

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

SAMUEL RODRIGUES DA SILVA

**ANÁLISE VIBRACIONAL NA INDÚSTRIA 4.0 POR SENSORES CONECTADOS
REMOTAMENTE**

GUARAPUAVA

2023

SAMUEL RODRIGUES DA SILVA

**ANÁLISE VIBRACIONAL NA INDÚSTRIA 4.0 POR SENSORES CONECTADOS
REMOTAMENTE**

Vibration analysis in 4.0 industry using remotely connected sensors

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientadora: Prof. Dra. Denise Ramalho

GUARAPUAVA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

SAMUEL RODRIGUES DA SILVA

**ANÁLISE VIBRACIONAL NA INDÚSTRIA 4.0 POR SENSORES CONECTADOS
REMOTAMENTE**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 06/dezembro/2023

Denise Alves Ramalho
Doutorado em Engenharia mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Sergio Dalmas
Doutorado em Engenharia mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Aldo Przybysz
Doutorado em Química dos Recursos Naturais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

GUARAPUAVA

2023

RESUMO

Os motores elétricos estão presentes em grande número nas indústrias ao redor do mundo e manter a saúde desses ativos é fundamental para a produção. Como parte de objetivos para crescimento sustentável da indústria, o trabalho visou aumentar a confiabilidade de equipamentos rotativos e reduzir o prejuízo de parada de manutenção por tempo improdutivo ou custo direto. A manutenção preditiva por análise vibracional é o método utilizado no trabalho por permitir atuação antecedente à falha e possuir custo acessível. Os equipamentos monitorados foram motores exaustores de uma indústria madeireira. Os motores geraram dados de vibração e temperatura captados por sensores conectados remotamente e analisados por Inteligência Artificial, que emitiu alertas ao detectar modos de falha. Os motores receberam manutenção preditiva, o que evitou possível falha funcional. O estudo concluiu que o monitoramento remoto por sensores de vibração é relevante e possui replicabilidade para todos os ativos críticos da indústria.

Palavras-chave: manutenção preditiva; motor elétrico; Inteligência Artificial; exaustão; indústria madeireira.

ABSTRACT

The electrical motors are present in vast number of industries worldwide, and maintaining the machinery's health is fundamental to their production. This study aims to increase reliability of rotating equipment and reduce the losses due to production downtime or maintenance costs. Condition-based maintenance through vibration analysis is the adopted method to detect situations requiring intervention without the need for expensive tests or exams. The exhaust system is critical to the wood industry, given its demand when an entire sector is operational. Therefore, the study monitored its motors, reducing the risk to the financial results of the corporation. Remote monitoring allowed the maintenance team to be aware of the condition of this equipment, and Artificial Intelligence helped to alert if a failure mode appeared. The study revealed that remotely monitoring assets through vibration sensors is relevant and has great replicability for all critical assets in the industry.

Keywords: condition-based maintenance; electric motors; Artificial Intelligence; exhaustion; wood industry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1: Publicação por tipo de manutenção	11
Gráfico 2: Velocidade RMS – EXA-0018	32
Gráfico 3: Velocidade RMS – EXA-0019	33
Gráfico 4: Aceleração RMS – EXA-0019	33
Gráfico 5: Aceleração RMS – EXA-0019 – 09/07	34
Gráfico 6: Espectro da aceleração – EXA-0019 – 10/07	35
Gráfico 7: Espectro da aceleração – EXA-0019 – 11/07	35
Gráfico 8: Espectro da aceleração – EXA-0019 – 25/07	35
Gráfico 9: Espectro da aceleração – EXA-0019 – 18/08	35
Figura 1: Curva da Banheira	12
Figura 2: Curva PF	12
Figura 3: Vibração determinística ou aleatória	19
Figura 4: Movimento periódico simples e complexo	19
Figura 5: Mecanismo de Scotch Yoke	20
Figura 6: Pêndulo simples	21
Figura 7: Pontos recomendados de medição	23
Figura 8: Ativos cadastrados na plataforma	28
Fotografia 1 (a): Motor EXA-0018	24
Fotografia 1 (b): Motor EXA-0019	25
Fotografia 2: Adesivo epóxi	26
Fotografia 3 (a): Sensor instalado no EXA-0018	27
Fotografia 3 (b): Sensor instalado no EXA-0019	27
Quadro 1: Dados dos motores elétricos	25
Quadro 2: Especificações técnicas do sensor	26
Quadro 3: Códigos e eixos dos sensores	28
Quadro 4: Insights da IA para o motor EXA-0019	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Treinamento do ativo EXA-0018	28
Tabela 2: Treinamento do ativo EXA-0019	29
Tabela 3: Condições climáticas e medições de vibração e temperatura	30
Tabela 4: Dados sobre chuva coletados	31
Tabela 5: Coeficientes de correlação entre clima e medições	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Objetivos	9
1.1.1	Objetivo geral	9
1.1.2	Objetivos específicos	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1	Manutenção	10
2.1.1	Tipos de manutenção	10
2.1.2	Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC)	11
2.1.3	Curva da banheira e curva PF	11
2.1.4	Indicadores de manutenção	13
<u>2.1.4.1</u>	<u>Overall Equipment Effectiveness (OEE)</u>	13
<u>2.1.4.2</u>	<u>Key Performance Indicators (KPI)</u>	13
2.2	Indústria 4.0	14
2.2.1	Internet das Coisas (IoT)	14
2.2.2	Redes de quinta geração (5G)	15
2.2.3	<i>Big Data</i> e <i>Data Analytics</i>	156
2.3	Vibração	16
2.3.1	Conceitos essenciais sobre o estudo de vibrações	17
<u>2.3.1.1</u>	<u>Processo de análise de vibrações</u>	18
<u>2.3.1.2</u>	<u>Movimento Harmônicos Simples (MHS)</u>	18
2.3.2	Normas técnicas relacionadas	21
3	METODOLOGIA	24
3.1	Equipamentos	24
3.2	Instalação dos sensores <i>Smart Trac</i>	25
3.3	Cadastro dos sensores	27
4	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	29
4.1	Aprendizagem da Inteligência Artificial	29
4.2	Hipótese de interferência das condições climáticas	30
4.3	Acompanhamento e verificação de <i>insights</i>	32
4.3.1	Análise preliminar da intensidade de vibração	32
4.3.2	Análise de <i>insights</i> para o motor EXA-0019	33

<u>4.3.2.1</u>	<u>Crescimento de vibração RMS</u>	34
<u>4.3.2.2</u>	<u>Problema de lubrificação</u>	34
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	37
5.1	Recomendações para trabalhos futuros	29

1 INTRODUÇÃO

As indústrias do mundo todo buscam metodologias para aumentar receitas e reduzir gastos, principalmente aqueles relacionados diretamente ao processo produtivo. Um custo relevante é o gasto com a manutenção dos ativos, pois segundo o Documento Nacional 2017 da Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (ABRAMAN), o custo da manutenção representa 4% do faturamento das indústrias brasileiras.

O acompanhamento das máquinas para uma indústria é fundamental para que se possa garantir a continuidade dos processos de fabricação do produto a ser comercializado, isto é, aumentar a disponibilidade e confiabilidade dos ativos. Todavia, há uma escassez de sistemática e metodologias capazes de garantir um prognóstico precoce de falha durante a vida útil do equipamento (YAQIONG LV ET AL, 2022).

Essa escassez tem influência direta no receio de indústrias brasileiras investirem em manutenção preditiva (ou baseada na condição) quando comparado aos gastos com manutenção corretiva ou preventiva. O investimento em manutenção preditiva tem se mantido constante desde 1995 na faixa de 18% dos custos em manutenção (ABRAMAN, 2013).

A manutenção preditiva favorece o aumento de lucratividade das empresas ao reduzir incertezas e defender o desenvolvimento do negócio contra atritos, turbulências, desentendimentos e falta de alinhamento (POLESE ET AL, 2021). A relação de causa e efeito é nítida: quanto menor a incerteza, maior a confiança em garantir resultados para o cliente.

Assim sendo, avalia-se a importância em realizar o acompanhamento das máquinas a fim de evitar paradas emergenciais, prever o tempo de vida dos equipamentos e aumentar suas disponibilidades. Técnicas preditivas incluem monitoramento de vibrações, termografia, tribologia, parâmetros de processo, inspeção visual e outras técnicas de teste não destrutivas (MOBLEY, 2014).

Dentre essas alternativas, a análise de vibrações é comprovadamente uma técnica eficiente como ferramenta de manutenção preditiva (RENEWICK ET BABSON, 1985). O estudo busca aplicar essa técnica seguindo tendências internacionais pois, como explica Drath e Horch, a Indústria 4.0 é um fenômeno em potencial e tende a

transformar o setor industrial bem como as anteriores revoluções industriais (Mecanização, Eletrificação e Digitalização).

A Indústria 4.0 no contexto da manutenção industrial inclui a Gestão de Saúde e Prognóstico (PHM) que utiliza sensores para acessar a saúde dos ativos remotamente, ou seja, utilizando a Internet das Coisas (IoT) (KWON ET AL, 2016). Trata-se de uma técnica crescente, o que é visível pelo cálculo de 6,4 bilhões de “coisas conectadas” em 2015 e por estimativas de 20,8 bilhões de “coisas conectadas” em 2020 (GARTNER, 2015, APUD SHI ET AL, 2019).

Dessa forma, o estudo utiliza sensores de vibração que transmitem os dados remotamente através de receptores que atualizam os dados na rede. Considerando uma planta com centenas de equipamentos rotativos, evitar a necessidade de medição um por um representa vantagem competitiva ao reduzir a mão de obra e aumentar a velocidade no recebimento de dados e tomada de decisões.

É justamente essa possibilidade em avaliar vários ativos simultaneamente que gera alto volume, velocidade e variedade de dados - também conhecido como *big data* (KWON ET AL, 2016). O tratamento dos dados, como é o caso deste trabalho, determinará o sucesso da manutenção preditiva, pois guiará a tomada de decisões capazes de reduzir os custos de manutenção e aumento de disponibilidade.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Com dados gerados por sensores de vibração triaxiais, posicionados em pontos estratégicos de equipamento de alta criticidade para uma fábrica do ramo madeireiro, o estudo objetiva a detecção precoce de potencial de falha e aumento da vida útil do equipamento.

1.1.2 Objetivos específicos

- Definir posicionamento de sensores de vibração em equipamento crítico
- Tomar dados periodicamente de velocidade, aceleração e espectro de vibração
- Compreender qual seria a vibração natural do equipamento e avaliar suas variações
- Prever potencial falha de equipamento
- Avaliar efetividade da análise de vibrações

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para atingir os objetivos mencionados, é preciso conhecer conceitos essenciais de três áreas distintas: manutenção, Indústria 4.0 e vibração mecânica.

2.1 Manutenção

A ABNT NBR 5462 - Confiabilidade e Manutenibilidade - define a manutenção como:

“Combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida.”

2.1.1 Tipos de manutenção

A NBR 5462 classifica a manutenção em diferentes tipos, sendo os principais:

- **Manutenção corretiva**

“Manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida.”

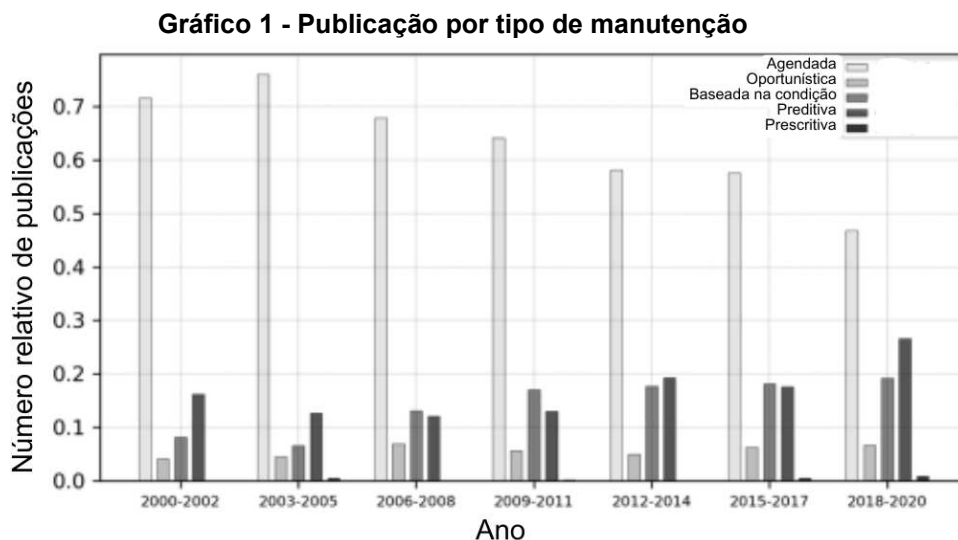
- **Manutenção preventiva**

“Manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.”

- **Manutenção Controlada/Manutenção preditiva**

“Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.”

Pode-se verificar que a manutenção preditiva, por definição, busca reduzir as manutenções preventiva e, principalmente, corretiva. Segundo L. Pinciroli et al, o interesse em manutenção preditiva ou baseada na condição é uma tendência mundial e ratificada pelo número de publicações a respeito de cada tipo de manutenção conforme mostra a Gráfico 1.



Fonte: PINCIROLI ET AL. (2023)

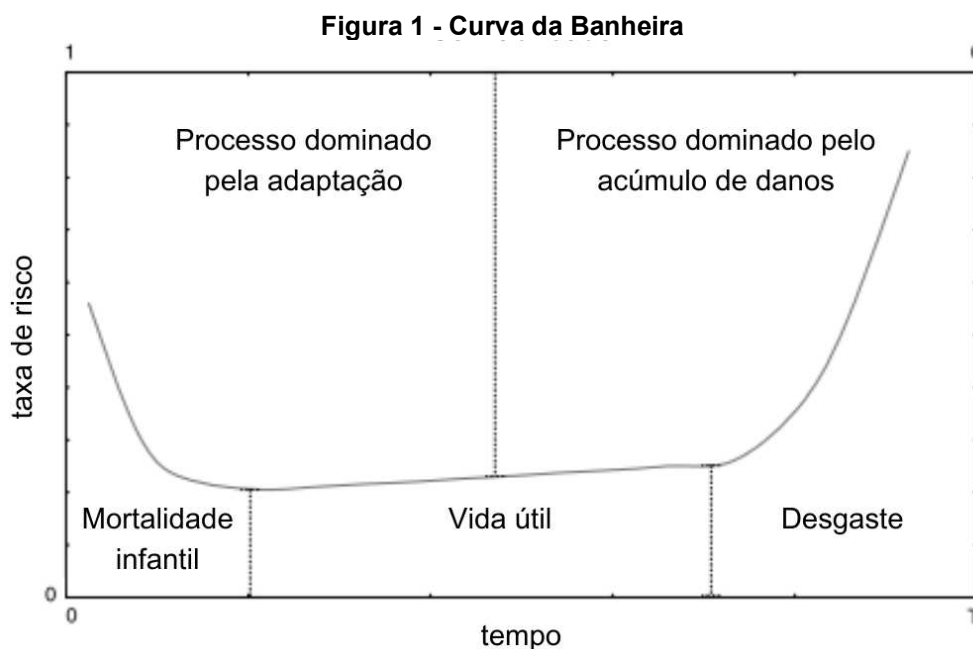
2.1.2 Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC)

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), define a confiabilidade na Norma Brasileira (NBR) 5462 como “Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo”.

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) constitui uma estratégia de manutenção, originária da indústria aeronáutica nos anos 60, focada na confiabilidade dos itens a fim de garantir segurança e preservação do ambiente aliados a melhor relação custo-benefício (MOUBRAY APUD BARAN ET AL, 2013). A adoção da estratégia diminui e elimina modos de falha, bem como mantém a inexistência no decorrer do tempo (BARAN ET AL, 2013).

2.1.3 Curva da banheira e curva PF

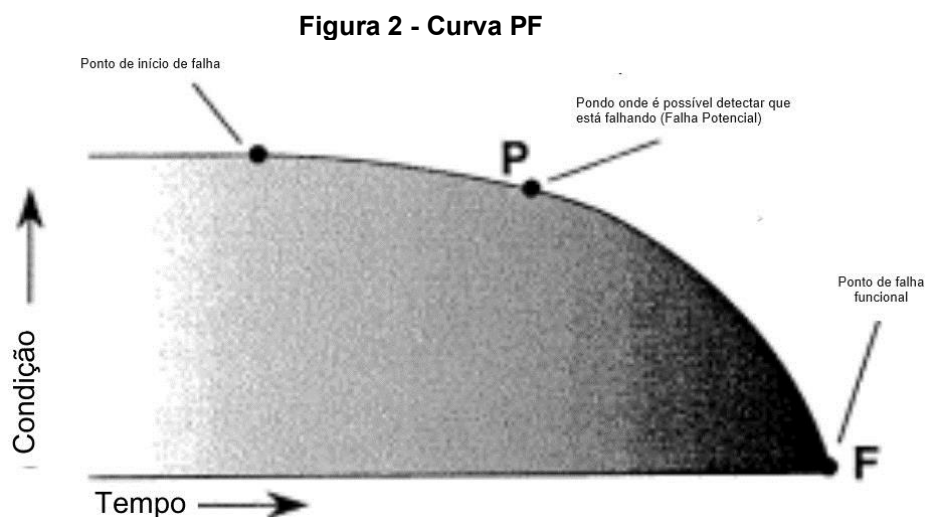
Conforme sua definição, a confiabilidade está relacionada a um intervalo de tempo. Assim, uma das medidas de confiabilidade mais aplicadas é a função de risco $h(t)$ que é a quantidade de risco h associada a um tempo t (FOGLIATTO ET AL, 2009). O comportamento tradicional de ativos pode ser visto com o auxílio da curva da banheira (Figura 1), que representa a função de risco no decorrer do tempo.



Fonte: WANG ET AL. (2002)

A interpretação da Figura 1 é dada da seguinte forma: deficiências no processo de fabricação levam a falhas precoces (mortalidade infantil); falhas no período de vida útil são causadas por condições de uso extremas e pouco variam com o passar do tempo; o equipamento se deteriora com tempo e tende a falhar por desgaste da fase de envelhecimento.

Outra curva que facilita a identificação do caminho de falha é a curva PF (Figura 2). A curva PF determina o tempo entre uma falha potencial até uma falha funcional, sendo esse tempo fundamental para atuação em campo e aumento na confiabilidade do equipamento (MOUBRAY, 1997).



Fonte: MOUBRAY (1997)

O objetivo de técnicas de manutenção preditiva é justamente detectar a falha potencial (P) o quanto antes, o que permite a atuação antes da falha funcional (F) ocorrer. Assim sendo, o monitoramento remoto e simultâneo dos ativos elimina a necessidade de definir intervalos menores de inspeção, conforme Moubray aconselha para acompanhar o envelhecimento do equipamento.

2.1.4 Indicadores de manutenção

Para pensar a manutenção de forma estratégica e embasar as tomadas de decisão organizacionais, é importante monitorar a *performance* da manutenção. Os indicadores também possuem função de direcionar as ações das pessoas que devem buscar continuamente a melhoria dos números (MOBLEY, 2013).

2.1.4.1 Overall Equipment Effectiveness (OEE)

A confiabilidade pode ser medida de diferentes formas e a mais comum delas é a OEE, definida como a eficiência global do equipamento. O que torna esse indicador tão importante é sua capacidade de interligar três variáveis: disponibilidade, qualidade e *performance* (MOBLEY, 2013). O cálculo da OEE é dado pela equação:

$$OEE = DISPONIBILIDADE \times QUALIDADE \times PERFORMANCE$$

onde,

$$DISPONIBILIDADE = \frac{TEMPO DE OPERAÇÃO}{TEMPO TOTAL};$$

$$QUALIDADE = \frac{NÚMERO DE UNIDADES APROVADAS}{TOTAL DE UNIDADES};$$

$$PERFORMANCE = \frac{TAXA DE PRODUÇÃO REAL}{TAXA DE PRODUÇÃO IDEAL};$$

Uma OEE considerada boa é acima de 85% (MOBLEY, 2013).

2.1.4.2 Key Performance Indicators (KPI)

A disponibilidade é o indicador que a manutenção possui o maior controle dentro do cálculo da OEE, o que torna interessante a definição de métricas específicas para compreender seu resultado. Segundo MOBLEY, a principal métrica utilizada é o tempo médio entre falhas (MTBF), calculado por:

$$MTBF = \frac{TEMPO\ TOTAL\ DE\ FUNCIONAMENTO}{NÚMERO\ DE\ FALHAS}$$

Mobley afirma que caso o tempo por parada seja significativo, torna-se relevante a implementação de outro indicador, o tempo médio para reparo (MTTR), definido por:

$$MTTR = \frac{TEMPO\ PARADO\ POR\ MANUTENÇÃO\ CORRETIVA}{NÚMERO\ TOTAL\ DE\ AÇÕES\ CORRETIVAS}$$

2.2 Indústria 4.0

O uso do termo Indústria 4.0 é recente e a primeira vez utilizada foi em 2011, na Alemanha, onde o conceito ganha força e a cada ano cresce o incentivo público e privado para pesquisas relacionadas (DRATH ET HORCH, 2014). O termo faz menção a uma quarta revolução industrial impulsionada por sistemas ciberfísicos (CPS).

Segundo L. Pincioli et al (2023), a Indústria 4.0 se baseia na tomada de massivas quantidades de dados geradas por sistemas e equipamentos como sensores e robôs, mas também de novas tecnologias como Inteligência Artificial (AI), *Machine Learning* (ML), realidade aumentada, *big data analytics* e Internet das Coisas (IoT).

2.2.1 Internet das Coisas (IoT)

A Gestão de Saúde e Prognóstico (PHM) busca identificar anomalias no funcionamento de um equipamento, determinar seu estado e sua confiabilidade, além de estimar sua vida útil restante com a *performance* adequada (KWON ET AL, 2016). Essas informações são recebidas por sensores instalados nos ativos da planta capturando, de preferência, em tempo real.

A prática de utilização de sensores não é nova e vem sendo utilizada há décadas, todavia com a transmissão de dados por meio de fios (KWON ET AL, 2016). Os fios são complicações ao processo, pois precisam de canaletas adequadas, proteção contra altas temperaturas e sujeiras, entre outros fatores que tornam a prática de tomada de dados menos eficiente.

Outra possibilidade para acompanhamento das máquinas é mediante instrumentos de medição portáteis, com o manutentor se locomovendo até cada uma das máquinas para tomar os dados. Entretanto, os técnicos, por vezes, excluem os

dados coletados, o que impede a criação de uma base de dados históricos (KWON ET AL, 2016).

Dessa forma, a utilização de sensores (coisas) conectadas sem fios se torna extremamente relevante para a tomada de dados capazes de indicar a saúde dos ativos. As informações são armazenadas em nuvem, o que permite visualizar facilmente a situação de operação, bem como gerenciar novos riscos e, possivelmente, desconhecidos anteriormente (KWON ET AL, 2016).

2.2.2 Redes de quinta geração (5G)

A evolução em Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) tem levado a estrondoso potencial computacional e uma tendência comum da Indústria 4.0 é a integração entre Big Data Analytics e técnicas prognósticas e preditivas. As redes de quinta geração (5G) favorecem essas integrações ao oferecer latências extremamente baixas e elevadas velocidades comparadas às tecnologias anteriores, 3G e 4G (MOURTZIS ET AL, 2022).

Com a aparição do 5G, um dos serviços que tem chamado a atenção é o de veículos autônomos, todavia seus avanços esbarram nas limitações de segurança e confiabilidade dos veículos. É por isso que a *Third Generation Partnership Project* (3GPP), uma associação internacional de órgãos normativos de telecomunicações, e o Instituto Europeu de Padrões em Telecomunicações (ETSI) confirmaram que o diagnóstico remoto e manutenção devem estar no centro do desenvolvimento dos veículos (MA ET AL, 2022).

A conectividade 5G destaca-se no ramo industrial ao conectar máquinas físicas com domínios computacionais, de modo que o chão de fábrica possa ser controlado e operado tomando uma grande quantidade de dados das máquinas praticamente instantaneamente. Todavia, grande parte desses dados não tem serventia por não serem tratados na mesma velocidade que são gerados (MOURTZIS ET AL, 2022).

Dessa forma, muitos estudos nas últimas décadas têm buscado alternativas para utilizar todos esses dados em tempo real. A ideia de manutenção baseada em dados de máquina também é base de inúmeros estudos nas últimas décadas e, para que engenheiros sejam capazes de tirar prognósticos corretos em situações reais de chão de fábrica, busca-se prioritariamente o desenvolvimento de técnicas avançadas de utilização de dados (MOURTZIS ET AL, 2022).

A expectativa da indústria com o 5G é grande e espera gerar melhores tomadas de decisões, por exemplo realizando ações mecânicas baseadas em dados históricos e conhecimentos (MOURTZIS ET AL, 2022). A velocidade do 5G permite uma diferença de resposta quase imperceptível entre operação *in loco* ou remotamente e isso permite soluções de alta qualidade, viabilidade e baixo custo (MA ET AL, 2022).

2.2.3 *Big Data* e *Data Analytics*

A indústria possui uma capacidade enorme de gerar dados de alta dimensão, saber tratá-los para atingir seu valor potencial e desenvolver um fluxo viável de dados é o grande desafio no ramo da manufatura. O processo de tomada de decisão baseado em análises de *big data* maximiza a função do sistema da manufatura, em conformidade com a estrutura interna da empresa (LI ET AL, 2022).

A revolução que a análise de *big data* deve causar na indústria é nítida e suas características podem ser resumidas em 5V: Volume, Variedade, Velocidade, Valor e Veracidade. Isto é, maior quantidade de dados gerados rapidamente de fontes e formatos diferentes com alta precisão e enorme valor agregado para tomadas de decisão (LI ET AL, 2022).

Com o crescimento do armazenamento de dados e tecnologias, análises guiadas por *big data* são essenciais para a criação de valor da indústria manufatureira (14 em LI ET AL, 2022). As decisões de líderes estão em constante processo de mudança e melhoria, sendo boa parte delas transferidas da experiência para análise de *big data* sendo alicerce para manufatura sustentável, praticando e desenvolvendo a Indústria 4.0 (LI ET AL, 2022).

A análise de *big data* é fundamental para tomada de decisão baseada em dados, ou seja, compreender do que se trata a análise de *big data* também é. Os principais processos da análise podem ser resumidos em coleta de dados, gestão, processamento, análise e visualização. São essas etapas que podem substituir “a imaginação dos líderes” por “informações reconhecidas e validadas”, aumentando o conhecimento do sistema como um todo (LI ET AL, 2022).

2.3 Vibração

Segundo Kelly (2018), vibrações são definidas como “oscilações de um sistema mecânico ou estrutural em torno de uma posição de equilíbrio”. O elemento de inércia

é deslocado da posição de equilíbrio por uma força externa, realizando, assim, trabalho (KELLY, 2018). Segundo Faria Neto (2022), a análise de vibrações passa por considerar variações de energias, potencial e cinética - considerando sempre a energia conservativa dentro de um sistema.

2.3.1 Conceitos essenciais sobre o estudo de vibrações

Segundo Rao (2008), os elementos de um sistema vibratório são três meios: “um para armazenar energia potencial (mola ou elasticidade), um para armazenar energia cinética (massa ou inércia) e um de perda gradual de energia (amortecedor)”. Dessa forma, um sistema amortecido representa aquele que possui dissipação de energia a cada ciclo de vibração.

O sistema vibratório possui um número de graus de liberdade, ou seja, o número de coordenadas necessárias para determinar a exata posição de todos os componentes do sistema. Escolher um sistema de coordenadas adequado pode reduzir o número de variáveis, mas não altera a interdependência entre as coordenadas, mantendo o número de graus de liberdade do sistema (RAO, 2008).

Sistemas que possuem componentes rígidos não deformáveis possuem número finito de graus de liberdade, enquanto a maioria dos sistemas possui elementos deformáveis tendo infinitos graus de liberdade. Os sistemas com número finito de graus de liberdade são chamados sistemas discretos e sistemas com número infinito de graus de liberdade são sistemas contínuos (RAO, 2008).

A modelagem de sistemas reais costuma simplificar elementos deformáveis buscando um sistema discreto e uma forma de aumentar a precisão dos resultados é aumentar o número de graus de liberdade (RAO, 2008). Segundo Faria Neto (2022), o trabalho de engenheiros tende a ser, em sua maioria, transformar, simplificar e equacionar um problema real capaz de resolvê-lo.

A vibração pode ser classificada em livre, aquela que recebe apenas uma perturbação inicial e deixa de receber força externa, enquanto a forçada o sistema segue sujeito a uma força externa (FARIA NETO, 2022). A classificação de vibrações ainda pode ser em linear (com todos os componentes comportando-se linearmente) ou não linear, além de vibração determinística (onde a excitação é conhecida a todo instante) ou aleatória (RAO, 2008).

2.3.1.1 Processo de análise de vibrações

A metodologia para realizar uma análise de vibrações inicia sempre pela compreensão do problema real, abstraindo o sistema do ambiente e que efeitos ele causa no ambiente. Determinam-se as constantes e parâmetros que serão variáveis, além de definir claramente os propósitos da modelagem matemática que deverão ser atingidos ao solucionar o problema e prever as vibrações do sistema (KELLY, 2018).

A segunda etapa para a modelagem de um sistema é a formulação de hipóteses. Naturalmente, quanto maior for a riqueza de detalhes na identificação do problema, com elevado número de efeitos avaliados, maior a complexidade das equações a serem solucionadas pela modelagem. Dessa forma, o objetivo das hipóteses é simplificar o problema sem que o resultado seja significativamente afetado (KELLY, 2018).

Em seguida, passa-se para a derivação das equações governantes tomando como base os princípios e leis da dinâmica. Uma vez definidas as equações, tomam-se as restrições geométricas e busca-se solucionar as equações governantes utilizando diferentes métodos como a transformada de Laplace, métodos matriciais e métodos numéricos (FARIA NETO, 2022).

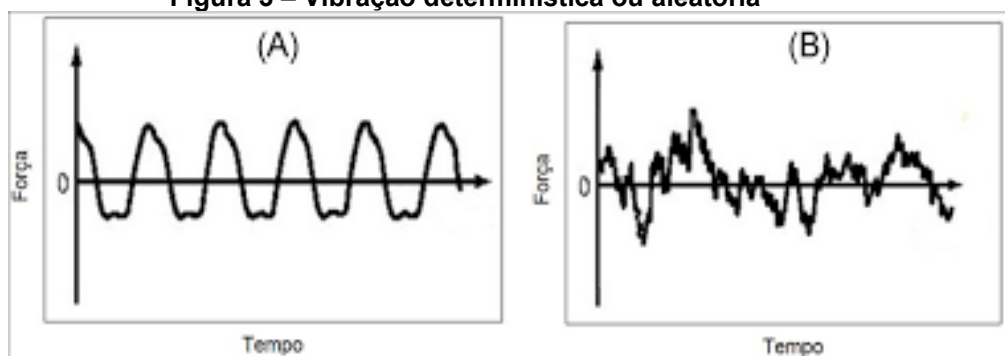
Rao (2008) afirma que os resultados matemáticos (que fornecem deslocamentos, velocidades e acelerações) obtidos ao solucionar as equações governantes devem passar por interpretações criteriosas. A realização de diagramas pode facilitar a compreensão do problema (KELLY, 2018) e, por consequência, favorece a visão dos objetivos da análise e possíveis implicações dos resultados.

2.3.1.2 Movimento Harmônico Simples (MHS)

Movimentos considerando uma partícula que possui um estado inicial em equilíbrio de forças, oscila e retorna periodicamente costuma receber uma idealização de problemas bastante comum que é a simplificação em Movimento Harmônico Simples (MHS) de um sistema. O MHS é definido como movimento oscilatório no qual a força restauradora é proporcional ao deslocamento da partícula a partir de sua posição de equilíbrio (FARIA NETO, 2022).

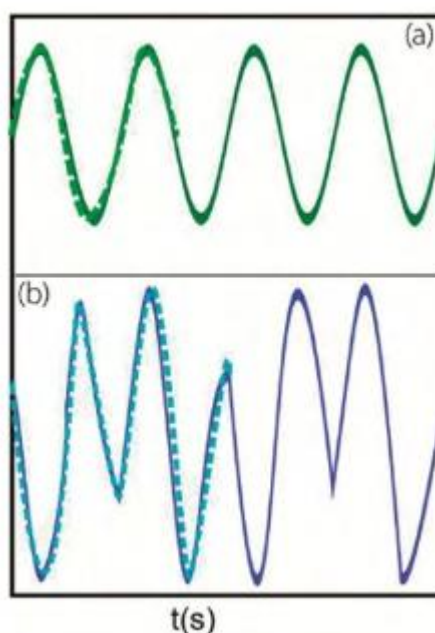
O MHS é determinístico, ou seja, possui valor de excitação conhecida no tempo (conforme parte A da Figura 3). A diferença entre um movimento harmônico simples (a) e um complexo (b) pode ser vista graficamente pela Figura 4.

Figura 3 – Vibração determinística ou aleatória



Fonte: Adaptado de RAO (2008)

Figura 4 - Movimento periódico simples e complexo



Fonte: FARIA NETO (2022)

Faria Neto (2022) indica algumas grandezas físicas que são fundamentais para a compreensão de movimentos harmônicos simples ou não:

- A frequência (f) determina quantas vezes o objeto oscila em determinado período;
- O ciclo representa o movimento completo uma única vez;
- O período (T) representa o tempo necessário para realizar um ciclo;
- A amplitude (A) é o deslocamento máximo a partir do equilíbrio.

Partindo da definição do MHS com o deslocamento proporcional à força aplicada, pode-se tomar a lei de Hooke para descrever a relação entre força e deslocamento (FARIA NETO, 2022):

$$F = -kx$$

sendo F a força (N no Sistema Internacional), k a constante de rigidez da mola (N/m no SI) e x o deslocamento (em m no SI).

A equação do movimento pode ser encontrada pela segunda lei de Newton (FARIA NETO, 2022):

$$F = ma$$

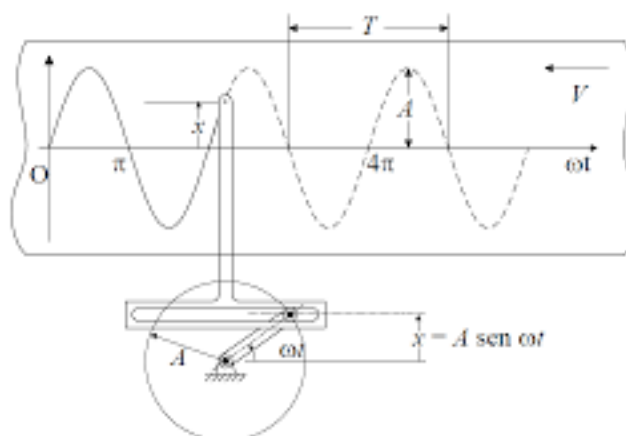
com F a força, m a massa (em kg no SI) e a aceleração (em m/s^2 no SI).

Manipulando as equações de Hooke e segunda lei de Newton chega-se à uma equação diferencial com solução na forma senoidal com o deslocamento no tempo (HALLIDAY ET AL, 2016, APUD FARIA NETO, 2022):

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

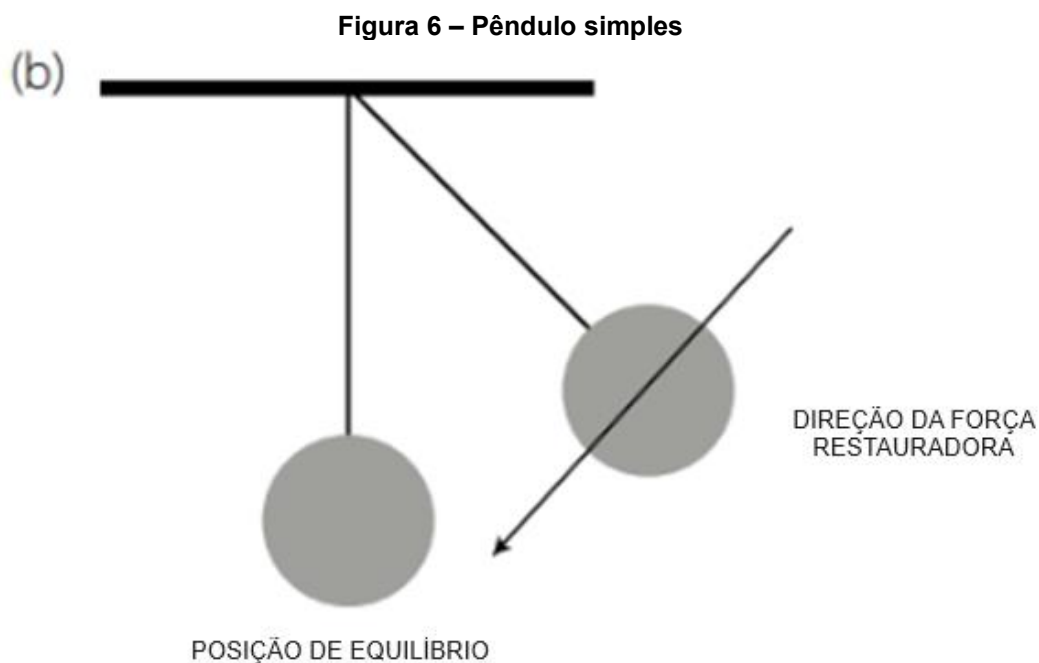
com x deslocamento, A amplitude, ω frequência angular, taxa de variação de um ângulo com o tempo, e φ a constante de fase - condição inicial do movimento (HEWITT, 2009, APUD FARIA NETO, 2022). A Figura 5 representa o Mecanismo de Scotch Yoke, um exemplo de movimento harmônico simples. A Figura 6 representa um pêndulo simples, também um MHS, com a força restauradora indicada.

Figura 5 – Mecanismo de Scotch Yoke



Fonte: Adaptado de RAO (2008)

No MHS, a velocidade e a aceleração variam conforme o deslocamento. Quando o deslocamento é máximo, a velocidade é zero e contrário também é válido com a velocidade máxima o deslocamento é nulo. A equação da velocidade e da aceleração podem ser derivadas a partir da equação do deslocamento, sendo também na forma senoidal (FARIA NETO, 2022).



Fonte: FARIA NETO (2022)

O deslocamento também pode ser escrito em função da frequência em vez do tempo uma vez que a frequência é o inverso do período e:

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

Onde f é a frequência (em Hertz) e ω a frequência angular.

O gráfico da amplitude em função da frequência é importante para a detecção de falhas (KUZIO ET AL, 2023). Trata-se da análise espectral e a falha transparece por meio de picos de falha nos harmônicos do espectro. A frequência de falha é relacionada apenas a condições de operação e parâmetros básicos de rolamentos e engrenagens sendo calculados facilmente por simples e conhecidas equações (RANDALL ET AL, 2011, APUD KUZIO ET AL, 2023).

2.3.2 Normas técnicas relacionadas

A Norma Técnica Brasileira NBR 10082:2021 intitulada “Ensaio não destrutivo - Análise de vibrações - Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidades de 600r/min a 5000 r/min” é um dos principais guias para análise vibracional na indústria brasileira. A norma estabelece requisitos para medição de vibração em equipamentos dentro da rotação mencionada no título, potência mínima de 15 kW e frequência entre 10 Hz e 1000 Hz.

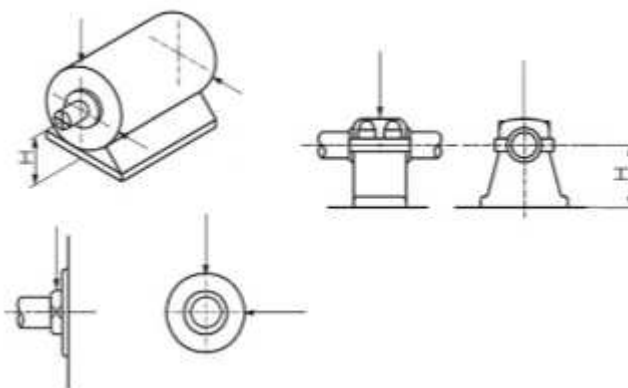
A NBR 10082 faz referência a outras normativas como a NBR 15928:2011 que estabelece a terminologia para análise de vibrações. Algumas terminologias interessantes a ressaltar são:

- Oscilação: “variação em relação ao tempo da magnitude de uma grandeza, com relação a uma referência especificada, quando a variação assume valores maiores e menores do que um valor médio”;
- Excitação: “força externa periódica ou não que, aplicada a um sistema, provoca uma resposta”;
- Resposta de um sistema: “expressão quantitativa do movimento de um sistema devido a uma excitação”;
- Espectro de frequência: “gráfico cartesiano representativo da série de Fourier relativo a um sinal está sendo analisado”;
- Severidade de vibração: “termo genérico que designa um valor, ou conjunto de valores, como valor quadrático médio, valor de pico ou outro parâmetro que descreve a vibração”.

Outra norma referenciada pela NBR 10082 é a ISO 10816-3:1995 que é a correspondente internacionalmente, todavia com abrangência maior de rotações (entre 120 r/min e 15000 r/min). A terceira e última norma referenciada é a norma NBR 10273 que trata dos “Requisitos para instrumentos de medição de severidade de vibração”.

A NBR 10082 ainda possui um capítulo específico para indicar os pontos de medição adequados em equipamentos rotativos, além de definir as condições operacionais necessárias para a medição. A Figura 7 representa pontos de medições recomendados e algumas considerações são as seguintes:

- Posicionamento em local de fácil acesso;
- Próximo ao mancal e em superfície rígida;
- Medir em duas direções radiais e axialmente;
- Medidas com a máquina em condição normal de operação;
- Se a máquina possuir cargas operacionais variáveis, realizar medições para cada carga;
- Se houver vibração do solo, verificar se não ultrapassa 25% do valor encontrado com a máquina operando.

Figura 7 – Pontos recomendados de medição

Fonte: ABNT NBR 10082 (2021)

A NBR 10082 também oferece classificação das máquinas quanto a tipo, potência e flexibilidade dos mancais. Com base na classificação anterior, a norma define níveis de severidade para a vibração das máquinas por três critérios: magnitude de vibração, variação na magnitude de vibração e avaliação pela análise espectral do sinal de vibração.

A última atualização da norma ISO 10816 é ISO 20816 de 2016 e é dividida em partes, sendo a primeira delas (20816-1) com orientações gerais para análise de vibrações em máquinas. Conforme mencionado anteriormente, é a versão internacional equivalente da NBR 10082.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho se deu pela definição e estudo de um equipamento de alta criticidade para uma indústria do ramo madeireiro. O processo de escolha do equipamento levou em consideração, principalmente, os impactos negativos que uma falha do equipamento poderia causar para o ritmo de produção da planta. Outro ponto levado em consideração também foi a acessibilidade para fixar os sensores.

Uma vez que o equipamento esteja definido, o estudo tomou a norma NBR 10082 como referência para realização de análise vibracional na máquina. Os sensores de vibração foram selecionados devido a vasta utilização nas indústrias brasileiras e em corrente expansão pela América Latina, muito devido à possibilidade de se monitorar inúmeros ativos remotamente em tempo real.

3.1 Equipamentos

A exaustão de maravalha e pó de madeira é fundamental para o bom funcionamento das máquinas da indústria, tanto no quesito segurança quanto no reaproveitamento e venda de produto secundário. Dessa forma, o estudo selecionou dois motores elétricos responsáveis pela exaustão de um setor do processo de fabricação de molduras.

Os dados dos motores exaustores sob códigos de identificação *EXA* – 0018 e *EXA* – 0019 estão indicados no Quadro 1 e os motores estão apresentados nas Fotografias 1 (a) e (b), respectivamente.

Fotografia 1 (a) – Motor *EXA* – 0018 e Fotografia 1 (b) - Motor *EXA* – 0019



Fonte: Autoria própria (2023)

As Fotografias 1 (a) e 1 (b) representam os motores em condições normais de operação na fábrica. Os motores estão em local externo e estão propensos ao acúmulo de poeira, provinda da madeira ou não, como é possível ver nas imagens. Pode-se notar, também, a identificação dos equipamentos em preto e verde no canto superior esquerdo das fotografias.

Quadro 1 – Dados dos motores elétricos

DESCRIÇÃO	EXA-0018 - Fotografia 1 (a)	EXA-0019 – Fotografia 1 (b)
MARCA	WEG	WEG
MODELO	PREMIUM W22	PREMIUM W22
POTÊNCIA (kW)	90	75
MATERIAL TRANSPORTADO	PÓ	MARAVALHA
CRITICIDADE	ALTA	ALTA
ROTAÇÃO (RPM)	1788	1783
ROLAMENTO	6316 - C3	6314 - C3

Fonte: Autoria própria (2023)

Tomar as informações corretas dos ativos é fundamental para o preenchimento do cadastro do ativo na plataforma. Esse cadastro serve de premissa básica para a Inteligência Artificial (IA) utilizar para os cálculos de frequência natural do equipamento e frequências características para cada modo de falha. Em especial, ressalta-se os dados de rolamento, rotação e potência dos motores elétricos indicados no Quadro 1.

3.2 Instalação dos sensores *Smart Trac*

Seguindo a NBR 10082, o posicionamento dos sensores seguiu os seguintes critérios: local de fácil acesso, maior proximidade possível de mancal e rolamento, conexão com a parte fixa do equipamento (tampa dianteira) e realização de medições nas direções horizontal e vertical. Como a parte dianteira do motor está mais próxima ao rotor do exaustor, está mais propensa a falhas e maiores níveis vibracionais, sendo assim a escolhida para fixação dos sensores.

O modelo de sensor utilizado foi o Smart Trac da Tractian com ficha técnica de medição conforme o Quadro 2. O sensor possui grau de proteção IP69K que permite instalação em locais úmidos ou externos, além de operar entre -10°C e 90°C.

Ainda segundo a fabricante, pode ser fixado por imã (o que não garante a melhor fixação) ou pode ser colado na superfície do equipamento rotativo.

Quadro 2 – Especificações técnicas do sensor

MEDIÇÃO	SMART TRAC
Frequência	De 1 Hz a 32000 Hz
Aceleração	Até 16 g
Velocidade	Até 100 mm/s RMS
Temperatura	De -10 a +90 °C
Algoritmo FFT	4096 linhas (por eixo)
Configuração padrão	Coletas a cada 10 minutos
Duração da coleta	1kHz (8s), 2kHz (4s), 4kHz (2s), 8kHz (1s), 16kHz (0,5s), 32kHz (0,25s)

Fonte: Adaptado de Smart Trac Ficha Técnica (2023)

Pela disponibilidade, a cola para fixar o aparelho foi um adesivo epóxi com tempo de secagem de 24 horas (o que não representou um problema pois em poucos minutos já apresentou boa aderência, além do imã também). A área para fixação foi limpa com o auxílio de estopas e os componentes A e B do adesivo (Fotografia 2) foram misturados sobre a superfície, seguindo recomendação da fabricante.

Fotografia 2 – Adesivo epóxi



Fonte: Aatoria própria (2023)

As Fotografias 3 (a) e 3 (b) apresentam o posicionamento dos sensores sobre os motores EXA-0018 e EXA-0019, respectivamente. Em ambas as imagens o rotor

está sob o sensor e na direção do eixo x indicado no sensor. As informações de código do sensor e seus respectivos eixos de medição estão indicadas no Quadro 3.

Fotografia 3 (a) – Sensor instalado no EXA – 0018



Fonte: Autoria própria (2023)

Fotografia 3 (b) – Sensor instalado no EXA – 0019



Fonte: Autoria própria (2023)

3.3 Cadastro dos sensores

Os sensores instalados sobre os equipamentos rotativos precisam estar conectados à rede para que possam transmitir os dados em tempo real. Dessa forma, colocou-se um receptor (*Smart Receiver*) a menos de 30 metros de distância para

receber os sinais emitidos pelo *Smart Trac*. Para o receptor realizar o carregamento dos dados dos sensores na plataforma *online*, eles precisaram ser cadastrados.

O primeiro passo foi identificar os códigos dos sensores e os eixos, conforme indica o Quadro 3.

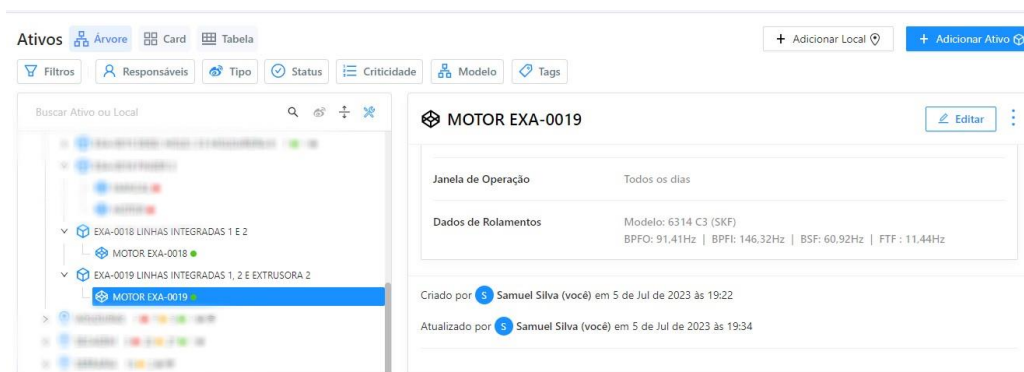
Quadro 3 – Códigos e eixos dos sensores

DESCRIÇÃO	EXA – 0018	EXA – 0019
CÓDIGO DO SENSOR	AZY1189	GVS7826
EIXO X	AXIAL	AXIAL
EIXO Y	HORIZONTAL	HORIZONTAL
EIXO Z	VERTICAL	VERTICAL

Fonte: Autoria própria (2023)

Em seguida, os ativos foram cadastrados dentro da árvore de equipamentos da plataforma *online* com as informações indicadas na Tabela 1 e na Tabela 3. A sequência do preenchimento das telas da plataforma para cadastro dos ativos está apresentada no Apêndice A. A Figura 8 mostra os ativos cadastrados na plataforma, com o motor *EXA – 0019* em destaque.

Figura 8 – Ativos cadastrados na plataforma



Fonte: Autoria própria (2023)

4 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Realizado o cadastro completo dos ativos e dos sensores, a Inteligência Artificial passou por um período de aprendizagem para compreender os padrões de vibração dos equipamentos. Esse período foi acompanhado, além de realizada uma eliminação de hipótese de interferência das condições climáticas nas medições e verificados os *insights* gerados pela IA.

4.1 Aprendizagem da Inteligência Artificial

Após a instalação dos sensores, a Inteligência Artificial levou três dias para realizar o treinamento do ativo. A Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam as porcentagens de aprendizado nos primeiros dias para, respectivamente, os motores *EXA – 0018* e *EXA – 0019*, considerando que no 4º dia os equipamentos não operaram e, assim, não houve evolução no treinamento do ativo.

Tabela 1 – Treinamento do ativo *EXA – 0018*

MODO DE FALHA	1º DIA	2º DIA	3º DIA	4º DIA	5º DIA	6º DIA	7º DIA
Desbalanceamento	20%	36%	59%	59%	78%	96%	100%
Desalinhamento	20%	36%	59%	59%	78%	96%	100%
Folga Mecânica	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Falhas de Rolamento	20%	36%	59%	59%	78%	96%	100%
Temperatura	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%
Velocidade RMS	20%	36%	59%	59%	78%	96%	100%
Aceleração RMS	20%	36%	59%	59%	78%	96%	100%

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 2 – Treinamento do ativo *EXA – 0019*

MODO DE FALHA	1º DIA	2º DIA	3º DIA	4º DIA	5º DIA	6º DIA	7º DIA
Desbalanceamento	20%	37%	60%	60%	79%	98%	100%
Desalinhamento	20%	37%	60%	60%	79%	98%	100%
Folga Mecânica	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Falhas de Rolamento	20%	37%	60%	60%	79%	98%	100%
Temperatura	20%	37%	60%	60%	79%	98%	100%
Velocidade RMS	20%	37%	60%	60%	79%	98%	100%
Aceleração RMS	20%	37%	60%	60%	79%	98%	100%

Fonte: Autoria própria (2023)

Durante o período de treinamento, foram gerados relatórios iniciais de saúde e ajustados o espectro e a duração de medição em ambos os ativos da mesma maneira devido à proximidade da rotação e potência. Os relatórios estão nos Apêndices B e C, o intervalo do espectro de medição foi configurado para 8 kHz (contra 4 kHz anteriormente por padrão) e a duração para meio segundo (contra um segundo anteriormente).

4.2 Hipótese de interferência das condições climáticas

Como os equipamentos rotativos estão localizados em área externa, os motores estão propensos a chuva e variações de temperatura conforme a atmosfera. Dessa forma, analisou-se a variação da média de vibração e temperatura aferida pelos sensores em relação às temperaturas mínimas e máximas do ambiente, conforme dados do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) e apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Condições climáticas e medições de vibração e temperatura

DATA	TEMP. MÍN. (°C)	TEMP. MÁX. (°C)	VIBRAÇÃO MÉDIA EXA – 0018 (mm/s)	TEMP. MÉDIA EXA – 0018 (°C)	VIBRAÇÃO MÉDIA EXA – 0019 (mm/s)	TEMP. MÉDIA EXA – 0019 (°C)
06/07/2023	13	20	2,755	24,76	4,37	44,71
07/07/2023	13	21	2,573	27,4	4,282	46,39
08/07/2023	15	17	2,428	27,09	4,09	46,51
10/07/2023	16	18	2,28	25,28	4,16	43,17
11/07/2023	16	21	2,279	29,13	4,55	47,42
17/07/2023	13	17	2,418	23,91	4,191	42,69
18/07/2023	12	17	2,406	25,28	4,104	44,21
20/07/2023	10	19	2,413	25,01	4,262	43,96
21/07/2023	13	20	2,391	26,38	4,104	45,87
22/07/2023	14	20	1,798	20,77	3,685	46,23
25/07/2023	14	22	2,44	29,29	3,24	49,21
26/07/2023	13	21	2,47	27,05	2,906	45,2
27/07/2023	14	21	2,389	27,16	3,077	45,41
28/07/2023	13	18	2,312	25,47	2,304	44,33
30/07/2023	11	19	2,425	25,19	2,693	44,78

Fonte: Autoria própria (2023)

Visando encontrar a correlação (ou eliminar a hipótese) entre a temperatura e a intensidade das vibrações ou temperatura de medição, calculou-se os coeficientes de correlação de Pearson para os dados da Tabela 6. Esse coeficiente é bom para avaliar relações lineares entre os dados e, como o dado sobre a chuva é booleano (choveu ou não choveu), foi necessário buscar um coeficiente para relação não linear.

Assim, adotou-se o coeficiente de Spearman (ou r de Spearman) e considerado os dias chuvosos como 1 e os dias não chuvosos como 0. Dessa forma, os dados referentes à chuva estão indicados na Tabela 4. Os coeficientes mencionados nesse parágrafo e anterior estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 – Dados sobre chuva coletados

DATA	CHUVA	DADO LÓGICO ADOTADO
10/07/2023	SIM	1
11/07/2023	SIM	1
17/07/2023	SIM	1
18/07/2023	NÃO	0
20/07/2023	NÃO	0
21/07/2023	NÃO	0
22/07/2023	NÃO	0
25/07/2023	NÃO	0
26/07/2023	SIM	1
27/07/2023	SIM	1
28/07/2023	SIM	1
30/07/2023	NÃO	0

Fonte: Aatoria própria (2023)

Tabela 5 – Coeficientes de correlação entre clima e medições

CONDIÇÃO CLIMÁTICA	VIBRAÇÃO MÉDIA EXA – 0018	TEMP. MÉDIA EXA – 0018	VIBRAÇÃO MÉDIA EXA – 0019	TEMP. MÉDIA EXA – 0019
TEMPERATURA MÍNIMA	-0,28	0,29	0,21	0,35
TEMPERATURA MÁXIMA	0,06	0,45	-0,13	0,68
TEMPERATURA MÉDIA	-0,14	0,50	0,05	0,69
CHUVA (COEF. DE SPEARMAN)	-0,19	0,27	0,00	-0,24

Fonte: Aatoria própria (2023)

Os coeficientes indicados na Tabela 5 são, na maioria, próximos a zero, o que indica baixa ou inexistente relação entre temperatura ambiente e velocidade de vibração, assim como chuva e vibração. Vale ressaltar apenas que as temperaturas ambiente e de medição possuem certa correlação, visto que os coeficientes se aproximam mais de um – principalmente no motor *EXA* – 0019.

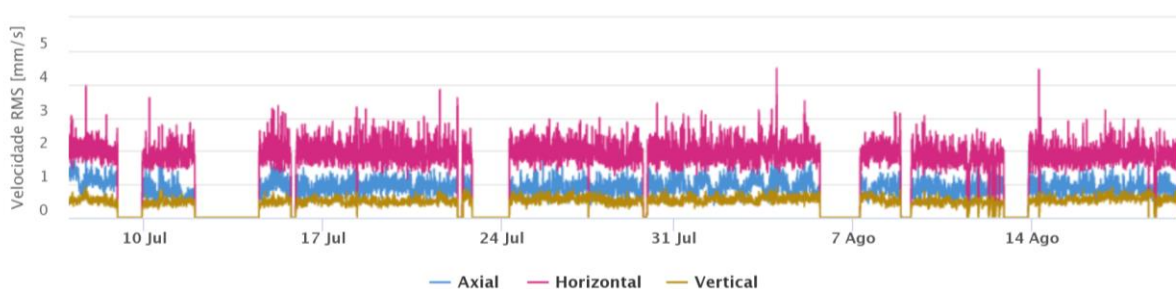
4.3 Acompanhamento e verificação de *insights*

Com os sensores instalados, ambos os motores foram monitorados entre 07/07/2023 e 19/08/2023. O acompanhamento foi realizado considerando os níveis globais de vibração e, nas situações com variações ou intensidades significativas, realizou-se a análise espectral a fim de identificar com maior precisão o modo de falha e garantir maior vida útil ao equipamento.

4.3.1 Análise preliminar da intensidade de vibração

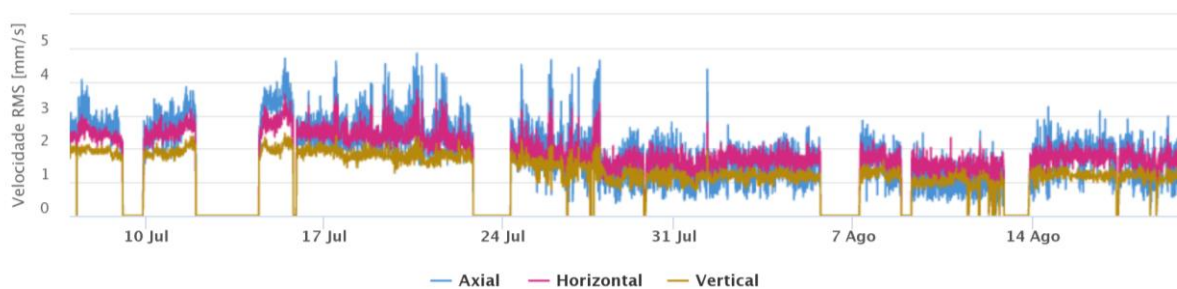
O motor *EXA* – 0018 apresentou maior estabilidade e menores níveis de vibração (Gráfico 2), sendo que não recebeu nenhum *insight* da Inteligência Artificial para nenhum dos modos de falha analisados durante o período. Os dias com vibração nula representam momentos de parada programada de produção.

Gráfico 2 – Velocidade RMS – *EXA* – 0018

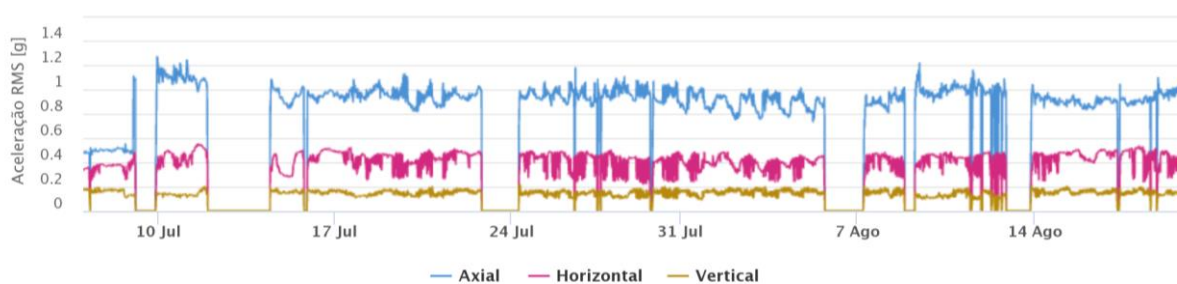


Fonte: Autoria própria (2023)

Dessa maneira, concentrou-se na análise vibracional do motor *EXA* – 0019 com níveis mais elevados de vibração, recebeu *insights* da IA que indicaram possíveis falhas eminentes do equipamento. Os níveis de Velocidade RMS para o mesmo período de análise que do motor *EXA* – 0018 estão apresentados no Gráfico 3 e de Aceleração RMS no Gráfico 4.

Gráfico 3 – Velocidade RMS – EXA – 0019

Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 4 – Aceleração RMS – EXA – 0019

Fonte: Autoria própria (2023)

A interpretação preliminar do Gráfico 3 permite identificar níveis de vibração mais elevados para o motor *EXA – 0019* do que para o motor *EXA – 0018*, no Gráfico 2. É possível verificar que as velocidades máximas para o *EXA – 0018* se limitavam a 3 mm/s, enquanto para o *EXA – 0019* (exaustor de maravalha) houve picos de mais de 4 mm/s.

A observação do Gráfico 4 traz a informação de aumento da aceleração da vibração após o dia 10 de julho e níveis bem distintos entre os eixos. O eixo com a aceleração RMS média mais alta é o eixo axial, com aproximadamente o dobro da aceleração do eixo horizontal e cinco vezes os valores apresentados pelas medições na direção do eixo vertical.

4.3.2 Análise de *insights* para o motor *EXA – 0019*

Durante o período de estudo, o motor *EXA – 0019* recebeu *insights* da IA conforme o Quadro 4. Como mencionado anteriormente, houve um acréscimo na intensidade da aceleração RMS no dia 09/10/2023, por isso detectado pela análise de tendência. Os demais modos de falha identificados dizem respeito a problema de lubrificação, podendo ser identificado apenas por análise espectral ou de carpete.

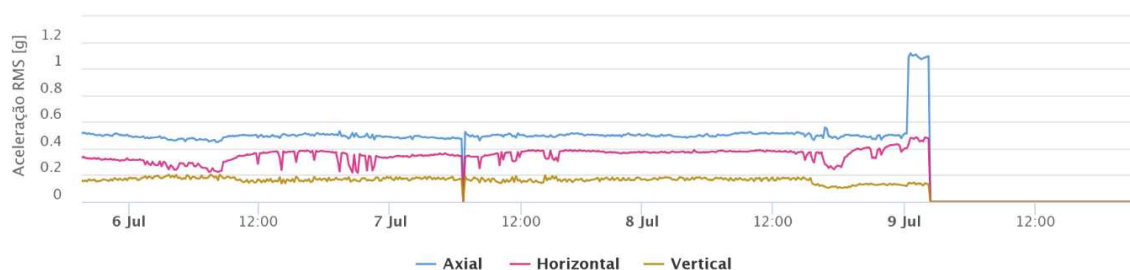
Quadro 4 – Insights da IA para o motor EXA – 0019

DATA	INSIGHT	ANÁLISE
09/07/2023	CRESCIMENTO DA VIBRAÇÃO RMS	ANÁLISE DE TENDÊNCIA
10/07/2023	PROBLEMA DE LUBRIFICAÇÃO	ANÁLISE DE CARPETE
11/07/2023	PROBLEMA DE LUBRIFICAÇÃO	ANÁLISE DE CARPETE
25/07/2023	PROBLEMA DE LUBRIFICAÇÃO	ANÁLISE DE CARPETE
18/08/2023	PROBLEMA DE LUBRIFICAÇÃO	ANÁLISE DE CARPETE

Fonte: Autoria própria (2023)

4.3.2.1 Crescimento de vibração RMS

O Gráfico 5 apresenta as medições de aceleração RMS no dia 09/07 para o exaustor de maravalha e deixa claro o aumento de intensidade por volta de meia-noite. Dessa forma, foi necessária a inspeção do ativo para verificar a causa desse aumento de vibração e impedir uma possível falha funcional do equipamento.

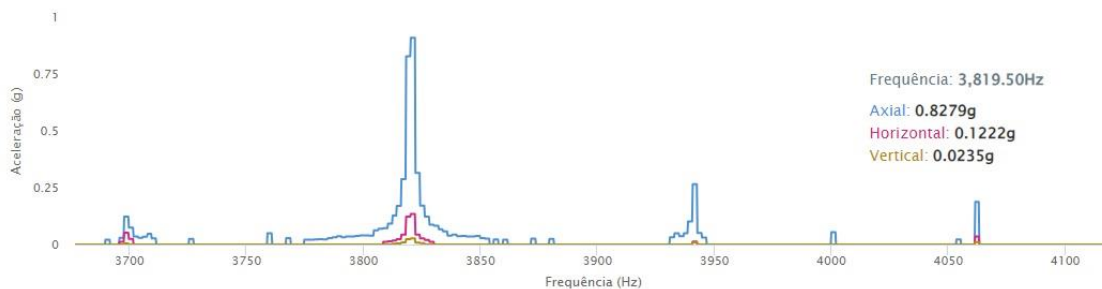
Gráfico 5 – Aceleração RMS – EXA – 0019 – 09/07

Fonte: Autoria própria (2023)

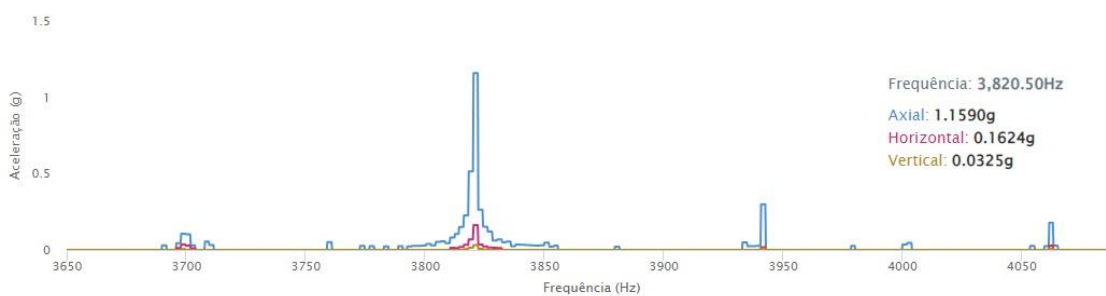
O planejamento de produção da empresa previa parada do equipamento por volta das duas horas da manhã (o Gráfico 5 mostra a vibração nula nesse horário). Dessa forma, esperou-se esse momento para realizar inspeção no equipamento que identificou resina da madeira presa ao rotor, sendo realizada assim sua limpeza e liberado o sistema para operação, após a parada planejada de produção.

4.3.2.2 Problema de lubrificação

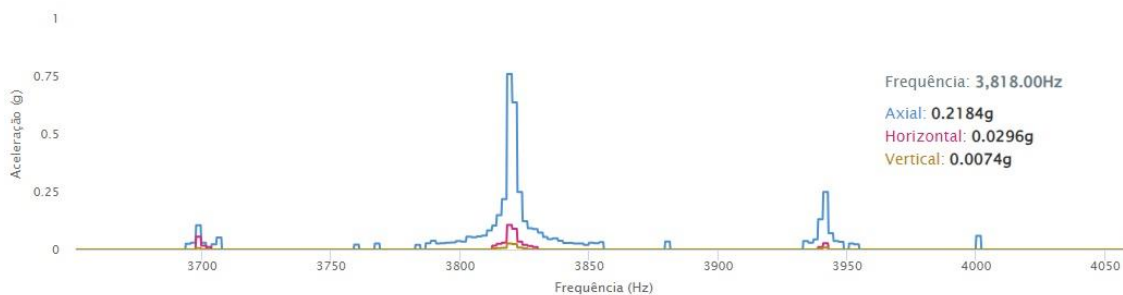
A Inteligência Artificial gerou quatro *insights* para a problema de lubrificação no ativo estudado conforme indicou o Quadro 4. As detecções foram realizadas pela análise de carpete da aceleração RMS e são apresentadas pelos Gráficos 6, 7, 8 e 9. É possível notar intensidade maior em frequências maiores, tornando mais relevante a análise de aceleração RMS contra a análise da velocidade RMS.

Gráfico 6 – Espectro da aceleração – EXA – 0019 – 10/07

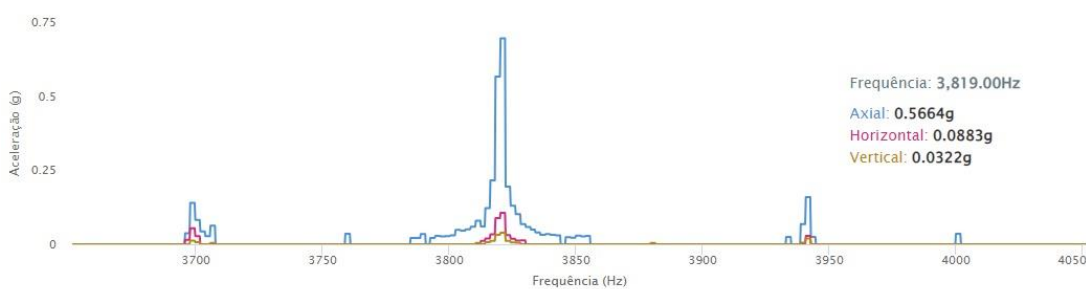
Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 7 – Espectro da aceleração – EXA – 0019 – 11/07

Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 8 – Espectro da aceleração – EXA – 0019 – 25/07

Fonte: Autoria própria (2023)

Gráfico 9 – Espectro da aceleração – EXA – 0019 – 18/08

Fonte: Autoria própria (2023)

Nas quatro ocasiões em que houve *insight* de problema de lubrificação o espectro de aceleração foi semelhante, com intensidade maior de aceleração próximo à frequência de 3820 Hz. O pico de aceleração ultrapassou 1 g no dia 11/07 enquanto nos dias 10/07, 25/07 e 18/07 os alertas foram emitidos após aceleração em valores acima de 0,75 g, em frequência próxima a 3820 Hz.

Realizada a inspeção do equipamento, optou-se pela manutenção preditiva ao se lubrificar o rolamento. A lubrificação foi feita com a graxa Mobil XHP 222 – graxa à base de Lítio capaz de operar em temperaturas de até 140°C – que é recomendada para aplicações industriais gerais e garante proteção ao rolamento em condições de alta exposição à água, como é o caso do motor em local externo.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Seguindo a tendência mundial do ramo industrial de busca por melhores níveis de disponibilidade de máquina e previsibilidade, o presente trabalho também objetivou aumentar a vida útil de equipamentos rotativos. O apoio para atingir o objetivo foram os dados vibracionais dos equipamentos que permitiu uma análise em um momento em que inspeção visual e auditiva não seria suficiente.

A importância de realizar o monitoramento dos ativos por análise de vibração está associada justamente por antecipar modos de falha que não seriam percebidos sem a utilização de sensores. A resina presa ao motor, em que a anormalidade foi detectada pela vibração, pôde ser resolvida em horários de parada programada de máquina e com baixo custo.

A simples limpeza do rotor permitiu o bom funcionamento do equipamento, ou seja, foi uma solução rápida e barata. Sem a detecção pelo sensor, a resina poderia acumular-se ainda mais e ocasionar desbalanceamento do eixo ou, até mesmo, travamento do rotor. Em ambos os casos, o tempo de parada e o custo de manutenção seriam maiores que os empenhados na limpeza.

Os ativos entraram em funcionamento poucos meses antes do início do estudo, caracterizando-os dentro do período de maior estabilidade na curva da banheira dos equipamentos. Assim, não era uma preocupação natural com a lubrificação dos rolamentos do motor, com intervalo de lubrificação mínimo de 5000 horas, tempo que só seria atingido em alguns meses.

Assim sendo, o acompanhamento do ativo e atuação após os *insights* de lubrificação demonstraram-se relevantes para manter a saúde dos rolamentos do motor. O estudo mostrou que o ambiente externo não influenciou diretamente na vibração, enquanto as temperaturas foram, o que pode ter reduzido a vida útil da graxa nos rolamentos pela variação da temperatura de trabalho.

Conclui-se, portanto, que o objetivo geral foi atingido ao reduzir o tempo de manutenção e aumentar a confiabilidade do equipamento por meio do monitoramento remoto por sensores de vibração. O estudo apresentou ótima replicabilidade pela possibilidade de acompanhar variados ativos simultaneamente e o recebimento de alertas graças à Inteligência Artificial.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

Assim como apresentado durante validação da hipótese de interferência climática nos dados captados pelo sensor, foi preciso adaptar a informação binária da chuva e utilizar um coeficiente de correlação não linear. Recomenda-se, assim, que trabalhos futuros tomem dados pluviométricos do local para facilitar análise de correlação entre os níveis de vibração e chuva.

O estudo mostrou que houve quatro *insights* de lubrificação no período de pouco mais de um mês e os planos de lubrificação de motores elétricos usuais não possuem intervalos tão apertados. Dessa forma, propõe-se realizar um estudo para definição de um intervalo de lubrificação mais adequado, sendo possível inclusive avaliar a possível troca do lubrificante.

Nessa mesma linha de raciocínio, a fabricante dos motores adverte que a lubrificação em excesso pode causar superaquecimento do mancal. Logo, sugere-se analisar se essa lubrificação não é exagerada e avaliar quais foram as premissas de projeto e se a mistura não foi adotada como um fluido homogêneo, pois é possível ver que a vibração foi maior no exaustor de maravalha, que possui maiores partículas que o pó de madeira.

REFERÊNCIAS

ABRAMAN – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MANUTENÇÃO. **Documento Nacional: A situação da manutenção no Brasil**. 2017.

LV, Yaqiong, et al. **Vibration Signal-Based Early Fault Prognosis: Status Quo and Applications**. *Advanced Engineering Informatics*, vol. 52, Apr. 2022, p. 101609. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101609>.

POLESE, Francesco, et al. **Predictive Maintenance as a Driver for Corporate Sustainability: Evidence from a Public-Private Co-Financed R&D Project**. *Sustainability*, vol. 13, no. 11, May 2021, p. 5884. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.3390/su13115884>.

MOBLEY, R. Keith, editor. **Maintenance Engineering Handbook**. Eighth edition, McGraw-Hill Education, 2014.

RENEWICK, John T., and Paul E. Babson. **Vibration Analysis---A Proven Technique as a Predictive Maintenance Tool**. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-21, no. 2, Mar. 1985, pp. 324–32. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1109/TIA.1985.349652>.

DRATH, Rainer; HORCH, Alexander. **Industrie 4.0: Hit or hype? IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 8, n. 2, p. 56-58, 2014.

KWON, Daeil, et al. **IoT-Based Prognostics and Systems Health Management for Industrial Applications**. *IEEE Access*, vol. 4, 2016, pp. 3659–70. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2587754>.

SHI, Yue, et al. **Condition-Based Maintenance Optimization for Multi-Component Systems Subject to a System Reliability Requirement**. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 202, Oct. 2020, p. 107042. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107042>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462. **Confiabilidade e manutenibilidade**. Novembro de 1994.

PINCIROLI, Luca, et al. **Maintenance Optimization in Industry 4.0**. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 234, June 2023, p. 109204. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109204>.

BARAN, Leandro, et al. **Manutenção centrada em confiabilidade (MCC) aplicada na redução das falhas funcionais em um sistema de tensionamento**. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_tn_sto_177_011_21956.pdf. Acesso em: 19 de junho de 2023.

FOGLIATTO, Flavio S., and José Luis Duarte Ribeiro. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Elsevier, 2009.

WANG, K. S., et al. **Modeling the Bathtub Shape Hazard Rate Function in Terms of Reliability**. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 75, no. 3, Mar. 2002, pp. 397–406. DOI.org (Crossref), [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(01\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00124-7).

MOUBRAY, J. **Reliability-centered maintenance: second edition**. 2^a. ed. New York: Industrial Press Inc., 1997.

MOURTZIS, Dimitris, et al. **Design and Development of an Edge-Computing Platform Towards 5G Technology Adoption for Improving Equipment Predictive Maintenance**. *Procedia Computer Science*, vol. 200, 2022, pp. 611–19. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.259>.

MA, Ruhui, et al. **A Robust Authentication Scheme for Remote Diagnosis and Maintenance in 5G V2N**. *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 198, Feb. 2022, p. 103281. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.inca.2021.103281>.

LI, Chunquan, et al. **A Review of Industrial Big Data for Decision Making in Intelligent Manufacturing**. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 29, May 2022, p. 101021. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.06.001>.

KELLY, S G. **Vibrações Mecânicas: Teorias e aplicações**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2018. *E-book*. ISBN 9788522127016. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522127016/>. Acesso em: 18 jun. 2023.

NETO, Antonio dos Reis de F.; ASSUNÇÃO, Germano S C.; SANTOS, Felipe D. Dias dos; et al. **Vibrações Mecânicas**. Porto Alegre: Grupo A, 2022. *E-book*. ISBN 9786556902654. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786556902654/>. Acesso em: 18 jun. 2023.

RAO, Singiresu. **Vibrações Mecânicas**. 4ed., Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2009. 424 pp.

KUZIO, Daniel, et al. **Identification of Fault Frequency Variation in the Envelope Spectrum in the Vibration-Based Local Damage Detection in Possible Changing Load/Speed Conditions**. *Measurement*, vol. 218, Aug. 2023, p. 113148. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113148>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10082. **Ensaio não destrutivo – Análise de vibrações – Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 r/min a 5 000 r/min**. 21 de dezembro de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15928. **Ensaio não destrutivo - Análise de vibrações - Terminologia**. Março de 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10273. **Ensaio não destrutivo – Análise de vibrações – Requisitos para instrumentos de medição de severidade de vibração de máquinas**. Setembro de 2013.

SIMEPAR. **Dados das estações, 2023**. Estação meteorológica de Guarapuava. Disponível em: http://www.simepar.br/prognozweb/simepar/dados_estacoes/25215130. Acesso em: 19 ago. 2023.

TRACTIAN. **Smart Trac Ficha Técnica.** São Paulo, 2023.

APÊNDICE A – CADASTRO DOS ATIVOS NA PLATAFORMA

Visão Geral Ativos Status Insights Analytics Métricas Relatórios CMMS / EAM

Ativos Árvore Card Tabela + Adicionar Local + Adicionar Ativo

Filtros Responsáveis Tipo Status Criticidade Modelo Tags

Buscar Ativo ou Local

- COMPRESSORES
- EXAUSTÃO 10 12 7
- MOTORES
- MOTORES
- MOTORES

Unidade Gasogenero Editar

Responsáveis
B C D S E R G

Ativos
+ Adicionar Ativo

Cadastrar Novo Ativo



EXA-0018 LINHAS INTEGRADAS 1 E 2

Descrição (Opcional)

Digite uma descrição

Cadastrar Novo Ativo

Código do Sensor

AZY1189

Tipo de Fixação

Adesivo

Modelo

Motores Elétricos

Cadastrar Novo Ativo

Tipo de Suporte

Rígido




Criticidade

1 - Alta




Ficha Técnica


 Adicione as Especificações do seu Ativo

[Editar Ficha Técnica](#)

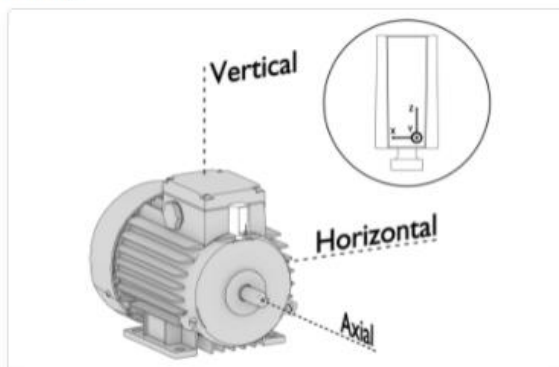
Definir Posição dos Eixos do Acelerômetro



O eixo Z (perpendicular ao sensor) é o mais fácil de definir. Se ele foi colado em cima da máquina, então o Eixo Z será **Vertical**. Se for colado na lateral, será **Horizontal**. Se for colado em direção ao eixo, será **Axial**. 

Em muitos casos, sabemos da dificuldade de definir X e Y por não estarem alinhados, para esses casos, existe a opção **Radial**. 

Exemplo



EXA-0018 LINHAS INTEGRADAS 1 E 2



Exemplo Eixos

Eixo X: Horizontal

Eixo Y: Axial

Eixo Z: Vertical

Ativo Eixos

Eixo X Axial

Eixo Y Horizontal

Eixo Z Vertical

Editar Ficha Técnica



Rotação	<input type="text" value="1788"/>	<input type="text" value="RPM"/>
Potência	<input type="text" value="90"/>	<input type="text" value="kW"/> ▾
Dados de Rolamentos	<input type="button" value="✎ Editar"/>	
Dados de Correias e Polias	<input type="button" value="+ Adicionar"/>	
Eixos	<input type="text" value="X: Axial, Y: Horizontal, Z: Vertical"/>	
Custo de Hora Parada	<input type="text" value="R\$ 0,00"/>	
Janela de Operação	<input type="button" value="✎ Editar"/>	

Cadastrar Novo Ativo

Ativo ou Local

 ▾

Fabricante

Número de Série

Cadastrar Novo Ativo

Ano de Fabricação

Código QR

[Ou gere um código automático](#)

Tags

 ▾

Cadastrar Novo Ativo



Anexe ou arraste arquivos e fotos



brandt exa-001...



plaqueta exa-0...



sensor exa-001...

[📁 Salvar](#)

< Editar MOTOR EXA-0019



MOTOR EXA-0019

Descrição (Opcional)

MOTOR WEG W22 100CV

< Editar MOTOR EXA-0019

Código do Sensor

GVS7826 ⊕ ✓

Tipo de Fixação

Adesivo ▼

Modelo

Motores Elétricos ▼

< Editar MOTOR EXA-0019

Classificação do Modelo

Trifásico

Tipo de Suporte



Rígido

Criticidade

1 - Alta

Editar Ficha Técnica



 Rotação	<input type="text" value="1783"/>	<input type="text" value="RPM"/>
 Potência	<input type="text" value="75"/>	<input type="text" value="kW"/>
 Dados de Rolamentos	<input type="button" value="✎ Editar"/>	
 Dados de Correias e Polias	<input type="button" value="+ Adicionar"/>	
 Eixos	<input type="text" value="X: Axial, Y: Horizontal, Z: Vertical"/>	
 Custo de Hora Parada	<input type="text" value="R\$ 0,00"/>	
 Janela de Operação	<input type="button" value="✎ Editar"/>	

Definir os Dados de Rolamento do Ativo



Dados do Rolamento

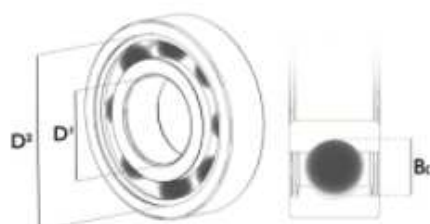
Frequências de Falha

Código do Rolamento

6314 C3

Fabricante

SKF



Zoom

Rotação do Rolamento [RPM]

1783

Fixo

Diâmetro [mm]

D¹ 70**D²** 150

Interno/Externo

Número de Elementos Girantes

Nº 8

Diâmetro dos Elementos Girantes

BD 25.3

mm

Definir os Dados de Rolamento do Ativo



Dados do Rolamento

Frequências de Falha

BPFO 91.4085

Hz

BPFI 146.3249

Hz

BSF 60.9192

Hz

FTF 11.4409

Hz

< Editar MOTOR EXA-0019

Ativo ou Local

EXA-0019 LINHAS INTEGRADAS 1, 2 E EXTRUSORA 2

Fabricante

WEG

Número de Série

11111111111111111111

< Editar MOTOR EXA-0019

Anexe ou arraste arquivos e fotos



brandt exa-001...



plaqueta exa-0...



sensor exa-001...

APÊNDICE B – RELATÓRIO INICIAL DE SAÚDE – EXA-0018

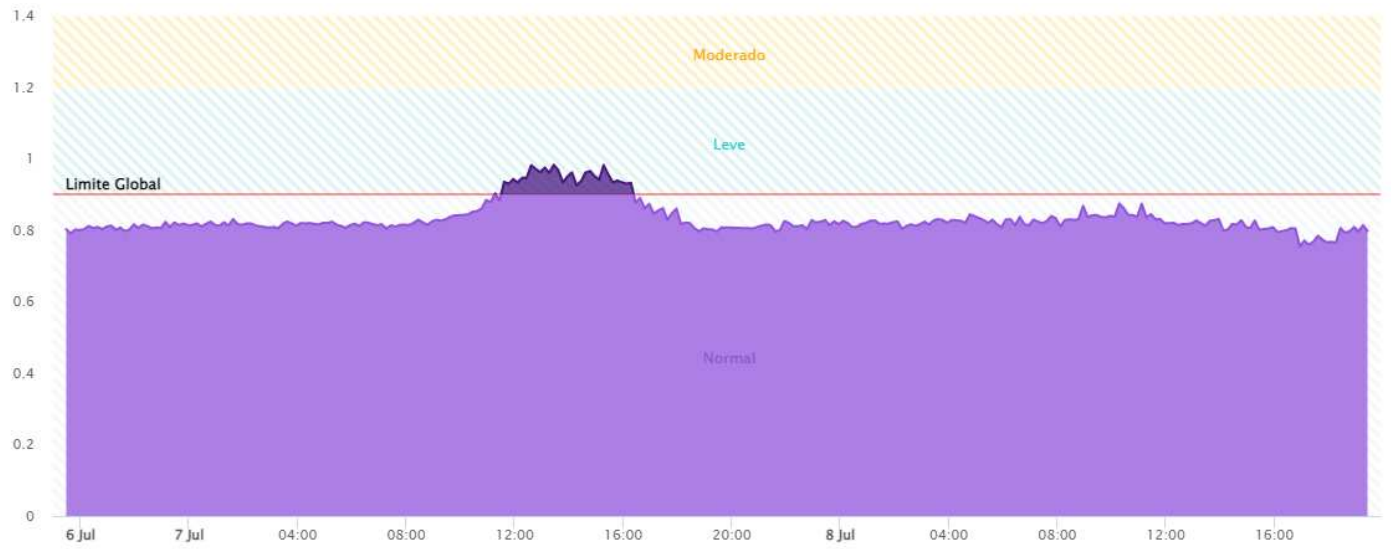
Data de Detecção 8 de Julho de 2023 às 19:26

Título Relatório Inicial de Saúde
Qualidade de Sinal Ruim (42%)

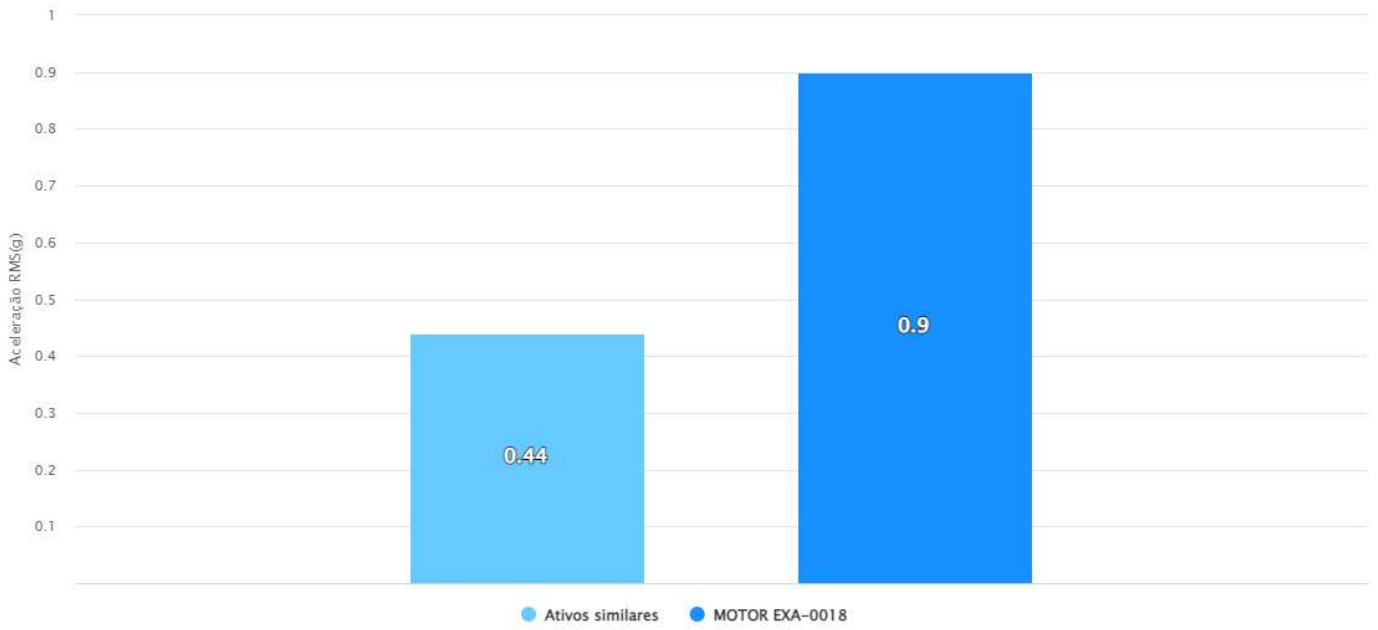
Ativo

	Nome EXA-0018 LINHAS INTEGRADAS 1 E 2 / MOTOR EXA-0018
	Modelo Motores Elétricos (Trifásico)
	Local EXAUSTÃO
	Tags N/A

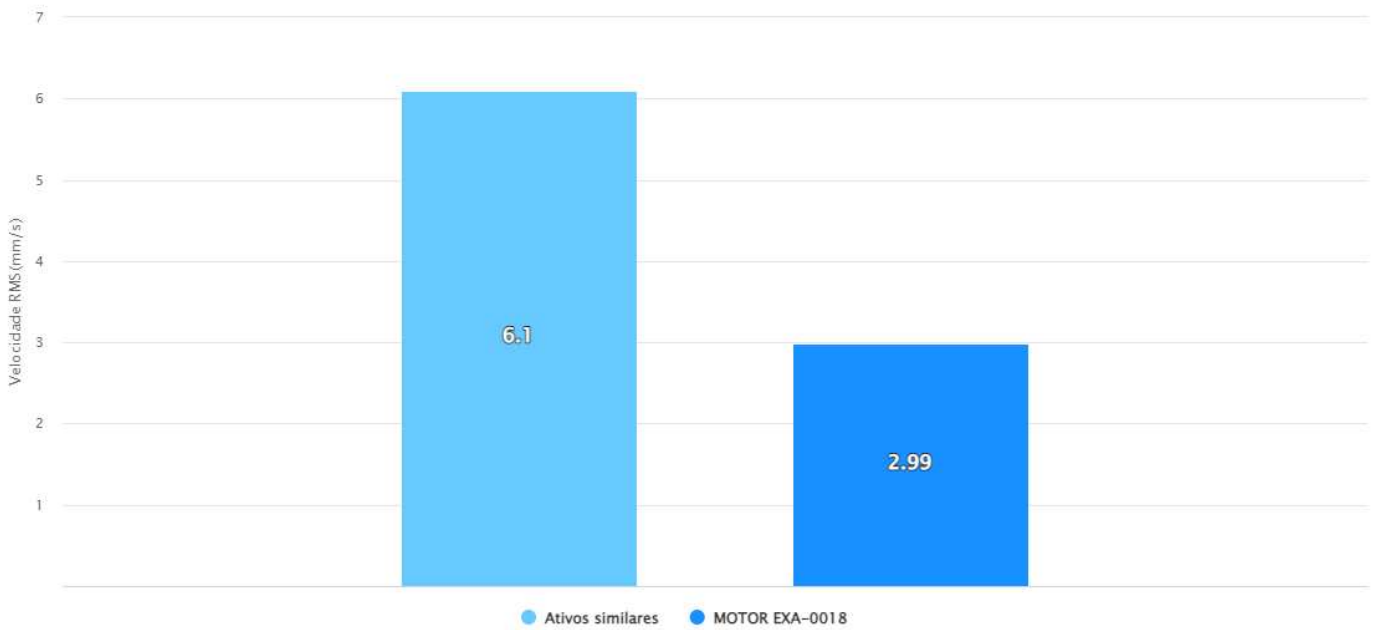
Análise



Aceleração RMS



Velocidade RMS



Histórico

- TRACTIAN Gerou um novo Insight de Relatório Inicial de Saúde

08/07/2023 19:26

Assinatura

____/____/____

Data

APÊNDICE C – RELATÓRIO INICIAL DE SAÚDE – EXA-0019

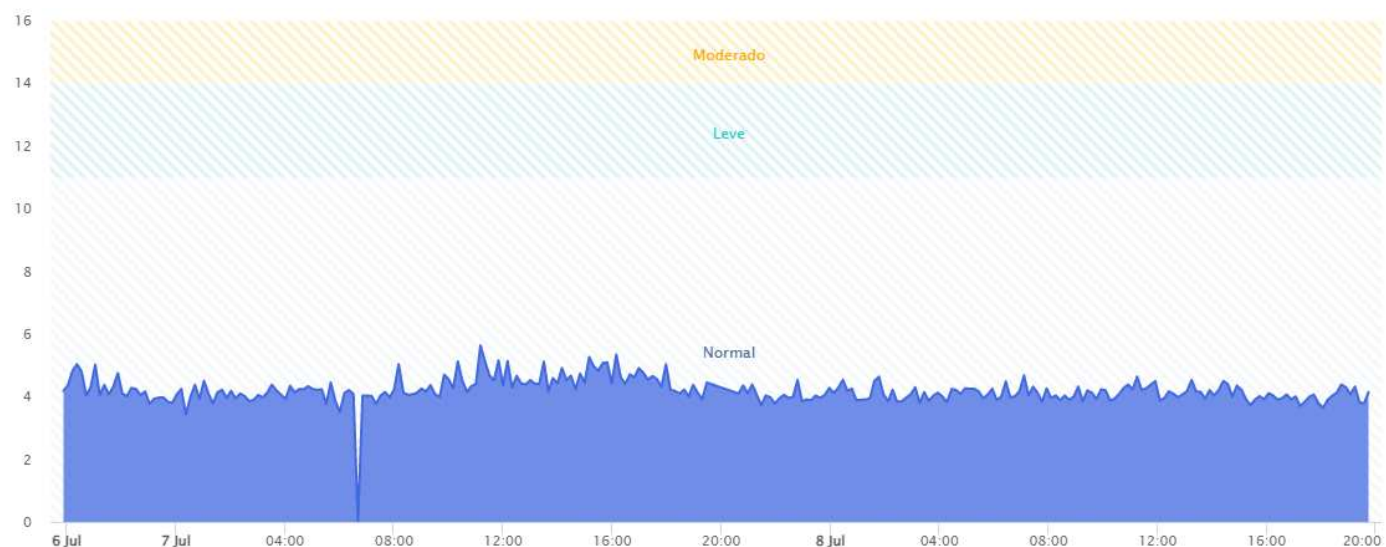
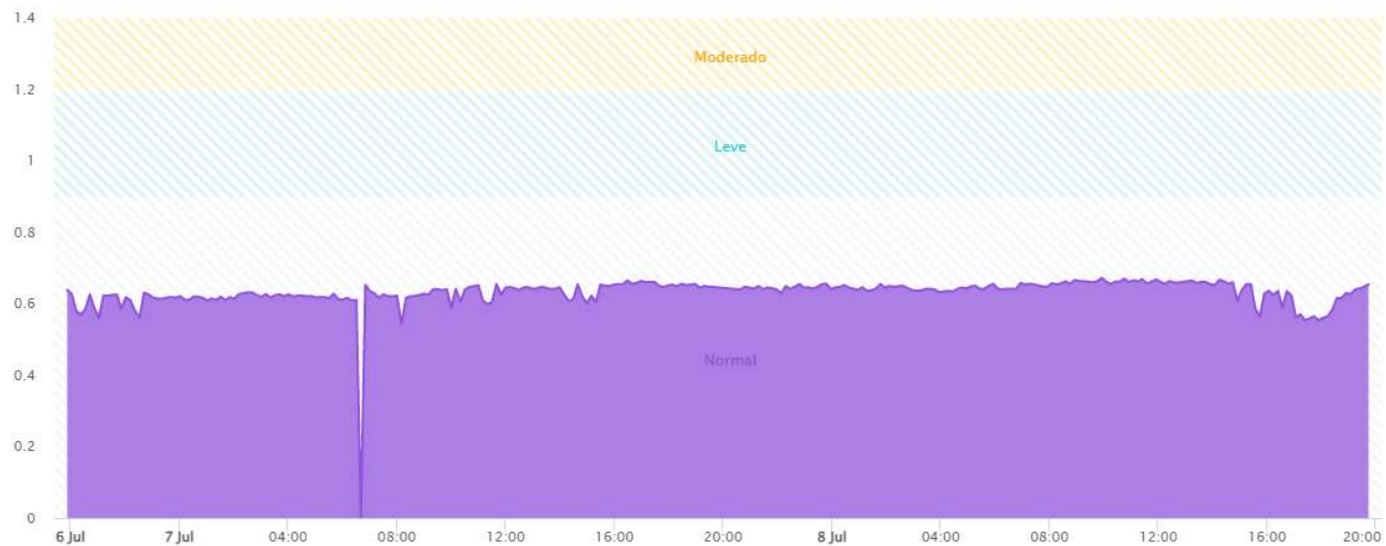
Data de Detecção 8 de Julho de 2023 às 19:44

Título Relatório Inicial de Saúde
Qualidade de Sinal Ruim (22%)

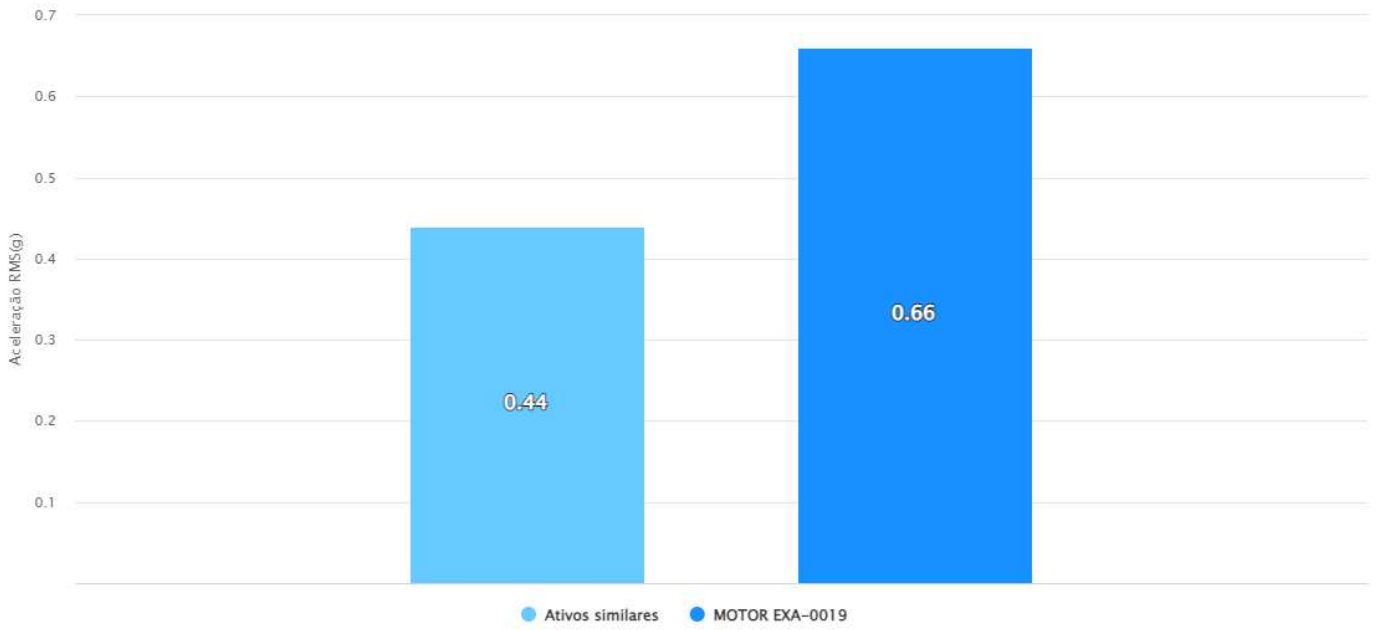
Ativo

	Nome EXA-0019 LINHAS INTEGRADAS 1, 2 E EXTRUSORA 2 / MOTOR EXA-0019
	Modelo Motores Elétricos (Trifásico)
	Local EXAUSTÃO
	Tags N/A

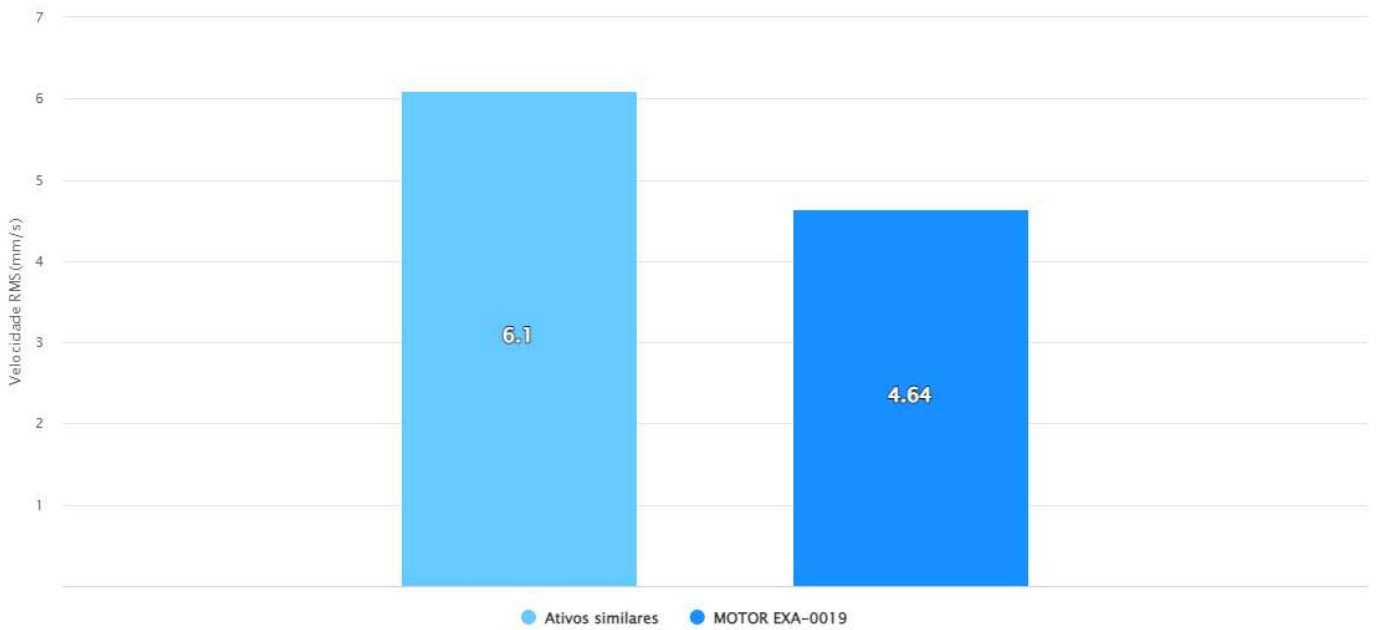
Análise



Aceleração RMS



Velocidade RMS



Histórico

- TRACTIAN Gerou um novo Insight de Relatório Inicial de Saúde

08/07/2023 19:44

Assinatura

____/____/____

Data