é possível ter informações sobre faixas de severidade de vibrações, limite de vibrações em parâmetros de velocidade e divisões de máquinas por classes.

Na norma ISO 20816 foram atualizadas algumas informações com definições mais claras, informações mais específicas para cada tipo de máquina, além de considerar o fator aceleração, a forma como a ferramenta de medição de vibração é instalada, carga e tipo de operação.

As duas normas são vigentes, mas a ideia é que a futuramente a norma 20816 abranja todo o conteúdo referente a análise de vibração em máquinas rotativas.

2.3 Métodos de medição e monitoramento de vibração

Ao longo do tempo a análise de vibração é amplamente utilizada na manutenção preditiva de máquinas industriais para detectar falhas, avaliar o desgaste de componentes e otimizar a operação. Ao monitorar continuamente os níveis de vibração, é possível identificar padrões anormais que indicam problemas potenciais (Patel & Kumar, 2019).

Um dos principais benefícios da análise de vibração é a sua capacidade de detectar falhas em estágios iniciais, como desalinhamento, desbalanceamento, desgaste de rolamentos e engrenagens, e problemas de lubrificação. Isso é alcançado através do uso de sensores de vibração, como acelerômetros, que captam os sinais de vibração das máquinas e transmitem os dados para sistemas de monitoramento e análise (Brown et al., 2018).

2.3.1 Instrumentação para medição de vibração

A instrumentação para medição de vibração abrange uma variedade de sistemas e dispositivos avançados que realizam as coletas, análises e interpretações de dados de vibração em diferentes contextos industriais. Entre esses dispositivos, destacam-se os

sistemas de aquisição de dados, os analisadores de vibração e os softwares de processamento de sinais, cada um desempenhando um papel na manutenção preditiva e na gestão da saúde dos equipamentos (Santos et al., 2023).

Os sistemas de aquisição de dados são fundamentais na instrumentação de medição de vibração. Eles consistem em hardware especializado que coleta sinais de vibração de sensores, como acelerômetros, velocímetros e transdutores de deslocamento. Esses sistemas capturam dados em alta resolução e os convertem em formato digital para análise subsequente. A precisão e a rapidez na aquisição dos dados são essenciais para garantir que todas as mudanças das vibrações sejam registradas, possibilitando uma análise detalhada e precisa (Brown et al., 2018).

Os softwares de processamento de sinais são ferramentas indispensáveis para a interpretação dos dados de vibração. Eles oferecem uma gama de funcionalidades, desde a visualização de dados em tempo real até a aplicação de algoritmos complexos para a detecção e diagnóstico de falhas. Esses softwares permitem a integração de dados de diferentes fontes e a realização de análises avançadas, como análise modal, análise de envelope e demodulação, que são essenciais para a identificação precoce de problemas e para a implementação de medidas corretivas.

Além disso, muitos desses programas são capazes de gerar relatórios automatizados e gráficos detalhados, facilitando a comunicação dos resultados para a equipe de manutenção e gestão (Patel & Kumar, 2019).

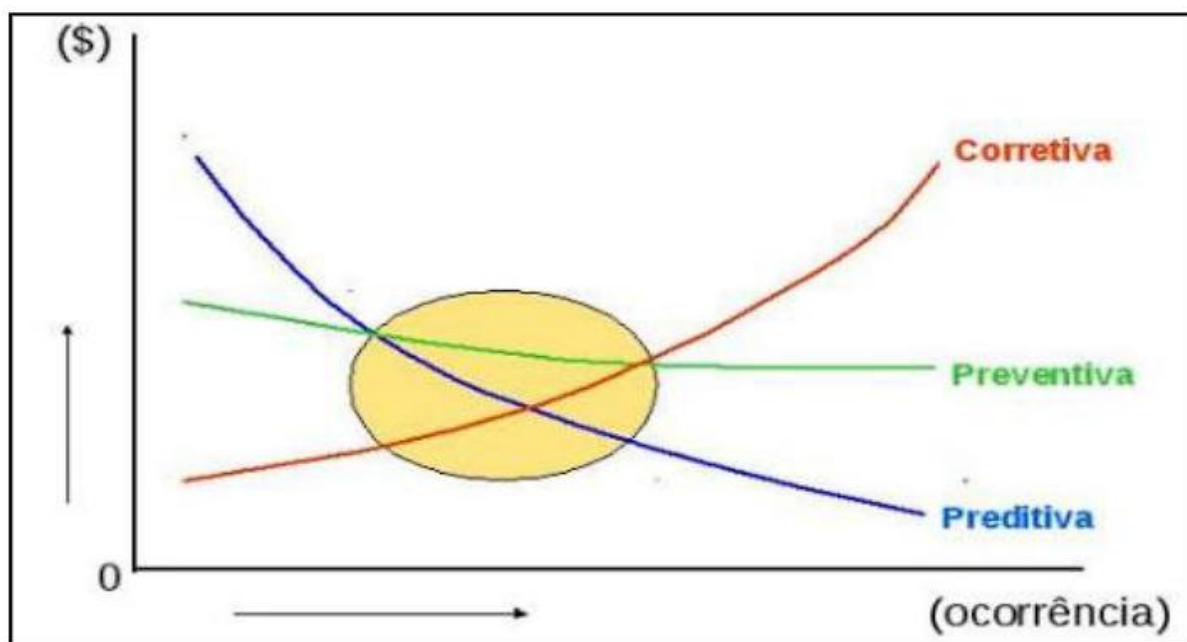
A integração desses sistemas e dispositivos de medição de vibração proporciona uma plataforma robusta para a gestão da saúde dos ativos industriais. A capacidade de monitorar continuamente os níveis de vibração e de analisar os dados em tempo real permite intervenções proativas, minimizando paradas não planejadas e reduzindo custos de manutenção. A instrumentação avançada não só melhora a eficiência operacional, mas também prolonga a vida útil dos equipamentos, assegurando a confiabilidade e a segurança das operações industriais (Brown et al., 2018).

2.4 Aplicações de análise de vibração na manutenção industrial

A manutenção preditiva, como citado anteriormente na seção 2.3.1, vem cada vez mais crescendo e transformando o cotidiano industrial, como cita Luciano Baldissarelli e Elton Fabro (2019, p.4) “o acompanhamento e análise de vibração estão entre os mais

importantes métodos de predição na indústria atualmente “ e vem crescendo cada vez mais, tendo em vista a que o emprego desse tipo de manutenção vem gerado ganhos expressivos de produtividade e diminuindo os gastos com manutenções não previstas, como mostra o gráfico a seguir na Figura 7 a comparação gráfica dos tipos de manutenções aplicadas, onde podemos observar, que embora seja um custo de adição um pouco elevado, ao passar do tempo se obtém bons resultados

Figura 7 - Tipo de manutenção x custo



Fonte: Scientia cum industria, v. 7, n. 2, pp. 12 —22, 2019.

2.4.1 *Vibração em máquinas industriais*

A análise de vibração é amplamente utilizada na manutenção preditiva de máquinas industriais para detectar falhas incipientes, avaliar o desgaste de componentes e otimizar a operação. Ao monitorar continuamente os níveis de vibração, é possível identificar padrões anormais que indicam problemas potenciais, permitindo intervenções proativas para evitar paradas não planejadas e reduzir os custos de manutenção.

Com o passar dos anos, foi obtido um aumento cada vez mais perceptível da procura de prever e manter os equipamentos e ferramentas antes das falhas acontecerem, então para isso foram criadas métricas que são amplamente utilizadas para determinação do tempo útil de um componente, para que assim seja possível o substituir

planejadamente e evitar paradas abruptas, que causam grandes transtornos e custos bem mais altos. Parâmetros como os presentes na Figura 8, são grandes indicadores de falha quando se há grandes alterações ao longo do tempo.

Figura 8: Parâmetros de monitoramento



Fonte: Autoria, própria 2025.

2.4.2 Vibração em estruturas civis

Na engenharia civil, a análise de vibração é empregada para avaliar a integridade estrutural de pontes, edifícios e outras infraestruturas, identificar modos de vibração naturais e detectar danos. A análise modal é frequentemente utilizada para determinar as frequências naturais e os modos de vibração de uma estrutura, permitindo projetar medidas de controle de vibração adequadas para garantir a segurança e o conforto dos ocupantes (Thomson, 2018). Além disso as análises vibracionais têm um papel fundamental na longevidade das construções, utilizando das análises de espectros para assim poder adaptar as estruturas.

2.4.3 *Vibração em equipamentos automotivos*

A análise de vibração é essencial na indústria automotiva para avaliar o desempenho de veículos, diagnosticar problemas de suspensão e direção, e melhorar o conforto do passageiro. Ao analisar os padrões de vibração em diferentes componentes do veículo, os engenheiros podem identificar áreas de preocupação e implementar melhorias de projeto para otimizar a experiência do usuário e garantir a segurança dos ocupantes (Inman, 2014).

Um bom exemplo desse tipo de melhoria são os motores a combustão de três cilindros, um dos grandes problemas para essa inovação automotiva era a quantidade de vibração por desbalanceamento, que era causada pela disposição dos cilindros, com a percepção dessa vibração foram possíveis tomar medidas para ajustar e tornar o motor de três cilindros apto a estar no mercado popular, trazendo inovação e economia, tanto para fabricante quanto para consumidor.

2.4.4 *Sensores de vibração*

O sistema é composto por sensores acelerômetros, dispositivos capazes de detectar variações de vibração nos três eixos principais (X, Y, Z). Esses sensores funcionam convertendo a vibração mecânica em sinais elétricos proporcionais, fundamentando-se na segunda lei de Newton, segundo a qual a força é proporcional à massa e à aceleração. Dessa forma, a vibração é medida indiretamente, com base na força aplicada em um dos eixos do sensor.

Existem dois tipos principais de acelerômetros: piezoelétricos e micro eletromecânicos (MEMS). Os modelos piezoelétricos utilizam cristais sensíveis acoplados a massas sísmicas. Quando uma vibração atinge o sensor, o peso exerce força sobre o cristal, gerando uma carga elétrica proporcional à vibração, que é posteriormente amplificada e processada por circuitos eletrônicos. Estes sensores são amplamente utilizados em ambientes industriais por sua robustez e sensibilidade.

Os sensores MEMS, por sua vez, são produzidos com técnicas de micro fabricação e possuem componentes mecânicos em chips de silício. A detecção ocorre por meio da variação de capacitância entre elementos internos do sensor, conforme se deslocam diante de vibrações externas. Esses sensores têm como vantagens o tamanho reduzido, baixo

custo e capacidade de operar em sistemas integrados com conectividade e inteligência embarcada.

O acelerômetro utiliza de equações utilizando como medidas a força gravitacional terrestre (g) ou utilizando a medida em m/s^2 , eles convertem esse estilo em um sinal elétrico que é processado e analisado pelo sistema. Com essas medidas de aceleração conseguimos assim obter a velocidade, pela equação 1, e deslocamento, pela equação 2, através da integração.

$$1: v(t) = \int a(t) dt$$

$$2: x(t) = \int v(t) dt$$

Além disso também temos a análise realizada ao decorrer do tempo onde obtemos a amplitude das vibrações, seus picos máximos, e seu valor RMS, que é a energia de vibração dada por:

$$3: RMS = \left(\frac{1}{T} \int_0^T a(t)^2 dt \right)^{1/2}$$

- T é o período de tempo da medição
- a(t) é a aceleração instantânea.

Além disso também temos o fator de crista que é dado por:

$$\text{Fator de crista} = \frac{A_{pico}}{RMS}$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foi adotada uma metodologia prática e compatível com a realidade da indústria atual, focada na aplicação de tecnologias modernas de monitoramento. A base do sistema implementado está na instalação de sensores acelerômetros inteligentes, que, conectados a receptores via internet móvel, são responsáveis por enviar dados continuamente para uma plataforma digital. Esses dados são analisados em tempo real por algoritmos de inteligência artificial, que transformam as informações em alertas automáticos, apontando possíveis falhas ou necessidade de intervenções antes mesmo que elas ocorram.

Todo o processo segue os princípios da norma ISO 20816-1:2016, que trata da medição e avaliação de vibrações em máquinas e recomenda o monitoramento contínuo como prática ideal, especialmente em equipamentos críticos. Além disso, os procedimentos adotados também se apoiam nos fundamentos da ISO 13373-1:2015, voltada para técnicas de diagnóstico baseadas em vibrações, com foco em sistemas rotativos. A combinação dessas diretrizes com as soluções tecnológicas aplicadas garantiu um sistema confiável, eficiente e adaptado à rotina intensa de operação dos equipamentos analisados.

Para facilitar o entendimento do que foi feito e de como este capítulo será apresentado, a metodologia será descrita em etapas, desde a escolha e instalação dos sensores até o processamento dos dados e a análise dos resultados. Primeiro, será detalhado o sistema de medição utilizado, seguido pela explicação de como os dados foram coletados e armazenados. Depois, serão mostradas as informações extraídas dessas coletas, os motivos da escolha desse método e, por fim, como esses dados foram processados e analisados na plataforma. Essa organização busca apresentar o caminho completo percorrido durante a implementação do sistema, de forma clara e prática.

3.1 Descrição do sistema de medição e monitoramento de vibração

O estudo foi realizado em uma empresa do setor portuário e logístico, localizada em região litorânea do estado do Ceará, atuando na movimentação de contêineres e cargas diversas. A empresa opera com equipamentos de grande porte, como guindastes portuários, *spreaders* (dispositivo de elevação do guindaste) e veículos de transporte,

inseridos em um ambiente com alta demanda operacional, funcionamento contínuo (24/7) e elevado fluxo de cargas e navios.

A região apresenta clima tropical semiárido, com temperaturas elevadas durante todo o ano (26 °C a 28 °C), alta umidade relativa do ar, exposição constante ao sol e ventos intensos, oriundos do litoral. Essas condições contribuem para o acúmulo de maresia sobre os equipamentos e estruturas metálicas, além da presença de partículas em suspensão provenientes das atividades industriais e da movimentação de granéis.

Esses fatores ambientais podem acelerar o processo de corrosão, afetar a vida útil de componentes, e comprometer a precisão de sensores e dispositivos eletrônicos, especialmente em sistemas de monitoramento de condição. Além disso, o ambiente ruidoso e sujeito a vibrações externas impõe desafios à análise de sinais, exigindo o uso de técnicas adequadas de filtragem e isolamento.

A operação em ambientes abertos e sujeitos à variação térmica e mecânica demanda atenção especial na instalação e proteção dos sensores de vibração, visando assegurar a confiabilidade dos dados coletados para fins de diagnóstico e manutenção preditiva.

3.1.1 Equipamento e software

Para a coleta e análise dos dados de vibração no sistema estudado, foi utilizado o sensor *Smart Trac*, por se tratar de um sensor que conta com plataforma integrada, facilidade de conectividade por dispor de um sistema IoT e com um bom custo benefício, desenvolvido pela empresa brasileira Tractian, especializada em soluções de manutenção preditiva com tecnologias IoT e inteligência artificial. Se trata de um sensor inteligente, compacto e robusto, capaz de realizar a medição de vibração triaxial, temperatura de superfície e tempo de operação (horímetro) de forma contínua e remota (Tractian, 2024a).

Seu funcionamento se baseia na coleta automática de dados, que são transmitidos via rede móvel (3G/4G) diretamente para a plataforma online da Tractian, onde são processados por algoritmos de inteligência artificial. Essa análise em nuvem permite identificar automaticamente falhas potenciais em componentes como mancais, rolamentos e redutores, antes que se manifestem fisicamente, o que se alinha perfeitamente aos princípios da manutenção preditiva (Tractian, 2024b).

Entre os principais recursos do sensor destacam-se o AutoDiagnóstico, que reconhece mais de 70 padrões de falha, e o RPM *Encoder*, que estima a rotação da máquina mesmo sem sensores de velocidade, apenas com base na vibração. Além disso, o sensor conta com a tecnologia *Always Listening (aprendizado contínuo)*, que garante a precisão das coletas mesmo em máquinas com funcionamento intermitente (Tractian, 2024c).

Além do sensor físico, a solução da Tractian conta com uma plataforma online de monitoramento e análise que centraliza todos os dados coletados pelos sensores. Essa plataforma utiliza algoritmos de inteligência artificial para interpretar os sinais de vibração e temperatura, identificando padrões anormais e gerando alertas automáticos para a equipe de manutenção. A interface é intuitiva e permite visualizar o status de cada equipamento em tempo real, acessar espectros de vibração, comparar históricos e emitir diagnósticos preditivos com base em tendências. Isso reduz o tempo de resposta, melhora a tomada de decisão e fortalece a confiabilidade das operações industriais (Tractian, 2024b), na Figura 9, tem-se uma imagem do sensor de vibração da fabricante.

Figura 9: Sensor de vibração Tractian



Fonte: Autoria, própria (2024).

3.1.2 Configuração do sistema de medição

A instalação dos sensores foi realizada de acordo com as diretrizes do fabricante e conforme recomendações da norma ISO 10816, que trata do posicionamento adequado para medições confiáveis. Os sensores foram fixados em pontos estratégicos dos equipamentos, com a devida orientação dos eixos de medição. Após a instalação física, os sensores foram registrados na plataforma digital, com a definição dos parâmetros de frequência de coleta.

A frequência de coleta dos dados influencia diretamente a resolução das análises espectrais. Considerando a autonomia das baterias e a necessidade de detalhamento, foi adotada uma taxa de coleta de uma vez ao dia, conforme recomendação do fornecedor, o que possibilita uma vida útil média de três a quatro anos para cada sensor, dependendo das condições operacionais e ambientais, na Figura10 tem-se as informações sobre as configurações adotadas para periodicidade de coletas.

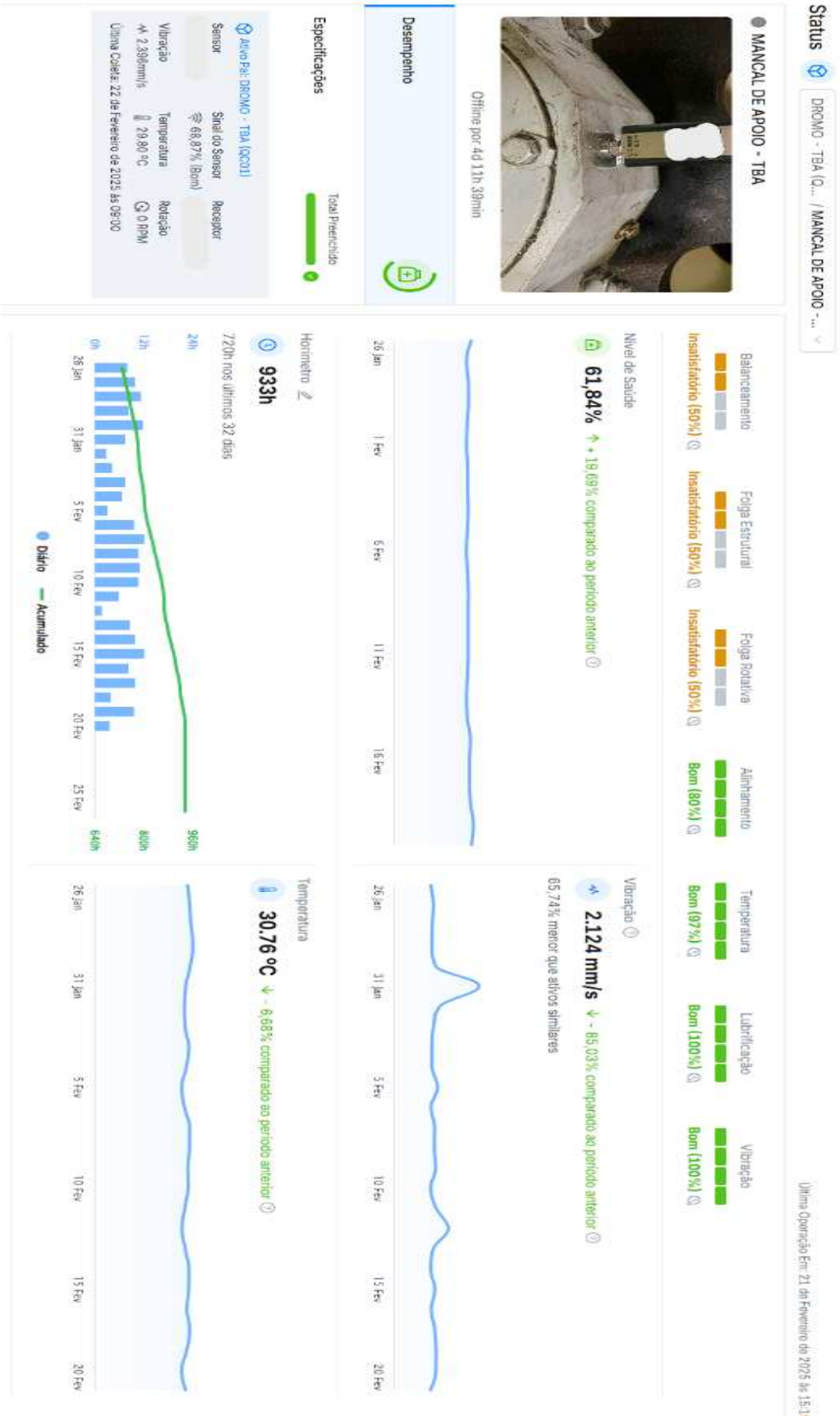
Além da configuração técnica dos sensores, foram cadastradas informações específicas sobre cada ativo monitorado, incluindo características dos rolamentos (diâmetro interno e externo, frequência de operação, número de elementos rolantes) e dos redutores (quantidade de estágios, número de dentes, velocidades de entrada e saída). Esses dados são fundamentais para a análise automática da plataforma, pois possibilitam o cálculo de frequências naturais e a identificação de padrões anormais.

3.2 Procedimentos para coleta de dados de vibração

Para a coleta e análise dos dados, foi utilizada uma plataforma online Tractian fornecida pelo fabricante dos sensores. A plataforma permite o monitoramento em tempo real e oferece uma interface amigável, com visualização clara do estado geral dos sensores e ferramentas avançadas para análise espectral.

Logo após a configuração inicial, os sensores passaram a enviar os dados automaticamente, eliminando a necessidade de coletas manuais frequentes. Esse modelo reduz significativamente a exposição a riscos operacionais, especialmente em equipamentos que operam em movimento, e está em conformidade com as diretrizes da NR-12, que trata da segurança em máquinas e equipamentos, na Figura 11 é possível ver as informações prévias fornecidas pelo sensor da saúde geral do ativo monitorado.

Figura 11: Status geral do sensor



Fonte: Autoria, própria (2025).

A plataforma oferece ainda funcionalidades adicionais que enriquecem a análise, como a comparação entre ativos idênticos ou entre registros históricos de um mesmo componente. Isso permite a verificação da evolução de falhas e a identificação de vibrações anormais em faixas de frequência específicas, antes mesmo que um defeito se manifeste fisicamente.

A abordagem adotada neste trabalho segue tendências consolidadas da indústria 4.0, combinando conectividade, automação e inteligência artificial para otimizar a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos. Um estudo de Silva et al. (2023) reforça que a integração de sensores inteligentes com plataformas analíticas tem proporcionado ganhos reais na manutenção preditiva, reduzindo o tempo de inatividade e os custos com paradas não planejadas.

3.3 Informações dos dados coletados

3.3.1 Descrição dos dados coletados

Por se tratar de uma gama grande de componentes, o estudo irá focar somente nos mancais de apoio do dromo, que são responsáveis por suportar o peso onde os cabos de aço do guindaste são enrolados, este mancal possui um rolamento autocompensador de rolos.

Por se tratar de um sistema em tempo real, onde os sensores são fixos em cada componente, não se faz necessário a ida a campo para realizar as coletas de dados, o sensor capta o estímulo e já armazena no banco de dados online da própria plataforma, onde temos acesso a qualquer momento e em qualquer lugar, justamente para em casos extremos a tomada de decisão seja o mais rápida possível.

Foram nomeados os elementos a serem estudados da seguinte forma “Mancal do Dromo “TBA“ e “Mancal do Dromo FOR“ referente a localização dos equipamentos que ficam entre Fortaleza e Taiba, e cada um dos guindastes nomeados de “QC01“, “QC02“ “QC03“ cada um conta com uma unidade dos mancais citados acima e que é o ponto focal de estudo.

A primeira análise de dados foi feita no dia 03/10/2024 onde foi identificado algumas tendências de anormalidades nos espectros de vibração do Mancal do Dromo FOR, com isso foi iniciada uma análise mais aprofundada sobre o componente, realizando

os cálculos para verificação de possíveis sincronismos de falha com os harmônicos calculados.

3.3.2 *Local e período de coleta de dados*

O local onde se encontram é dentro da sala de máquinas, em uma superfície fixa, onde não se tem fatores que possam afetar nos dados coletados pelos sensores, além disso são locais com pouco movimento de pessoas e totalmente fechados, sem influência de fatores climáticos.

3.4 Justificativa da escolha dos métodos utilizados

A análise vibracional vem a cada dia se tornando mais necessária e precisa para monitoramento de sistemas rotativos. Existem diversas tecnologias e ferramentas para realizar a coleta e análise dos dados, os mais tradicionais incluem a análise de espectro de frequência (FFT), que se trata de um algoritmo matemático utilizado para converter sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência. Tecnologias mais avançadas com uso de aprendizado de máquina (machine learning), monitoramento em tempo real via IoT, que permitem uma melhor coleta de dados e prever por meio de tendências uma possível falha.

Em busca por um método inovador e preciso, oferecendo facilidade de análise, alertas automáticos precisos e velocidade de resposta compatível com as exigências da Indústria 4.0, foi optado esse modelo de monitoramento em tempo real das vibrações nos componentes mais críticos do guindaste.

Essa tecnologia, integrada a sistemas baseados em inteligência artificial, atende aos requisitos da Indústria 4.0.

Outro fator bem atrativo é o custo-benefício que esse sistema nos traz enquanto uma análise vibracional esporádica custa entre R\$ 10.000 e R\$ 20.000, o sistema implantado tem um custo mensal estimado em R\$ 3.000 por guindaste, com cobertura contínua, com alertas de possíveis falhas com suporte comercial, diferente de métodos de contratação de terceirizados sendo somente uma análise esporádica, sem análises periódicas e com toda burocracia para realizar agendamentos de inspeções. Para o caso

em questão a melhor escolha em termos de tecnologias e monitoramento ativo a todo momento, fez com que esse método fosse escolhido.

Assim como os demais métodos, esse sistema também conta com algumas limitações, como uma boa conectividade por meio de dados móveis para que seja possível o envio de dados, os receptores precisam ser instalados em locais onde estejam protegidos, longe de chuvas ou respingos de água para que não se danifiquem. Locais onde se excedem a temperatura máxima para instalação também devem ser analisados e evitados.

3.5 Implementação do sistema de monitoramento de vibração

Para a instalação do sistema foram seguidas as recomendações da fabricante, que são elas:

- A superfície onde irá ser instalado o sensor deve ser limpa e retirada a pintura, para que a cola fixe corretamente o sensor.
- Cada sensor deve estar cadastrado na plataforma de acordo com a disposição dos eixos na hora da instalação.
- O receptor de dados não deve ser exposto a condições adversas de ambiente, como chuvas ou contaminação severa de ambiente.
- Cada sensor foi vinculado a um componente específico, e cada componente deve ter suas informações requeridas inseridas na plataforma, para que possam ser feitos os cálculos de harmônicos corretamente.

Durante a instalação foram tomados todos os devidos cuidados necessários, uso de luvas de proteção, óculos, protetores auriculares, e demais EPIs de uso contínuo dentro da empresa, como botas, blusas de manga longa, colete refletivo, etc. além destes cuidados também foi feito bloqueio de todos os movimentos para evitar qualquer tipo de problema em a acionamento de movimento em alguma parte do guindaste, exemplo de sensor instalado na Figura 12 indicado com a seta de cor laranja.

Figura 12: Sensor instalado



Fonte: Autoria, própria (2024).

3.6 Descrição do sistema de hardware e software utilizado

Nesta seção serão apresentados os sistemas de hardware e software que foram utilizados nesse estudo, suas características e funções gerais.

O hardware se trata de sensores IoT que são conectados por meio de um receptor que transforma essas informações e envia para um banco de dados em nuvem, e que são processadas na plataforma de monitoramento online.

3.6.1 Características do equipamento de medição

O mecanismo é composto por sensores que são posicionados nos componentes que se deseja realizar o monitoramento, são feitos de metal e seu formato é feito de forma a preservar o funcionamento do acelerômetro e assim conseguir tanto prolongar sua vida útil, quanto proporcionar uma faixa de trabalho maior de temperatura.

3.7 Detalhes da instalação do sistema no contexto específico

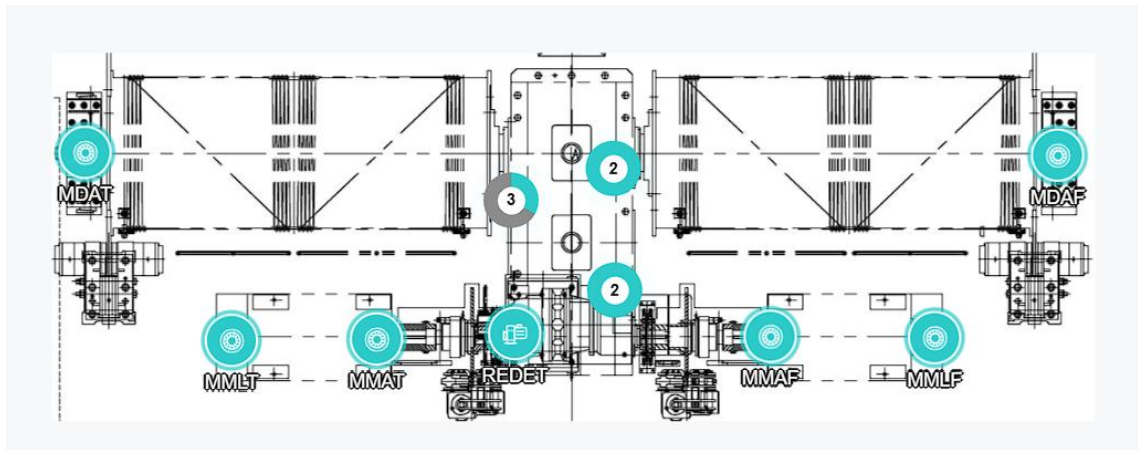
Os sensores são instalados dentro de um ambiente fechado, sem necessidade de cuidados com intempéries ambientais, como chuva, poeira, calor excessivo, entre outros fatores de exposição direta ao ambiente.

3.7.1 Preparação do local de instalação

Para a instalação dos sensores, como citado no início deste capítulo, é necessário seguir algumas instruções de posicionamento e de preparação do local de aplicação da cola, os mesmos funcionam numa faixa de temperatura de até 120 °C, para essa preparação foi necessário a limpeza da tinta da tinta onde seriam aplicados os sensores, após a limpeza foi utilizado desengraxante para garantir a boa aderência da cola na superfície do componente, todos esses procedimentos foram feitos com o equipamento desligado, para que houvesse um bom tempo de cura para a cola adesiva fixar bem na estrutura.

Foram instalados 42 sensores em todo o sistema de elevação dos guindastes, distribuídos de forma igual entre os três guindastes, dispostos de forma vertical ou horizontal, para que se tenha um controle preciso da disposição dos eixos, que são representados no sensor para que sejam cadastrados na plataforma online na orientação que foram instalados, na Figura 13 a seguir, é possível ver o esquema de posicionamento dos sensores distribuídos em cada redutor.

Figura 13: Esquema de instalação



Fonte: Autoria, própria (2025).

3.8 Calibração do equipamento de medição de vibração

Para uma correta análise de dados é crucial a calibração dos sensores de vibração, para o caso em questão a calibração é feita por meio de inteligência artificial, que conta com o sistema de aprendizado contínuo que compara as vibrações ao longo do tempo utilizando informações coletadas anteriormente, traçando automaticamente uma faixa normal de vibração para aquele ativo, para isso o sistema leva em torno de uma semana de coletas, para estabelecer um banco de dados e formar as primeiras métricas de normalidade para aquele sensor.

Após essa autorregulagem dos sensores, alertas são gerados caso alguma possível anormalidade seja notada, com isso inspeções em loco devem ser realizadas para verificar se o insight foi realmente assertivo ou não, retornando assim na plataforma o resultado da inspeção e fazendo com que a IA aprenda se aquilo é ou não uma frequência de vibração que caracteriza uma falha.

3.8.1 Procedimentos de calibração

Os sensores contam com um serviço de IA integrada, ela é responsável por captar os padrões de vibração dos componentes, dessa forma criando um banco de dados e definindo os parâmetros normais de vibração que a máquina emite, para que essa

funcionalidade da IA seja efetiva é de extrema importância cadastrar a orientação correta do eixo de cada sensor, aliados ao tipo de componente a qual pertence.

Para o estudo são utilizados dois tipos de componentes, redutores e mancais de apoio. Os redutores se tratam de caixas de engrenagens que realizam a transformação do movimento, reduzindo a velocidade que é transmitida pelo motor que está acoplado a sua entrada de engrenamento, nesse tipo de componente precisamos imputar as informações sobre número de reduções, velocidade de trabalho em RPM, fatores que influenciam diretamente na análise precisa do componente.

Já para os mancais e sistemas que utilizam de rolamentos, é preciso saber, frequência em Hz, número de esferas ou rolos, diâmetros interno e externo do rolamento e ângulo de contato, que no nosso caso utilizamos como sendo $22,5^\circ$ de acordo com o catálogo do fabricante do rolamento.

3.9 Métodos de processamento e análise dos dados de vibração

Com todos os modelos de sensores, modelo citado na seção 3.1.1, instalados e com os receptores captando os dados, foi iniciada a coleta e envio de dados captados pelos sensores para a plataforma, onde se tem todas as ferramentas de análise, métricas e histórico ao longo do tempo dos dados coletados.

3.9.1 Limpeza e pré-processamento dos dados

Para que a análise seja feita de forma clara, é preciso realizar alguns filtros para que seja possível avaliar mais fielmente o que cada espectro nos fornece. Dentro dos dados coletados existem três tipos principais de avaliação, verificação do status geral do componente, análise do espectro do componente e comparação entre componentes similares, onde todas elas são em relação a frequência em Hz que o componente está trabalhando.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

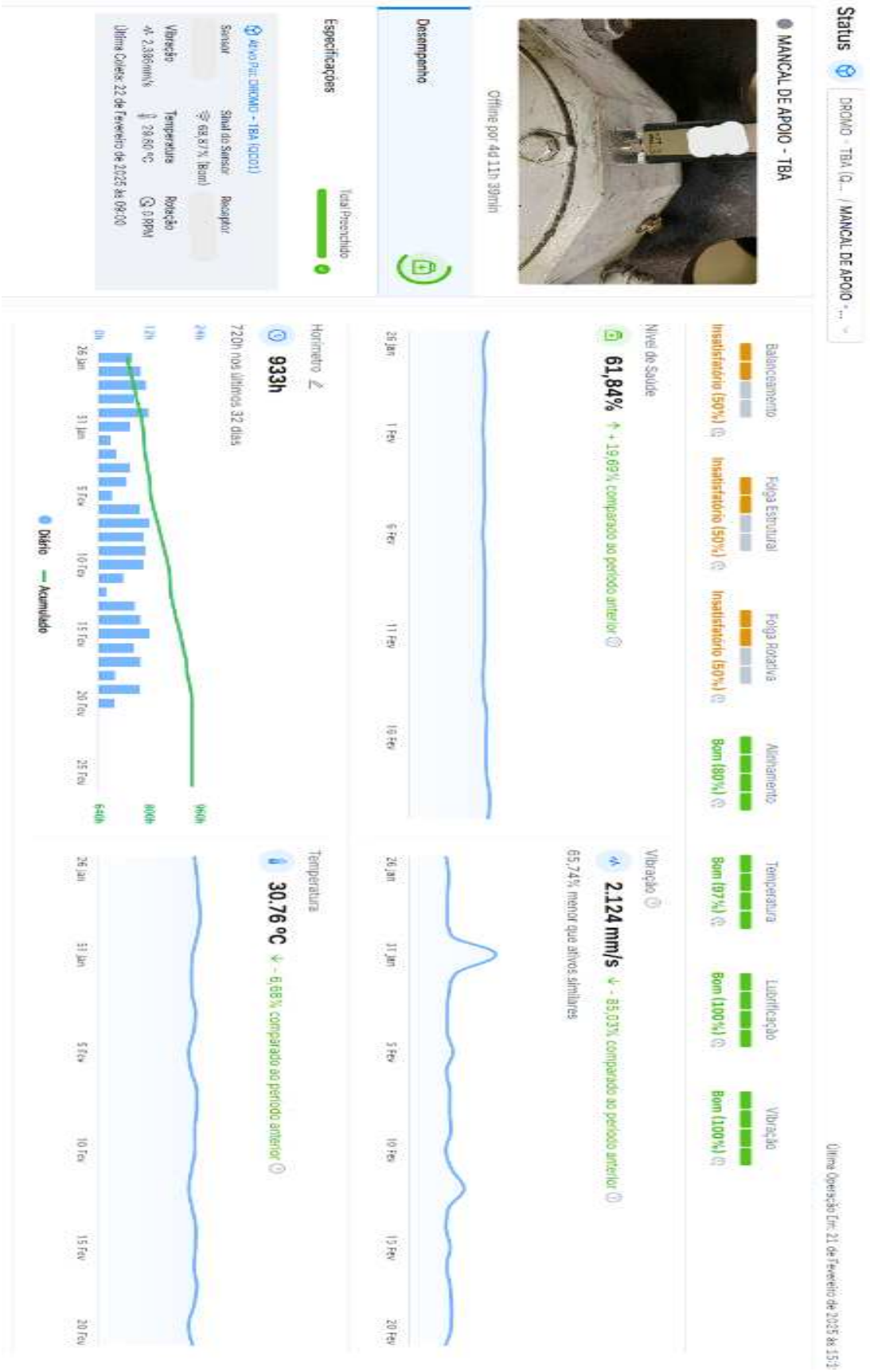
Com todas as informações e estudos para realização da análise dos espectros vibracionais, em sequência são feitas as primeiras análises e comparações de espectros, e como falado anteriormente, mantendo o ponto focal do estudo.

4.1 Análise de dados coletados

Após as primeiras coletas já é possível ter acesso aos gráficos de análises disponíveis na plataforma Tracitan, além deles também existem outras informações que são disponibilizadas e que são de grande importância na saúde do equipamento, a seguir podemos ver algumas dessas informações disponibilizadas.

No contexto geral temos as impressões de saúde do ativo que a própria IA faz, relacionando a espectros de vibração padrão, já implementadas pelo fabricante em seu banco de dados, e o comparando as vibrações ao longo dos dias de coleta, na Figura 14 é possível ver as informações de saúde geral do ativo dado pelo sensor.

Figura 14: Informações de saúde geral do ativo

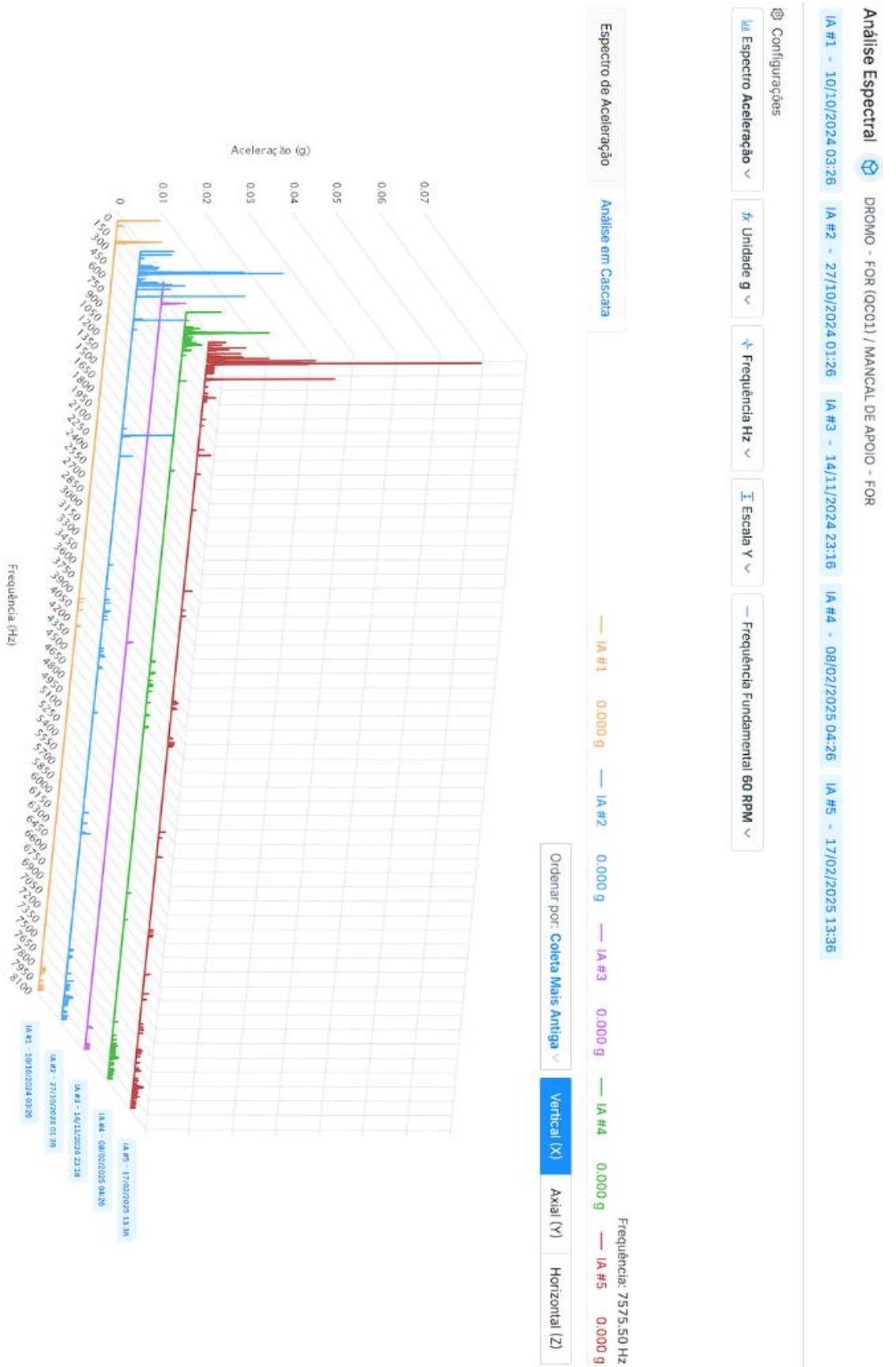


Fonte: Autoria, própria (2025).

Com os gráficos de análise técnica, existem diversas ferramentas que auxiliam na correta determinação dos princípios de falha.

Na Figura 15 tem-se a figura do gráfico denominado de “gráfico em cascata”, esse tipo de gráfico ajuda a visualizar os espectros de vibração ao longo do tempo, comparando diversas medições e fornecendo uma visão de evolução ou não de uma possível falha, como é inferido na Figura 15, em baixas rotações as vibrações vêm aumentando, na faixa entre 150-400 Hz.

Figura 15: Análise em cascata de vibração



Fonte: Autoria, própria (2025).

Observando a figura coletas dos dias 10/10/2024 (amarelo), 27/10/2024 (azul), 08/02/2025 (verde) e 17/02/2025 (vermelho) há um acréscimo nos picos de vibração ao longo do tempo nesse ativo, um indicador de evolução de falha no rolamento em questão.

Outra ferramenta gráfica que tem grande valor é a de comportamento geral das vibrações como é mostrado na Figura 16, onde é possível visualizar de forma mais ampla o comportamento das vibrações ao longo de grandes períodos, podemos ver que o espectro de velocidade de vibração pico a pico vem tendo um acréscimo no eixo axial ao longo do tempo, como mostra a linha em azul.

Figura 16: Análise do gráfico geral de vibração



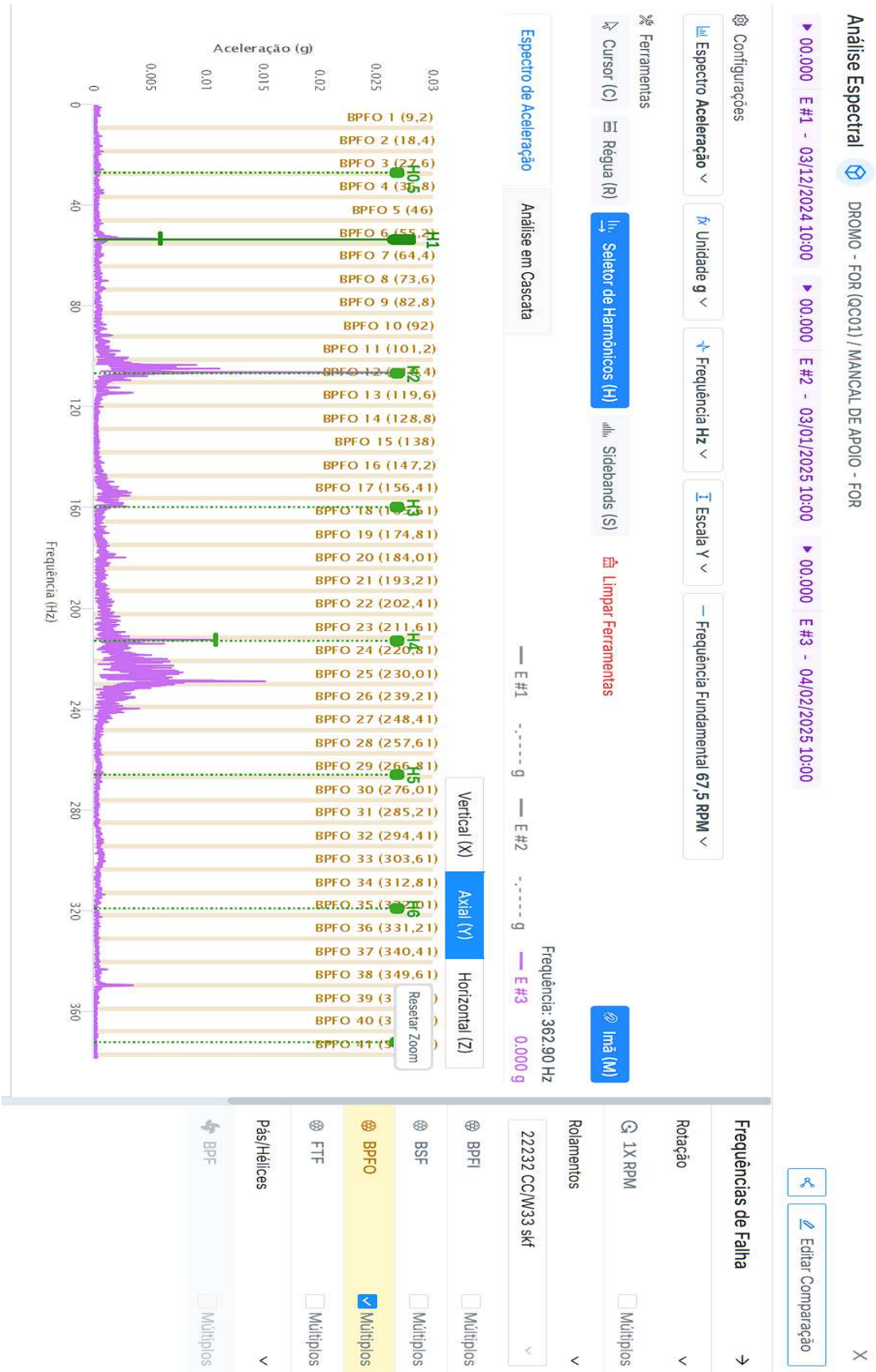
Fonte: Autoria, própria (2025).

Nessa figura é possível ver a evolução de vibração ao longo do eixo axial do mancal de rolamento, representado pela cor rosa nos picos do gráfico, chegando a 171mm/s no gráfico pico a 0, gráfico que mostra a amplitude de vibração a partir do ponto de repouso do ativo, muito utilizado para verificação de falhas no estágio inicial por apresentar uma boa resposta a vibrações mais sutis.

Visualizando os picos de vibrações axiais entre os dias 13 e 20 de janeiro, e entre 27 de janeiro a 3 de fevereiro é de fácil visualização os picos em evolução no eixo axial, indicando uma possível evolução de falha, a necessidade de intervenção para análise in loco dos componentes vinha se tornando uma medida necessária.

De forma mais específica, analisando os espectros de vibração no gráfico AceleraçãoxHz na Figura 17 é possível ver os harmônicos coincidindo com picos de vibração BPFO, indicando uma possível falha de pista externa nesse ativo.

Figura 17: Aceleração x Hertz



Fonte: Autoria, própria (2025).

Olhando focalmente para o espectro de aceleração do mancal é possível ver que há picos coincidentes com BPFO 23 e 25, além disso picos nos coincidentes com harmônicos igualmente espaçados, o que implica em vibrações maiores ao passar em determinado ponto do rolamento, esses fatores reunidos caracterizam uma possível falha de pista externa.

4.1.1 Discussão da análise preliminar dos dados

Após a análise de casos semelhantes, consultas em diversas ferramentas disponíveis no mercado e apoio em referências clássicas da área (como Mobley, 2002; Jardine, Lin e Banjevic, 2006), além da troca de experiências com profissionais que já atuam com análise vibracional, foi possível confirmar o início de uma falha no rolamento monitorado. Desde a Figura 14, já se percebia um comportamento crescente nos níveis de vibração, tanto pelos dados captados pelo sensor e processados automaticamente pela plataforma, quanto pelos gráficos da análise direta — o que deixou claro o padrão de evolução da falha.

Mobley (2002) já destacava a análise espectral como uma das técnicas mais eficazes para identificar falhas em estágio inicial, principalmente quando se consegue observar harmônicos típicos, como os relacionados à BPFO (Ball Pass Frequency Outer). Esse comportamento também vai ao encontro do que apontam Patel & Kumar (2019), que reforçam que a presença de excitações harmônicas sucessivas e picos repetitivos nos espectros de aceleração costuma estar ligada a falhas em pistas externas.

No nosso caso, a análise dos harmônicos, apresentada na Figura 17, confirmou essa tendência, com excitações claras nos quatro primeiros harmônicos e ocorrências específicas nos harmônicos BPFO 23 e 25. Harris & Piersol (2002) também relatam situações semelhantes, dando ênfase à importância da análise de envelope para detectar falhas por contato nos elementos rolantes e nas pistas, além de observações posteriores como o início de micropitting, que foi identificado durante a inspeção física.

A junção entre o monitoramento contínuo, a análise espectral automatizada e a comparação com padrões históricos documentados na literatura trazem mais segurança na hora de tomar decisões preditivas. E, somando a isso, estudos recentes como o de Silva et al. (2023) mostram que o uso de sensores IoT aliados à inteligência artificial vêm aprimorando bastante esse tipo de diagnóstico, permitindo que as ações corretivas sejam

planejadas com antecedência, o que ajuda a reduzir tanto os riscos operacionais quanto os custos de paradas não programadas.

Dessa forma, esse caso reforça como os resultados obtidos estão alinhados às boas práticas e às evidências já consolidadas na área de manutenção preditiva. Além disso, mostra que a metodologia aplicada aqui pode ser replicada com segurança em outros cenários industriais críticos.

4.2 Estimativa de economia financeira com base na falha evitada

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre o cenário de manutenção corretiva (falha catastrófica) e o cenário de manutenção preditiva aplicada, com os valores médios associados à operação dos guindastes.

Tabela 1 – Comparativo de custos: manutenção corretiva vs. manutenção preditiva em guindastes portuários

Item comparado	Manutenção Corretiva (sem sistema)	Manutenção Preditiva (com sistema)
Custo dos rolamentos	R\$ 15.000,00 a R\$ 37.000,00	R\$ 15.000,00 a R\$ 37.000,00
Custo do redutor (em caso de falha total)	R\$ 800.000,00 a R\$ 3.200.000,00	R\$ 0
Tempo de parada estimado	30 a 90 dias	8 a 24 horas
Prejuízo diário estimado por guindaste parado	R\$ 80.000,00 a R\$ 530.000,00	R\$ 0
Prejuízo total estimado por 90 dias de parada	R\$ 7.000.000,00 a R\$ 48.000.000,00	R\$ 0
Investimento anual em sistema preditivo	—	R\$ 120.000,00 a R\$ 800.000,00
Custo total estimado	R\$ 7.800.000,00 a R\$ 51.200.000,00	R\$ 175.000,00 a R\$ 837.000,00

Item comparado	Manutenção Corretiva (sem sistema)	Manutenção Preditiva (com sistema)
Economia estimada por falha evitada	—	R\$ 7.600.000,00 a R\$ 50.400.000,00

Fonte: Adaptado de Acoem (2024); PMR Research (2023); SKF (2023); ifm electronic (2024); IIoT-World (2023); SenseGrow (2024).

A comparação entre os dois cenários deixa claro o quanto uma abordagem preditiva pode evitar prejuízos expressivos. Como já reforçado por diversos estudos (Acoem, 2024; ifm electronic, 2024), a parada não programada de um guindaste portuário pode gerar perdas que variam entre R\$ 80 mil e R\$ 530 mil por dia, valores que quando somados a componentes danificados como redutores e rolamentos, tornam o custo final da falha corretiva bastante elevado.

Só o redutor, dependendo do modelo, pode custar entre R\$ 800 mil e R\$ 3,2 milhões (PMR Research, 2023), enquanto rolamentos industriais de grande porte giram em torno de R\$ 15 mil a R\$ 37 mil (SKF, 2023). Quando isso ocorre de forma inesperada, há ainda custos com mão de obra emergencial, logística e atrasos operacionais.

Já com o uso de sensores e análise preditiva, como demonstrado por SenseGrow (2024), é possível prever falhas com alta precisão, planejar a parada e intervir antes que o dano se espalhe. Apesar do investimento inicial (em torno de R\$ 120 mil a R\$ 800 mil por ano, conforme IIoT-World, 2023), os ganhos são muito maiores, tanto operacionais quanto financeiros.

Ou seja, além de evitar grandes prejuízos, a manutenção preditiva melhora o planejamento, reduz riscos e dá mais segurança à operação o que, no final das contas, representa economia real e uma decisão muito mais sustentável para o dia a dia do terminal.

4.3 Estudo de Caso

Com base na análise realizada ao longo deste trabalho, foi identificado um caso prático que merece destaque pela confirmação da eficácia do sistema de monitoramento implementado. Entre os diversos pontos acompanhados, optamos por aprofundar o estudo sobre o mancal do dromo localizado no guindaste QC01, instalado na unidade de

Fortaleza (mancal do dromo FOR QC01). Esse componente foi escolhido por apresentar sinais consistentes de anomalias durante as análises espectrais iniciais, levantadas no Capítulo 5.

4.4 Apresentação e análise de caso

Dadas as informações apresentadas no capítulo 5 foi decidido, com base nessas informações de análise preditiva, realizar a troca dos rolamentos de todos os mancais de dromo presentes nos guindastes de mesmo tempo de atividade, a partir dessa manutenção é possível obter os dados e informações pertinentes a assertividade do sistema de monitoramento implementado e das análises feitas neste trabalho.

4.4.1 Descrição do caso

O mancal do dromo é responsável por sustentar o tambor de enrolamento dos cabos de aço do guindaste. Como se trata de um componente crítico, que suporta cargas elevadas e opera de forma contínua, ele foi um dos pontos de maior interesse para o estudo. Ao longo de algumas semanas, os sensores instalados indicaram um crescimento gradual nos níveis de vibração, principalmente no eixo axial, conforme captado e processado automaticamente pela plataforma.

4.4.2 Análise dos dados de vibração coletados

As análises espectrais revelaram picos de vibração coincidentes com harmônicos da falha BPFO (Ball Pass Frequency Outer), Figura 17, indicando forte suspeita de desgaste na pista externa do rolamento. O gráfico em cascata mostrado na figura 15 (Autoria, própria (2025).), mostrou a evolução dessas vibrações com o tempo, reforçando a tendência de falha.

Após a retirada do mancal para inspeção, foi confirmada a presença de marcas visíveis de desgaste, micropitting, riscos longitudinais e depressões na superfície do rolamento. A seguir nas Figuras 18, 19, 20, 21, 22 e 23, são apresentadas algumas imagens que registram a presença dessas falhas:

Figura 18: Pitting e micropitting na região de contato



Fonte: Autoria, própria (2025).

Pitting e micropitting como vistos dentro do círculo na Figura 18 são pequenos buracos ou crateras que se formam no material por complicações como a quebra do filme de lubrificação, fazendo com que haja contato direto entre os elementos de rolamento e as pistas de rolamento, outra causa possível para que o pitting e micropitting aconteçam é o excesso de carga sobre o rolamento, mas para este caso as cargas são controladas pelos sensores dos guindastes e as normas de pesos máximos contidos dentro de contêineres, as redundâncias aplicadas nos projetos também preveem esse tipo de situação.

Figura 19 - Riscos concentrados na faixa de carga



Fonte: Aatoria, própria (2025).

Com a quebra do filme de lubrificante começa-se a ter um contato excessivo entre os componentes, o que ocasiona deformações superficiais, na Figura 19 essas deformações se mostram bem acentuadas, visíveis na área demarcada, demonstrando que a falha já não estava em estado inicial e sim em um estágio mais avançado.

Figura 20 - Superfície com desgaste por abrasão



Fonte: Autoria, própria (2025).

Na Figura 20 há um problema causado por micropartículas abrasivas dentro do rolamento, esse problema pode ser ocasionado por impurezas vindas do ambiente, lubrificante utilizado nas manutenções contaminado, e para o caso em questão desprendimentos de partículas do próprio componente, seja por má lubrificação ou incorretas condições de uso, as partículas desprendidas, que podem ser visualizadas na Figura 18 devido ao pitting no rolamento, foram arrastadas pelos elementos girantes no movimento de rotação, fazendo com que acontecesse um processo de abrasão por micropartículas na pista externa do rolamento, onde devido a força centrípeta de rotação, as partículas tendem a se concentrar nas partes periféricas do rolamento, que no caso se trata da pista externa.

Figura 21 - Parte do tambor com destaque acentuado de material



Fonte: Autoria, própria (2025).

A Figura 21 apresenta mais um grande fator de risco para o funcionamento desse mancal, partes do tambor de apoio se encontravam com destaque acentuado de material que estão circulados na figura, ranhuras que em pouco tempo se tornariam cada vez maiores, vista a condição apresentada em todo o conjunto.

Essas imagens reforçam a validade do diagnóstico gerado pelo sistema de monitoramento e as análises feitas a partir das informações e gráficos disponíveis na plataforma Tractian.

O caso do mancal do dromo FOR QC01 evidencia a importância da análise preditiva. O sistema foi capaz de identificar uma falha incipiente, permitindo a intervenção antes que houvesse uma quebra inesperada ou parada de operação. A substituição do componente foi realizada de forma planejada, sem impacto na produtividade.

A situação encontrada está alinhada com autores como Mobley (2002) e Jardine et al. (2006), que defendem a eficácia da manutenção baseada em condição. Assim como observado neste caso, sistemas bem configurados e sensores inteligentes são capazes de detectar padrões anormais de vibração e apoiar decisões preventivas de forma precisa.

Em resumo, o estudo de caso validou a proposta do trabalho: mostrou que é possível antecipar falhas reais usando tecnologia acessível, melhorando a segurança e a eficiência da manutenção industrial.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho comprovou, na prática, que a análise de vibrações utilizando sensores IoT e inteligência artificial é uma solução viável e eficaz para monitorar equipamentos críticos, como demonstrado no caso real do mancal do dromo do guindaste QC01. Os gráficos espectrais coletados e analisados indicaram falhas incipientes que dificilmente seriam identificadas por métodos convencionais, permitindo intervenções antecipadas. Essa antecipação resultou na substituição planejada do rolamento antes que ocorresse uma falha total, evitando danos maiores ao redutor, que possui alto custo e longo prazo de reposição. Com isso, estimou-se uma economia superior a R\$ 12,9 milhões, considerando a prevenção de uma parada não programada de até 90 dias, além do custo do componente.

Outro aspecto relevante foi o comparativo entre o custo do sistema implantado e os serviços tradicionais de análise vibracional realizados de forma pontual por empresas terceirizadas. Verificou-se que o monitoramento contínuo, aliado ao suporte técnico e aos alertas automáticos, oferece melhor custo-benefício, maior frequência de coleta de dados e mais agilidade de resposta, reduzindo significativamente o risco de falhas críticas.

A aplicação prática mostrou também ganhos diretos em segurança operacional, uma vez que o sistema remoto substituiu 28 inspeções manuais em áreas de difícil acesso, minimizando a exposição da equipe a condições de risco. Além disso, a interação com os equipamentos e a análise detalhada dos espectros de vibração proporcionaram uma aprendizagem prática importante para aplicação da manutenção preditiva na indústria, alinhada aos conceitos da Indústria 4.0.

Por fim, a experiência obtida valida a viabilidade de replicação deste modelo em outros componentes rotativos e contextos industriais semelhantes, contribuindo para a evolução de sistemas inteligentes de monitoramento e reforçando a importância de integrar tecnologia e prática de campo para aumentar a confiabilidade, reduzir custos e garantir a continuidade operacional.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Expansão do monitoramento: Aplicar o sistema em outros componentes e sistemas de grande criticidade, como motores de alta rotação e sistemas de transmissão.

- Integração total: Conectar o sistema de vibração com outras plataformas de gestão de ativos para uma visão mais assertiva da saúde dos equipamentos e necessidades de inspeção detalhada.
- Sensores do futuro: Pesquisar materiais mais resistentes ou formas de adaptação para monitorar equipamentos em condições diversas de trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO 10816-3: mechanical vibration** — evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

HARRIS, C. M.; PIERSOL, A. G. **Harris' shock and vibration handbook**. New York: McGraw-Hill, 2002.

INMAN, D. J. **Engineering vibration**. 4. ed. upper saddle river: Pearson education, 2014.

JARDINE, A. K. S.; LIN, D.; BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. **Computers & Industrial Engineering**, v. 51, n. 3, p. 511–547, 2006.

KELLY, S. G. **Fundamentals of mechanical vibrations**. New York: McGraw-Hill Education, 2012.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, v. 3, p. 18–23, 2015.

MOBLEY, R. K. **Maintenance engineering handbook**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

RAO, S. S. **Mechanical vibrations**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.

THOMSON, W. T.; DAHLEH, M. D. **Theory of vibration with applications**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997.

TSE, F. S.; MORSE, I. E.; HINKLE, R. T. **Mechanical vibrations: theory and applications**. Boston: Allyn and Bacon, 1978.

VARGAS, M.; FREITAS, D.; OLIVEIRA, J. Aplicação de sistemas inteligentes para manutenção preditiva em máquinas rotativas industriais. **Revista de Engenharia Aplicada**, v. 9, n. 2, p. 45–58, 2021.

manutenção preditiva na indústria 4.0. **Scientia Cum Industria**, v. 7, n. 2, p. 12–22, 2019. Disponível em: sou.ucs.br/etc/revistas/index.php/scientiacumindustria/article/view/6835/pdf. Acesso em: 23 fev. 2025.

TRACTIAN. Smart Trac: sensor de vibração com IoT e inteligência artificial. Disponível em: traction.com/smart-trac. Acesso em: 1 jun. 2025.

TRACTIAN. Como funciona o sensor de monitoramento online da Tractian. Disponível em: traction.com/blog/como-funciona-o-sensor-de-monitoramento-online-da-traction. Acesso em: 1 jun. 2025.

TRACTIAN. Maximizing asset reliability with Smart Trac Ultra – product release. Disponível em: releases.tractian.com/en/maximizing-asset-reliability-with-ultra-sensor. Acesso em: 1 jun. 2025.

PRIMARY SCIENCE ONLINE. Amplitude. Disponível em: primaryscienceonline.org.uk/glossary-of-terms/amplitude/amplitude/. Acesso em: 3 jun. 2025.

ACOEM. Crane reliability solutions: minimizing unplanned downtime. Disponível em: acoem.com/en/applications/crane-reliability-solutions/. Acesso em: 23 jul. 2025.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Cotação de fechamento do dólar comercial – julho de 2025. Disponível em: bcb.gov.br. Acesso em: 23 jul. 2025.

IFM ELECTRONIC. Smart port cranes boost uptime. 2024. Disponível em: ifm.com/il/en/shared/successstories/casestudies/smart-port-cranes-boost-uptime. Acesso em: 23 jul. 2025.

IIOT-WORLD. Predictive maintenance cost savings. 2023. Disponível em: iiot-world.com/predictive-analytics/predictive-maintenance/predictive-maintenance-cost-savings. Acesso em: 23 jul. 2025.

PMR RESEARCH. Shipboard crane inspection and testing services market report. 2023. Disponível em: pmarketresearch.com/it/shipboard-crane-inspection-testing-services-market. Acesso em: 22 jul. 2025.

PMR RESEARCH. Crane predictive maintenance market. 2023. Disponível em: pmarketresearch.com/it/crane-predictive-maintenance-market. Acesso em: 23 jul. 2025.

SENSEGROW. Case study: AI-driven predictive maintenance in cranes – RSGT terminal. 2024. Disponível em: sensegrow.com/blog/customer-stories/case-study-ai-driven-predictive-maintenance-cranes-rsgt. Acesso em: 23 jul. 2025.

SKF. Catálogo técnico de rolamentos industriais. Disponível em: skf.com. Acesso em: 23 jul. 2025.

U.S. ports appeal for delay to tariffs on Chinese cranes. **The Wall Street Journal**, 2023. Disponível em: [wsj.com/articles/u-s-ports-appeal-for-delay-to-tariffs-on-chinese-cranes-f71172be](https://www.wsj.com/articles/u-s-ports-appeal-for-delay-to-tariffs-on-chinese-cranes-f71172be). Acesso em: 23 jul. 2025.