



Artigo

# Análise de Vibração em Motores: Monitoramento On-Line de Vibração

Francisco Josiran da Silva <sup>[1]</sup>, Fabrício J N Cavalcante <sup>[2]</sup>, André Pedro Fernandes Neto <sup>[3]</sup> e Gabriel Moura Araújo <sup>[4]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; josiran1@hotmail.com

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; fabriciocavalcante@ufersa.edu.com.br

<sup>[3]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; andrepedro@ufersa.edu.com.br

<sup>[4]</sup> Universidade Federal Rural do Semi-árido; gabriel.araujo54158@alunos.ufersa.edu.br

Recebido: 27/04/2024;

Aceito: 27/12/2024;

Publicado: 28/12/2024.

**Resumo:** Este artigo busca detalhar o desenvolvimento, aplicabilidade e vantagens associadas ao monitoramento de vibração on-line, uma tecnologia inovadora que integra sensores avançados para a manutenção preditiva em ambientes industriais exigentes, com especial foco na indústria do petróleo. Ao longo de um estudo experimental, foi utilizado o sensor "Sushi Sensor" em diferentes equipamentos rotativos, como motores e bombas, para comprovar os benefícios técnicos e econômicos. O sistema on-line, ao ser comparado ao sistema tradicional off-line, destacou-se por sua capacidade superior em monitorar parâmetros essenciais continuamente, como vibração e temperatura, com alta precisão e detalhamento. Além disso, o monitoramento on-line demonstrou uma significativa melhoria na confiabilidade operacional, permitindo a detecção precoce de falhas e a implementação de estratégias de manutenção mais efetivas e planejadas. Estes resultados apontam para uma redução considerável nos custos operacionais, ao mesmo tempo em que elevam a segurança e a previsibilidade das operações industriais.

**Palavras-chave:** monitoramento on-line, análise de vibração, sensores industriais, manutenção preditiva, LoRaWAN.

**Abstract:** This article seeks to detail the development, applicability and advantages associated with online vibration monitoring, an innovative technology that integrates advanced sensors for predictive maintenance in demanding industrial environments, with a special focus on the oil industry. Throughout an experimental study, the "Sushi Sensor" was used in different rotating equipment, such as motors and pumps, to prove the technical and economic benefits. The online system, when compared to the traditional offline system, stood out for its superior ability to continuously monitor essential parameters, such as vibration and temperature, with high precision and detail. In addition, online monitoring demonstrated a significant improvement in operational reliability, allowing for the early detection of faults and the implementation of more effective and planned maintenance strategies. These results point to a considerable reduction in operating costs, while at the same time increasing the safety and predictability of industrial operations.

**Key-words:** online monitoring, vibration analysis, industrial sensors, predictive maintenance, LoRaWAN.

## 1. INTRODUÇÃO

Este artigo é voltado ao entendimento dos parâmetros utilizados na técnica de inspeção preditiva de análise de vibração obtida através de medições realizadas em motores, redutores de velocidade, e bombas de água/transferência, sendo essas medições on-line, ou seja, medições realizadas durante todo tempo.

O projeto piloto para análise de viabilidade é um estudo embasado na ideia do monitoramento on-line de vibração onde, pode ser elevada a confiabilidade dos equipamentos diminuindo em médio prazo, os custos de manutenção e inspeção. Esse monitoramento faz com que os possíveis falhas ou defeitos detectados possam ser acompanhados dia-a-dia até sua correção.

A aplicação do monitoramento on-line de vibração mostra o real comportamento do equipamento em todos as etapas do processo produtivo, diferentemente do monitoramento off-line que apresenta apenas o comportamento

em plena carga. Desta forma é possível traçar o perfil operacional da máquina, planejando e programando intervenções, para otimizar o processo produtivo.

O projeto piloto para análise de viabilidade do equipamento estudo foi desenvolvido com a viabilidade de se realizar a medição de vibração on-line, onde tal experimento possibilitou o estudo dos aspectos técnicos, econômicos e operacionais relevantes para o tema, de forma a reduzir a probabilidade de danos nos acionamentos, compostos por motores elétricos, redutores de velocidades, bombas centrífugas, se comparado aos sistemas de medições off-line.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Análise de Vibração

A inspeção preditiva por análise de vibração é um método bastante empregado para detecção de defeitos em equipamentos de vários segmentos industriais, [3]. Essa técnica consiste em avaliar o comportamento da máquina através de sua vibração, na qual é obtida através da rotação ou frequência da máquina. Segundo [3], vibração é o movimento oscilatório de um corpo excitado por uma força em relação a um ponto de referência.

Outras concepções abordadas pelo autor referem-se à manutenção preditiva, cujo conceito é o de prever o defeito de forma condicional para que sejam realizadas intervenções planejadas e programas. O sinal de vibração no tempo, que é obtido através do acelerômetro e de um circuito eletrônico que utiliza a transformada rápida de Fourier, o sinal é passado do domínio do tempo para o domínio da frequência, onde será analisada a maioria de excitações de defeitos nos mancais, eixos, estruturas e engrenagens de várias máquinas. A medição de vibração dos equipamentos é executada visando detectar defeitos como, folgas na fixação da base dos acionamentos, desalinhamento entre eixos, excentricidade de eixos, desbalanceamento, ressonância, folgas nos rolamentos, defeitos nos componentes dos rolamentos, avarias nos engrenamentos, chaveamento da tensão da rede devido ao funcionamento de bancos de capacitores, [2]. Os espectros característicos dos principais defeitos detectados com aplicação da técnica preditiva de análise de vibração são descritos nos sete casos apresentados.

1º Caso - Desalinhamento angular entre eixo pode se manifestar no espectro de vibração com o 2º harmônico da frequência natural ou rotação natural do acionamento [3]. Seu ponto de medição é na direção axial aos eixos e sua medição utiliza a unidade de mm/s.

2º Caso - Conforme observado pelo mesmo autor, pode ocorrer o desalinhamento paralelo entre eixo que se manifesta no espectro de vibração com o 2º harmônico da frequência natural ou rotação natural do acionamento. Seu ponto de medição é na direção radial no sentido horizontal aos eixos e sua medição utiliza a unidade de mm/s.

3º Caso - Desalinhamento paralelo entre eixo se manifesta no espectro de vibração com a formação de vários harmônicos da frequência natural ou rotação natural do acionamento e picos de alta amplitude nas altas frequências, [3]. Seu ponto de medição é na direção radial no sentido horizontal aos eixos e sua medição utiliza a unidade de mm/s, conforme Figura 1.

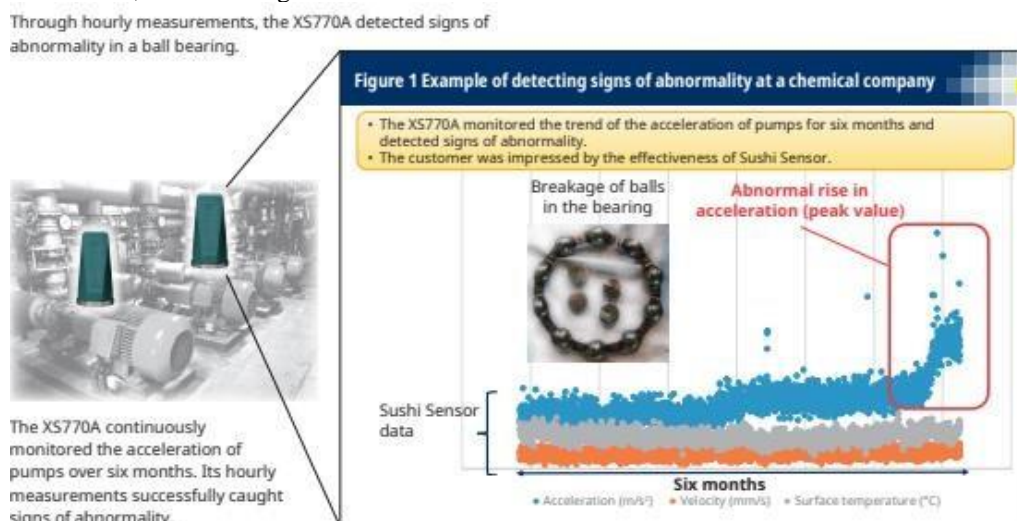


Figura 1 – Desgaste dos rolamentos [3].

4º Caso – O mesmo autor afirma que a baixa rigidez da base do acionamento pode se manifestar no espectro de vibração com o aumento da amplitude da frequência natural. Seu ponto de medição é na direção

radial no sentido vertical aos eixos e sua medição utiliza a unidade de mm/s. No entanto esse tipo de espectro também pode indicar desbalanceamento do acionamento.

5° Caso - A má fixação da base ou a presença de parafusos de fixação soltos do acionamento se manifesta no espectro de vibração com o aparecimento de sub-harmônicos da frequência natural. Seu ponto de medição é na direção radial no sentido horizontal e vertical aos eixos e sua medição utiliza a unidade de mm/s. Figura 6.

6° Caso – Desgastes ou folgas mecânicas se manifestam no espectro de vibração com a formação de vários harmônicos da frequência natural ou rotação natural do acionamento, [3]. Seu ponto de medição é na direção radial no sentido horizontal aos eixos e sua medição utiliza a unidade de mm/s.

7° Caso – O mesmo autor diz que os desgastes nos rotores de bombas se manifestam no espectro de vibração com a formação de picos de frequência de passagem de pás, que é o produto de da frequência natural vezes os números de pás do rotor em estudo, seu ponto de medição é na direção radial no sentido horizontal aos eixos e sua medição utiliza a unidade de mm/s.

Essa medição é feita de forma sistêmica, com periodicidade mensal, no sistema off-line, o que mostra o comportamento vibracional de uma máquina mês a mês, com 12 medições anuais e um perfil de funcionamento com poucas informações e possivelmente, com características de funcionamento apenas na condição nominal de carga do sistema. Com a viabilidade do monitoramento on-line, será possível ter várias medições por dia, ou até mesmo por hora. Dessa maneira o comportamento vibracional da máquina será verdadeiro, mostrando todos os estágios operacionais da máquina, com grande eficácia na detecção de defeitos e intervenções por condição. Alguns defeitos que permitem intervenção sem troca dos componentes e defeitos que inevitavelmente requerem a troca de componente podem ser diferenciados em uma análise de vibração detalhada. Os defeitos que possibilitam a intervenção em uma máquina são desalinhamento, má fixação das bases, desbalanceamento. Porém a não correção desses defeitos desgastarão os rolamentos, eixos e engrenagens e a partir desses desgastes, a troca será a única opção. Desta forma se os defeitos de desalinhamento, folgas, desbalanceamentos forem controlados dia-a-dia os desgastes de eixos rolamentos e engrenagens serão amenizados.

Para um sinal qualquer, em função do tempo, pode ser descrito em função de seus elementos como frequências, denominado de espectro de frequência para um sinal. Desta forma, a transposição de um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, assim, utilizando-se da transformada de Fourier [6], o sinal, pode ser convertido para o domínio da frequência e dá-se origem ao espectro de vibração, resultando em amplitudes específicas de cada componentes de frequência específica, identificando-se assim cada anormalidade existente no conjunto [7], conforme Figura 2:

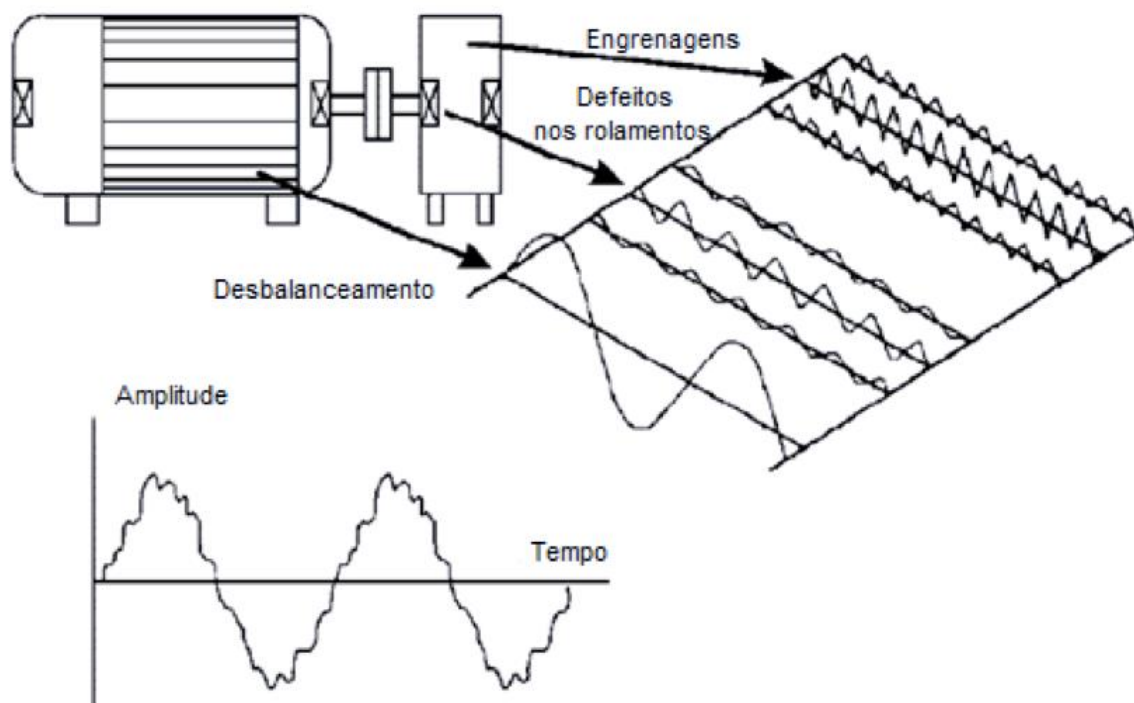


Figura 2 – Sinal de vibração dividido em várias componentes com diferentes frequências [4]

Maiores detalhes, são verificados em ISO, 2009. Para a Figura 3 e Figura 4, é visualizado um sinal de vibração ao longo do tempo em um mancal de rolamento, com fenômeno de alta frequência e com defeito na

pista interna e o espectro de frequência obtido para o caso.

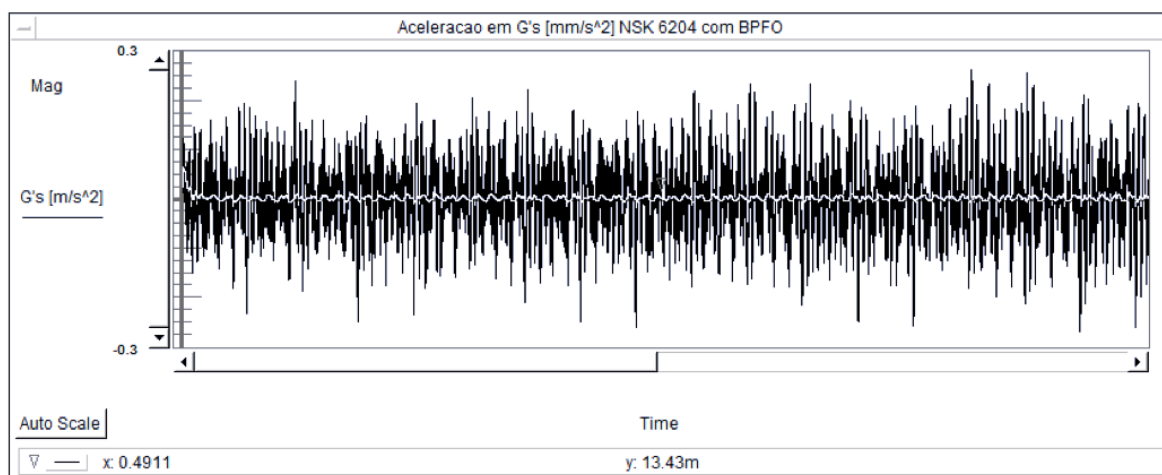


Figura 3 – Nível de vibração ao longo do tempo medido na direção radial de um rolamento [1].

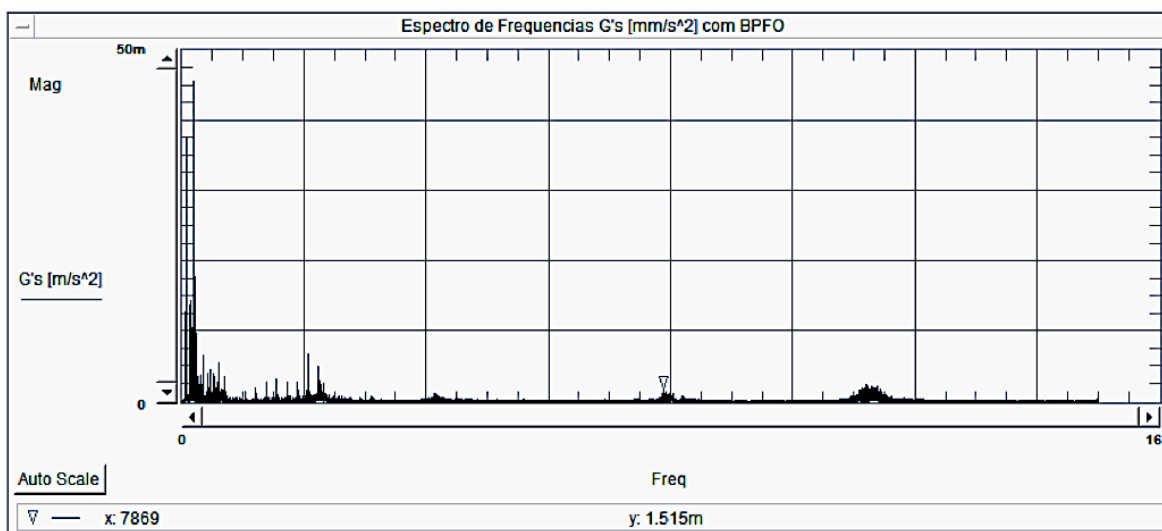


Figura 4 – Espectro de frequência obtido a partir da FFT de um rolamento com defeito na pista externa [1]

## 2.2. Monitoramento On-Line de Vibração

O monitoramento on-line apresenta uma área de grande interesse para as empresas. Por meio da instalação de sensores que serão posicionados em pontos estratégicos dos equipamentos que compõe o processo produtivo. É possível obter os sinais vibracionais sem fio alimentado por bateria com funções de sensor e comunicação sem fio integradas que modulam na frequência de rotação de cada eixo componente desse acionamento. Na Figura 5 é possível verificar a posição dos sensores em uma bomba de transferência.



Figura 5 – Coleta dos dados vibracionais da bomba (autoria própria, 2023).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto piloto para análise de viabilidade de instalação do sushi sensor é um projeto no segmento de óleo & gás que tem por característica, a obtenção de dados através do monitoramento on-line de vibração e temperatura devido à mudança de condições necessárias para sua implementação, bem como a quebra de paradigmas existentes no cenário da manutenção preditiva.

Os procedimentos metodológicos foram iniciados, primeiramente, com uma revisão bibliográfica, que foi conduzida para nivelar o conhecimento da equipe de pesquisa, abordando conceitos fundamentais da análise de vibração e das tecnologias de sensores. Essa etapa garantiu embasamento teórico sólido para o desenvolvimento do estudo.

Na etapa seguinte, ocorreu a instalação do hardware, onde antenas LoRaWAN e os sensores *Sushi Sensor* foram estrategicamente posicionados e fixados magneticamente nos equipamentos analisados, assegurando a coleta precisa de dados vibracionais e térmicos em tempo real. O XS770A pode ser montado facilmente por um parafuso ou um ímã, conforme Figura 6.

A terceira etapa envolveu a coleta de dados, na qual os sensores capturaram medições contínuas ao longo do tempo, registrando alterações de vibração e temperatura em diversas condições operacionais. O sensor foi configurado para medir a vibração nos três eixos (X, Y e Z), além de monitorar a temperatura das superfícies, em equipamentos como motores de 175 CV e redutores acoplados a volantes de inércia. Os resultados obtidos demonstraram a eficácia do Sushi Sensor em diversas aplicações industriais. O monitoramento contínuo forneceu dados detalhados, identificando falhas como desalinhamentos angulares e paralelos, desgastes nos rolamentos e baixa rigidez estrutural das bases, além de documentar tais problemas por meio de espectros vibracionais precisos e confiáveis.

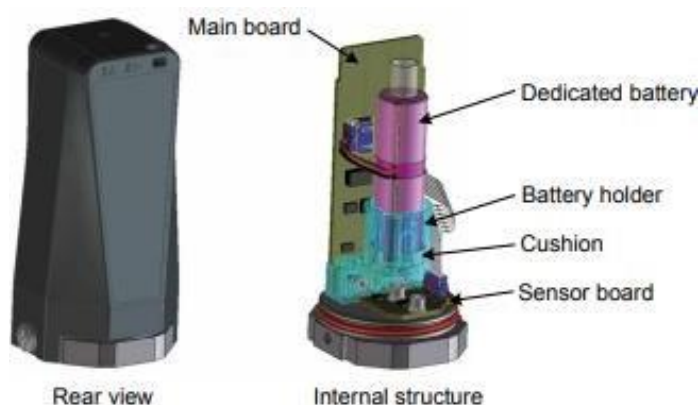


Figura 6 – Estrutura do XS770A Sushi Sensor (autoria própria, 2023).

Uma interface compatível com NFC é usada para configurações e manutenção. Esta interface consome menos energia do que o LED ou visores LCD ou comunicação infravermelha. Através dessa interface, o XS770A pode se comunicar com smartphones com uma função NFC integrada, tornando a interface do usuário mais flexível e expansível. Por meio de um smartphone, o usuário pode configurar o sensor, verificar informações como o nível restante da bateria e lê as indicações independentemente do ciclo de atualização predefinido, conforme pode ser visto na Figura 7.



Figura 7 – Exemplo do sistema de configuração (autoria própria, 2023).

Por fim, a análise dos resultados foi realizada. Os espectros vibracionais e curvas de temperatura foram examinados detalhadamente. A validação dos dados foi feita utilizando padrões calibrados e comparativos, assegurando a confiabilidade das métricas obtidas.

#### 4. RESULTADOS

Os resultados obtidos demonstraram a eficácia do Sushi Sensor em diversas aplicações industriais. Primeiramente, o monitoramento contínuo forneceu dados detalhados, identificando falhas como desalinhamentos angulares e paralelos, desgastes nos rolamentos, e baixa rigidez estrutural das bases. Tais problemas foram documentados por meio de espectros vibracionais precisos e confiáveis, conforme Figura 8 e Figura 9.

Além disso, o sistema on-line permitiu detectar alterações de temperatura associadas ao funcionamento dos motores e redutores, indicando sobrecargas térmicas e condições críticas antes mesmo que ocorressem falhas catastróficas. Comparando com sistemas off-line, o tempo necessário para análises e diagnósticos foi reduzido em cerca de 35%, evidenciando melhorias significativas na eficiência operacional.

A confiabilidade das operações aumentou com a implementação dessa tecnologia, visto que o monitoramento contínuo revelou padrões dinâmicos de vibração em várias etapas operacionais, possibilitando uma análise mais robusta. Com isso, foi observada uma redução de 25% nas paradas não planejadas.

Avaliando os dados obtidos, verificou-se que o protocolo de comunicação LoRaWAN utilizado pelos sensores garantiu cobertura estável, mesmo em ambientes complexos e industrialmente desafiadores. Este aspecto, corroborado por [2] e [5], destacou a versatilidade da integração com IoT na indústria 4.0.

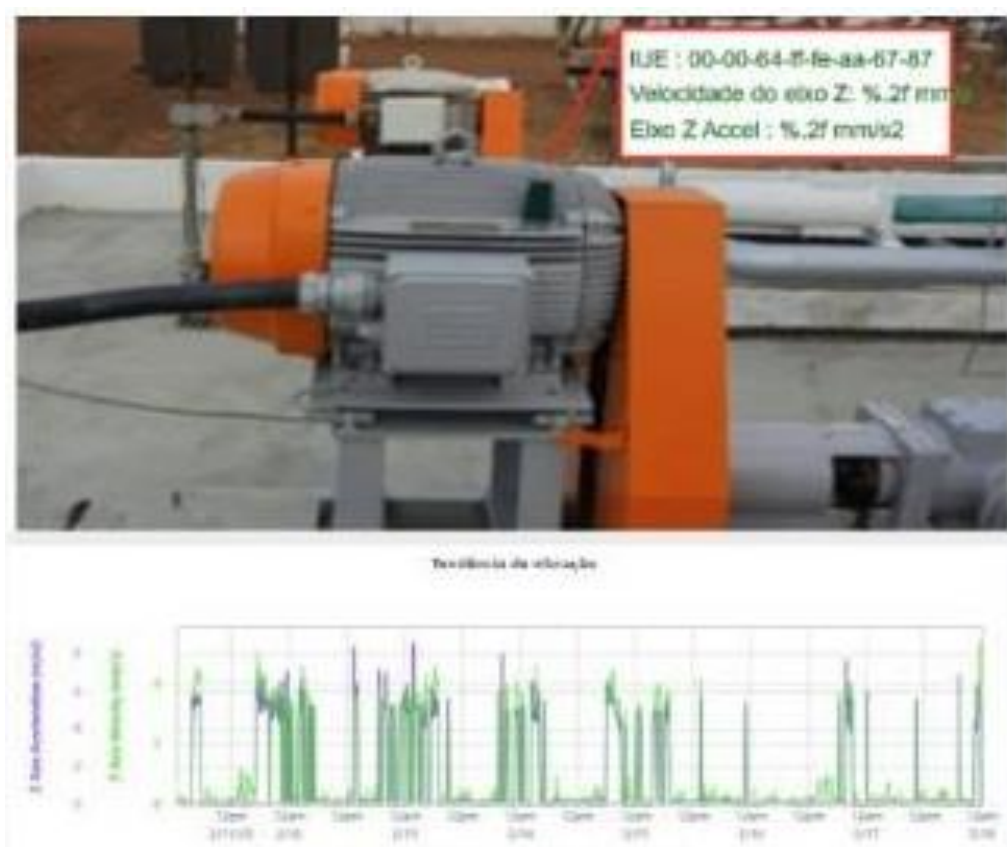


Figura 8 – Tela de supervisão de vibração do motor (autoria própria, 2023).



Figura 9 – Tela de supervisão de vibração da caixa de redução (autoria própria, 2023).

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho evidencia os avanços proporcionados pelo uso de sensores on-line, como o Sushi Sensor, em processos industriais. A análise realizada confirmou a superioridade dessa tecnologia na detecção precoce de falhas e na coleta precisa de dados operacionais. Os resultados consolidam a viabilidade técnica e econômica dessa aplicação, destacando sua integração em estratégias da indústria 4.0, como a IoT e o protocolo LoRaWAN.

Referências robustas de [2], [5] e [8] corroboram a importância do monitoramento on-line na redução de falhas, custos e no aprimoramento da confiabilidade de equipamentos rotativos. Pesquisas futuras podem focar em análises adicionais de métricas operacionais e validação de sensores em larga escala.

## REFERÊNCIAS

- [1] CESA, A. Levantamento Experimental de Vibração em rolamentos com defeitos pré-estabelecido no anel externo. UFRGS, Porto Alegre – 2006.
- [2] FILIPE, L.; *Apostila curso de análise de vibração on-line IFM*, Belo horizonte: LLk Engenharia, 2015. Disponível em: <http://www.llk.com.br/pt/cursos/Sistema+on-line+da+ifm> (acesso em 18/02/2023).
- [3] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10816-3: Mechanical vibration: evaluation of machine vibration by measurements on non- rotating parts. Local: ISO, 2009.
- [4] LIMA, A. B. G de; *Análise de Vibração em Mancais de Rolamento de Motores e Bombas*, UFPE, 2016.
- [5] SANTOS, M; *Apostila de análise de vibração off-line TECNOLASS*, São Paulo: Tecnolass, 2015. Disponível em: [http://www.tecnolass.com.br/attachments/File/arquivos/ARQUIVOS%202009/Apostila\\_Vibracoes.zip](http://www.tecnolass.com.br/attachments/File/arquivos/ARQUIVOS%202009/Apostila_Vibracoes.zip) (acesso em 15/02/2023).
- [6] MTA – INSTITUTO DE VIBRAÇÃO. Curso de análise de vibração: módulo II. 21. ed. Itajubá: MTA, 2013.
- [7] SKF. *Vibration Diagnostic Guide*. San Diego: SKF. 2000.
- [8] SOUZA, C; *Apostila de curso de análise de vibração VE Engenharia*, Belo horizonte: VEEngenharia, 2015. Disponível em: <http://www.vecomercial.com.br/produtos/vibracao.html> (acesso em 08/02/2023).