

# APLICABILIDADE DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM INSPEÇÕES PREDITIVAS PARA REDUÇÃO DE CUSTOS DE MANUTENÇÃO EM MOTORES ELÉTRICOS

Cristiano Henrique da Mata<sup>1</sup>  
Fábio Oliveira Gomes<sup>2</sup>  
João Carlos de Andrade Junior<sup>3</sup>

## RESUMO

A manutenção preditiva é uma ferramenta de gestão que visa prever a condição operacional dos equipamentos, permitindo diagnósticos e planejamentos de ações. Com o avanço tecnológico, essa técnica se fortalece, utilizando instrumentos que possibilitam avaliações confiáveis sem interromper os equipamentos. A análise de vibração é amplamente aplicada em equipamentos rotativos, especialmente motores elétricos, reduzindo falhas inesperadas, acidentes, custos de reparo e manutenções desnecessárias, além de aumentar a segurança industrial. Este estudo foca na aplicação da análise de vibração para reduzir custos de manutenção e aumentar a disponibilidade de motores elétricos monitorados. A pesquisa coletou dados em campo, utilizando o software AMS - Machinery Health Manager para coleta, armazenamento e análise. Com curvas de tendência e análise espectral, é possível prever o tempo necessário para intervenções planejadas, determinando o grau de deterioração dos componentes. Comparando motores monitorados e não monitorados, conclui-se que a análise de vibração proporciona resultados lucrativos em termos de tempo de parada, custo de manutenção, segurança e qualidade dos ativos.

**Palavras-chave:** manutenção preditiva, análise de vibração, motores, inspeções, equipamentos.

---

<sup>1</sup> Discente em Engenharia de Produção na UniDoctum. Email: cristianomata69@gmail.com

<sup>2</sup> Discente em Engenharia de Produção na UniDoctum. Email: fabiogomes.fo@gmail.com

<sup>3</sup> Discente em Engenharia de Produção na UniDoctum. Email: joacarlo\_jr@hotmail.com

## 1. INTRODUÇÃO

Como todo setor competitivo e estratégico dentro de uma instituição, a manutenção industrial tem enfrentado exigências e mudanças na forma de gestão e gerenciamento, a fim de suprir as necessidades impostas pelos processos de produção, otimizando maneiras de intervenção nos equipamentos, aumentando a disponibilidade dos ativos e reduzindo os custos de forma planejada, segura e com qualidade (KARDEC, 2014). Segundo Kardec (2014), como consequência, a manutenção preditiva ou manutenção sob condição é atualmente uma das ferramentas de gestão mais aplicadas, com o objetivo de prever a condição real de operação, possibilitando o diagnóstico e o planejamento da ação a ser tomada.

A análise de vibração é hoje uma das técnicas preditivas mais aplicadas em equipamentos rotativos, principalmente em motores elétricos que são largamente utilizados nos acionamentos dos conjuntos mecânicos em plantas industriais, reduzindo de forma significativa o número de falhas inesperadas, acidentes consequentes de quebras, elevados custos de reparo, manutenções desnecessárias e proporcionando maior segurança ao processo industrial (BRITO, 2013).

A indústria e a manutenção vivem um período em que custos frequentes e desnecessários, falhas inesperadas, riscos ambientais e de segurança, tendem a ser cada vez mais reduzidos a fim de que a instituição se mantenha competitiva no cenário atual, minimizando desperdícios, reduzindo custos com sobressalentes, acidentes operacionais consequentes de quebras em equipamentos, ganhando em segurança, qualidade social e ambiental (KARDEC, 2014). Segundo Kardec (2014), os custos com a manutenção representam a parte principal dos custos operacionais em uma empresa, sendo um terço desperdiçado como consequência de intervenções desnecessárias e inadequadas.

O acompanhamento e a análise de vibração desempenham papéis importantes nas plantas industriais, pois atuam diretamente na detecção de defeitos ainda em fase de desenvolvimento. Isso para que sejam prevenidas falhas com base em parâmetros de condição de operação. Por meio do planejamento e avaliação, avalia-se o momento e a necessidade de atuar em uma manutenção corretiva planejada, evitando paradas e outras anormalidades nas linhas de produção. Assim, todas essas atividades são executadas intervindo o mínimo na planta, ganhar em planejamento, disponibilidade e qualidade (BRITO, 2013).

Este estudo analisa as vantagens e desvantagens da aplicação técnica de manutenção preditiva, utilizada pelas indústrias no monitoramento de máquinas rotativas, com destaque para o motor elétrico. Limita-se a abordar com detalhe apenas a técnica de análise de vibração na detecção de falhas prematuras em motores elétricos, com destaque para falhas mecânicas e analisa custos específicos envolvidos no reparo do equipamento, não abordando custos totais relacionados a perdas de produção e outros custos envolvidos. Apresentam-se nas seções seguintes os objetivos gerais e específicos deste trabalho (Capítulo 2), Marco teórico (Capítulo 3), Metodologia (Capítulo 4), Considerações finais (Capítulo 5) e Referências.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

A manutenção preditiva é essencialmente realizada no momento exato necessário, conforme destacado por Kardec (2014), com base na alteração dos parâmetros de condição de operação do equipamento, seguindo uma sistemática e resultando em uma manutenção corretiva planejada. Com o grande crescimento e desenvolvimento tecnológico, essa técnica ganha força e credibilidade com o surgimento de instrumentos que possibilitam avaliações e diagnósticos confiáveis das instalações e sistemas, priorizando a disponibilidade dos ativos, sem a necessidade de interrupção dos equipamentos para realização de medições e inspeções.

A aplicação do monitoramento preditivo deve contemplar os componentes que permitem a aplicação da técnica, levando em consideração as necessidades em relação aos custos, ao papel técnico no processo de produção e à segurança pessoal e operacional, reduzindo significativamente o número de acidentes por falhas catastróficas, paradas inesperadas e custos elevados e desnecessários de manutenção.

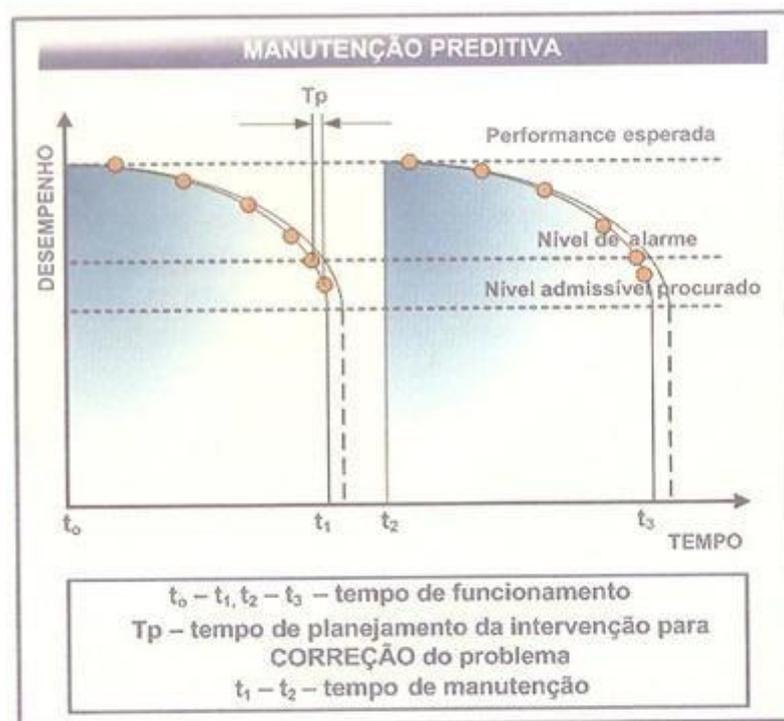
Essas técnicas incluem análise de vibração, análise de espectro de corrente, ultrassom, termografia e outras ferramentas que auxiliam na detecção e distinção de anomalias em tempo hábil para planejamento de intervenção. É considerada uma atividade produtiva e a principal técnica para levantamento de parâmetros para ação de manutenção preventiva ou corretiva planejada nos equipamentos (BRITO, 2013).

A manutenção preditiva é definida como o ato de predizer - ou prevenir - as falhas nos equipamentos por meio do acompanhamento de multiparâmetros,

priorizando a disponibilidade e realizando intervenções nos equipamentos em operação. Consiste na técnica de monitoramento de tendências e modos de falha de um equipamento, com análise e monitoramento de parâmetros indicativos de sua condição, visando à antecipação das falhas nos equipamentos (KARDEC, 2014).

Alguns parâmetros devem ser observados, como pressão, vibração, vazão, ruídos, vazamentos, desgastes e corrosão. No Gráfico 1, pode-se observar a curva da manutenção preditiva.

**Figura 1** – Curva da manutenção preditiva em relação ao tempo de planejamento da intervenção



Fonte: Kardec (2014)

Ao analisar a Figura 1, é possível observar a curva da manutenção preditiva em relação ao tempo de planejamento da intervenção para correção do problema e o desempenho desejado.

O Quadro 1 a seguir, sintetiza os objetivos e as vantagens da manutenção preditiva Segundo Kardec (2014), bem como os erros mais comuns cometidos na aplicação desta técnica:

## Quadro 1: Objetivos, Vantagens e erros comuns na manutenção preditiva

Objetivos	Vantagens	Erros comuns
a) Minimizar o número de manutenção preventiva ou corretiva, de forma técnica, planejada e objetiva, por meio de monitoramento de parâmetros, com o uso de instrumentação adequados para as atividades;	a) Intervenção es corretivas programadas com menor custo e perdas de produção;	
b) Intervir no equipamento no momento exato, diminuindo as intervenções e aumentando a disponibilidade dos ativos com menor custo e estabelecer parâmetros preventivos;	b) Equipamentos e máquinas mantidos operando dentro de faixas de conformidades e parâmetros recomendados;	a) Testar técnicas em equipamentos com baixa taxa de falhas. Corre-se o risco da verba para o estudo acabar e não ter ocorrido algum problema possível de detecção;
c) É considerada como atividade produtiva e a principal técnica para levantamentos de parâmetros para ação de manutenção preventiva ou corretiva planejada nos equipamentos;	c) Diminui ou até elimina a necessidade de equipamentos reservas e estoque de componentes sobressalentes;	b) Sobrecarregar a equipe de preditiva antes que ela esteja realmente preparada;
d) Estrutura e procedimentos do monitoramento preditivo;	d) Oferece dados seguros sobre a frequência e modo de falhas e modo das falhas e dos componentes envolvidos, dando margem para um melhor dimensionamento do almoxarifado e da política de materiais e sobressalentes;	c) Escolher a frequência de amostragem financeiramente, desconsiderando-se que para cada tipo de máquina ou aplicação, a velocidade de progressão de defeitos é diferente;
e) Escolha dos equipamentos a serem monitorados;	e) Incentiva e fornece dados para a procura de fornecedores de peças e componentes de melhor qualidade;	d) Escolher técnicas "baratas" sem verificar qual a taxa de erro;
f) Determinação dos parâmetros e quadro de variação;	f) Conhecimento por parte da operação da situação das máquinas e equipamentos, passando a se envolver e participar da manutenção, reduzindo "as surpresas" e as consequências de reparos urgentes com baixa qualidade;	e) Esperar que uma técnica fosse aplicável para qualquer situação;
g) Escolha da metodologia e instrumentação adequadas;	g) De maneira geral, a introdução da manutenção preditiva tem proporcionado uma redução de 15% a 20% do custo, quando comparada com a manutenção clássica;	f) Não auditar as várias fases do processo – incluindo-se aqui o treinamento de conscientização do 'cliente' final - a operação;
h) Utilização de sistemas avançados de planejamento, programação e controle da manutenção.	h) Detecta defeitos intermediários e orientar a tomada de decisão e ações, antes que o processo degenerativo conduza o equipamento a uma falha.	g) Sonegar informações para os analistas – últimas ocorrências e/ou intervenções alterações no processo produtivo etc.;
i) Coleta de dados para observação e detecção do defeito em desenvolvimento com equipamento em funcionamento;		h) Medir, medir e não analisar nem diagnosticar;
j) Mínima interferência no processo produtivo;		i) Possuir gerentes que não conhecem técnicas preditivas;
k) Coleta dos dados que possibilitem diagnóstico;		j) Não acompanhar a evolução das técnicas e dos instrumento.
l) Análise da tendência;		
m) Registros sistemáticos dos parâmetros selecionados;		
n) Utilização de metodologia e instrumentação de monitorações adequadas para detectar o que muda, isto é, a causa e efeitos dos defeitos intermediários;		
o) Criar históricos técnicos e referências dos equipamentos produtivos que necessitam de manutenção preditiva, estabelecer parâmetros a serem acompanhados;		
p) Bancos de dados completos, com informações de ocorrências de defeito ou falha e os componentes envolvidos. Softwares e equipe de predição e análise de tendências.		

Fonte: Os autores (2024)

Ocorre que a escolha da técnica ou modalidade de manutenção a ser aplicada em determinada planta industrial depende diretamente do departamento gerencial. Considera-se que o planejamento é a fase mais importante em um projeto de monitoramento preditivo de equipamentos.

## **2.1 Técnicas de monitoramento**

A manutenção preditiva representa a primeira grande quebra de paradigma entre as técnicas de manutenção, sendo vista como uma ferramenta estratégica do ponto de vista empresarial. Indica a necessidade de intervenção com base no estado de degradação do componente, mediante o acompanhamento da condição do equipamento, conforme destacado por (KARDEC, 2014). Dentro desse contexto, existe uma classificação para as técnicas de monitoramento, as quais serão descritas a seguir.

### **2.1.1 Monitoramento subjetivo**

O monitoramento subjetivo (inspeção) envolve acompanhar a situação real do equipamento utilizando os sentidos humanos (tato, olfato, audição e visão), o que permite perceber níveis e oscilações de temperatura e vibração. Esses procedimentos contribuem para a monitoração da condição do equipamento, especialmente quando realizados por profissionais de manutenção mais experientes.

### **2.1.2 Monitoramento objetivo**

O monitoramento objetivo e o monitoramento utilizando instrumentos específicos fornecem um valor de medição do parâmetro que está sendo acompanhado e o valor medido independe do operador do instrumento, sendo procedimento realizados sob as 'mesmas condições'.

É necessário mão de obra capacitada para a operação dos instrumentos, instrumentos aferidos e calibrados e uma equipe de análise estruturada.

### **2.1.3 Monitoramento contínuo**

O monitoramento contínuo, segundo Kardec (2014), é implantada em condições em que o tempo de desenvolvimento do defeito é curto e em equipamentos de alta criticidade. É representada por dispositivos que alarma e desliga o equipamento, uma vez atingido o valor limite estipulado. Esse recurso é cada vez mais comum com desenvolvimento da eletrônica e de sistemas digitais, permitindo a utilização de sistemas de monitoração on-line e à distância.

As vantagens de acordo com Kardec (2014) são:

- a) Independe do profissional;
- b) Pode enviar os dados em tempo real (on-line) para as unidades lógicas de processamento ou computadores com programas especialistas;
- c) Pode ser configurada de acordo com as necessidades, fornecendo redundância onde se exija alta confiabilidade e saídas para acoplamento de instrumentos e processadores visando análises mais aprofundadas;
- d) Alguns fenômenos, particularmente na área de equipamentos rotativos, somente podem ser detectados pelo acompanhamento permanente de determinadas variáveis;
- e) Alguns dados só podem ser levantados em situação de parada ou partida das máquinas, por serem muito rápidos ou por ocorrerem em horários e condições que inviabilizam o levantamento manual de dados;
- f) A existência de sistemas de monitoração é fator de economia em relação a prêmios de seguros e tempo de parada.

## **2.2 Custos com manutenção**

Para Filho (2010), o conceito de custo deve ser desprendido para se obter, fabricar e ter a posse de usar algo. Os gastos efetuados com um item ou bem para ser utilizado na produção de outro item ou bem.

Os custos podem ser classificados e definidos segundo Filho (2010) como:

Custos direto de manutenção - CDRI é o total despendido em manutenção de itens que deve ser apontado em cada reparo ou ordem de serviço. Inclui-se custos

com mão de obra, custo de matérias sobressalentes e outras despesas incluídas no contexto.

$$\text{CDRI} = (\text{Custo de homem} \times \text{Hora}) + \text{Material} + \text{Sobressalentes} + \text{etc. apontados na OS}$$

Custo distribuído de manutenção é o custo e rateado entre todas as divisões. Em outros sistemas de custo e conhecido como custo de manutenção de outras divisões que não a divisão executante. Normalmente utilizada em administração de manutenção mista.

Custo indireto de manutenção – CIND é o total despendido pela manutenção para atender a todos os seus clientes e que não são apontados como gastos em ordem de serviço. Incluem-se os custos administrativo, treinamentos e ferramentaria.

$$\text{CIND} = (\text{Custo de supervisão} + \text{administrativos} + \text{etc. rateados})$$

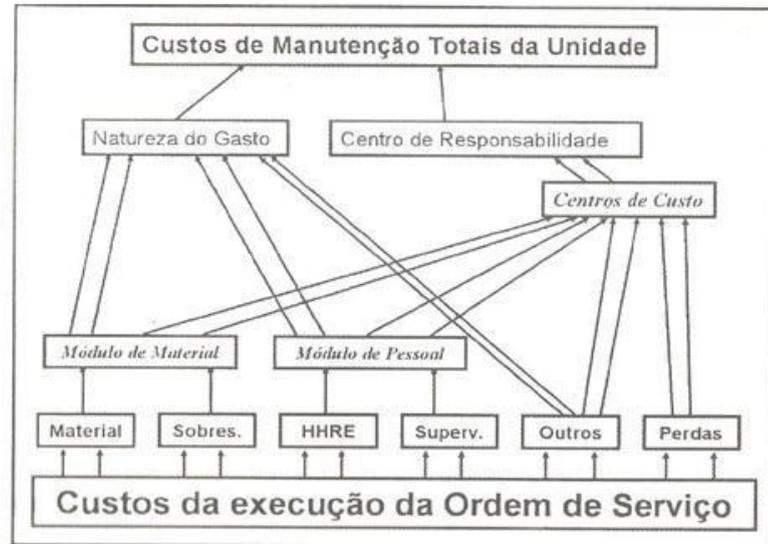
Custos de manutenção próprio é o custo indireto mais os custos diretos com manutenção.

Custo total de manutenção - CMNT é o total despendido para manter um item dentro de suas especificações aceitáveis para que possa cumprir a função. E utilizado para a apuração final consolidada de toda a unidade industrial.

$$\text{CMNT} = \text{CDRI} + \text{CIND}$$

A Figura 2 mostra quais caminhos seguir de acordo com os custos de manutenção total da unidade e os custos de execução da ordem de serviço

**Figura 2** – Diagrama de custo de execuções das ordens de serviço



Fonte: Filho (2010).

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo geral

Desenvolver um estudo sobre a aplicação da técnica de manutenção preditiva (Análise de vibração) na redução de custos de manutenção de reparo e aumento da disponibilidade de motores elétricos monitorados.

#### 3.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar as condições e necessidade de atuar de forma preditiva na manutenção de motores de indução;
- b) Demonstrar os métodos e procedimentos da técnica de monitoramento por análise de vibração em equipamentos rotativos (com ênfase em motores elétricos) nas plantas industriais;
- c) Identificar ganhos no tipo de manutenção aplicada e custo envolvidos em um motor monitorado por análise de vibração.

## **4 METODOLOGIA**

A metodologia do projeto de TCC abarca diversas dimensões de pesquisa, que podem ser elucidadas através da classificação proposta por Menezes (2005). Quanto à sua natureza, a pesquisa pode ser aplicada, direcionada à solução de problemas práticos, ou básica, voltada para a ampliação do conhecimento teórico. No que tange à forma de abordagem, destacam-se as abordagens quantitativa e qualitativa, cada uma oferecendo perspectivas distintas na análise dos fenômenos em estudo.

No delineamento dos objetivos da pesquisa, adotam-se as categorias exploratória, para investigações iniciais e amplas; descritiva, para caracterização de fenômenos; e explicativa, com foco na identificação dos fatores causais e na compreensão do porquê dos eventos, conforme argumentado por Gil (2008). Esta última, em especial, é comumente embasada em pesquisas experimentais e ex post facto.

Gil (2008) destaca a importância da pesquisa bibliográfica como fundamento essencial em qualquer modalidade de pesquisa, pois toda informação publicada, seja em formato impresso ou virtual, torna-se fonte de consulta para o desenvolvimento do estudo.

A pesquisa experimental, por sua vez, fundamenta-se na realização de experimentos para testar e validar hipóteses, visando gerar resultados práticos aplicáveis à sociedade.

Por fim, a pesquisa ex post facto lida com hipóteses abduativas, analisando eventos passados sem a possibilidade de intervenção direta do pesquisador. Nesse contexto, o investigador se dedica à identificação das causas e à análise das relações entre variáveis, como pontuado por Gil (2008).

### **4.1 Métodos de inspeção e coleta de dados**

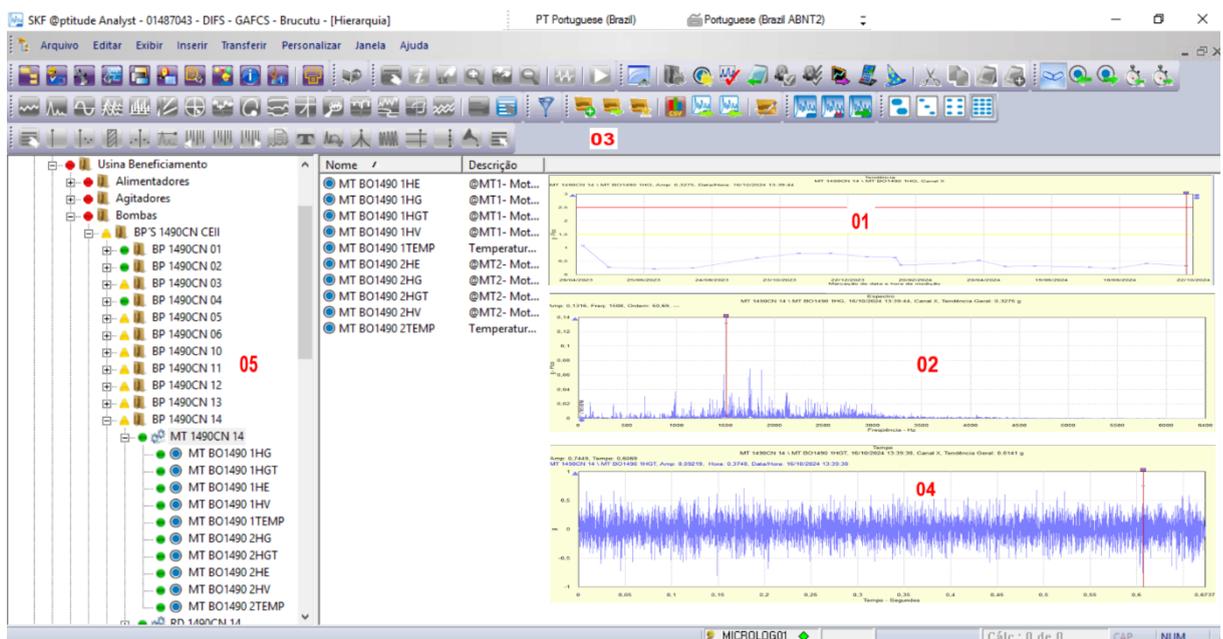
A pesquisa foi realizada por captura de dados coletados em campo embasado no plano sistemático de manutenção, que é determinado devido a criticidade do ativo para o processo de mineração, com base nos dados coletados, realizando uma análise para identificar a condição do ativo. Para esta análise pode-se realizar de

formas variadas utilizando as ferramentas do sistema especialista para acompanhamento das atividades com o passo a passo e para análise dos dados.

## 5 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Para realizar as atividades de coleta, armazenamento e análise de dados, foram utilizados as seguintes ferramentas, como demonstrado nas figuras abaixo:

**Figura 3 - Print Screen do software @ptitude Analyst - SKF**



Fonte: Os autores (2024)

A estrutura do software pode ser dividida através da numeração e divisão na figura 3. O número 01 representa o gráfico de tendência; o número 02 representa o espectro de frequência (Hz) x amplitude (mm/ s ou G's); o número 03 representa a coluna de ferramentas; o número 04, a forma de onda (sec) e por fim, o número 05 representa a árvore do banco de dados.

As ferramentas de coleta de dados podem ser divididas também através da numeração da figura 4.

**Figura 4 – Coletor de dados SKF- AX80**



Fonte: Os autores (2024)

O número 01 representa o coletor de dados; o número 02 a alça do equipamento; o número 3, o cabo espiral e o número 04 acelerômetros - Modelo CMSS2200.

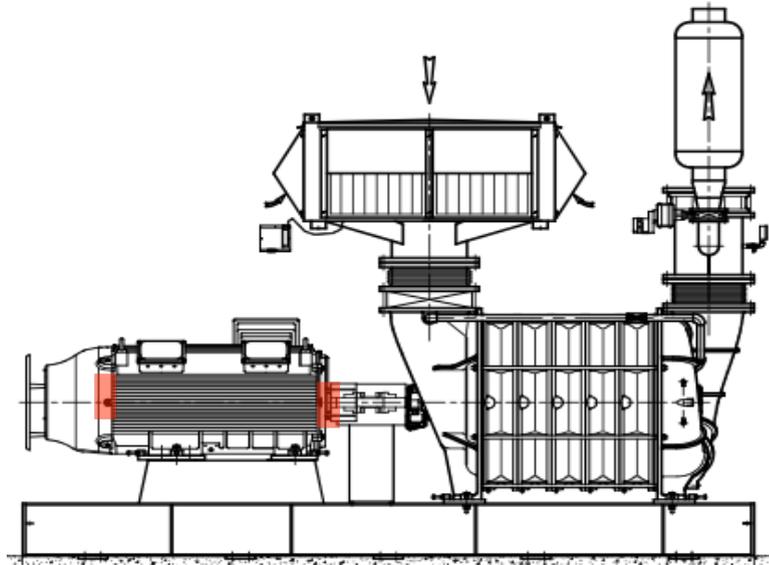
### **5.1 Situação Analisada**

Em uma usina de beneficiamento de minério de ferro, os conjuntos eletromecânicos de acionamento das máquinas são monitorados via manutenção preditiva com destaque para a técnica de análise de vibração.

Um soprador de ar composto por motor acoplado a um mancal de rolamento, com alimentação alternada por meio de inversores de frequência e operação em faixas variadas de rotação, começou a apresentar em análise de vibração por meio de espectros de aceleração a elevação dos níveis globais no mancal acoplado do motor WEG (400L A/B), com indicação inicial de defeito nos elementos rolantes (BSF) e deficiência na lubrificação do rolamento LA (6315 C3), em um período de tempo curto, apresentou aumento significativo do nível global de aceleração, com frequências características de defeito na pista externa (BPFO) bem definidas.

Na figura 5, pode-se observar o desenho esquemático da estrutura operacional do motor monitorado com identificação dos pontos de medição.

**Figura 5 – Desenho 2D do equipamento monitorado**

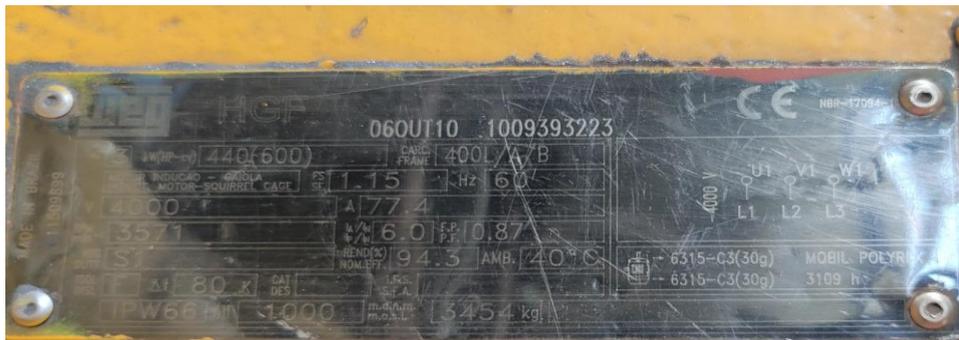


Fonte: Os autores (2024)

Os pontos numerados na figura 05 são respectivamente o motor lado acoplado LA – Rolamento (6315 C3) e motor lado oposto acoplado LOA – Rolamento (6315 C3).

A figura 6 é referente a placa de identificação do motor, contendo os dados técnico.

**Figura 6 – Placa de identificação do motor WEG**



Fonte: Os autores (2024)

Como pode-se observar na figura 6 é possível identificar o número da carcaça, a potência e outras variáveis que influenciam no monitoramento do mesmo. Já a figura 7 representa a perspectiva da estrutura física externa do motor da WEG 400L A/B também monitorado.

**Figura 7 – Estrutura física do motor de indução**



Fonte: Os autores (2024)

Após análise da condição de operação do motor, foi repassado a engenharia de manutenção o diagnóstico e estágio do defeito, a fim de programar intervenção para substituição do motor para reparo externo, por meio de uma oficina de reparo, atuando de forma preditiva.

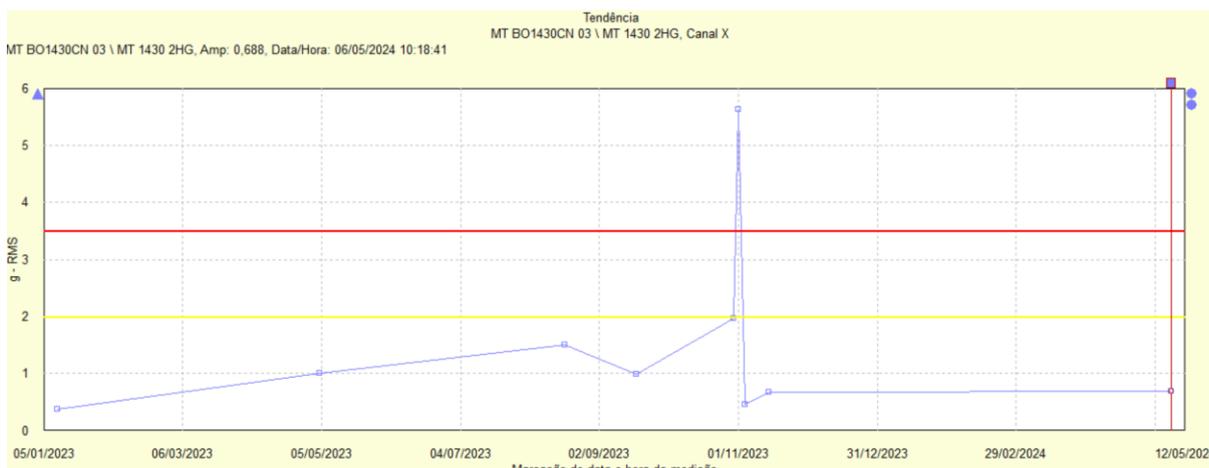
O estudo abrange o monitoramento do equipamento no período de 01/2023 a 03/2024, como demonstrado através de espectros e gráficos de tendências nas etapas datadas abaixo:

**Figura 8 – Gráfico de tendência 01 (software @ptitude Analyst - SKF)**



Fonte: Os autores (2024)

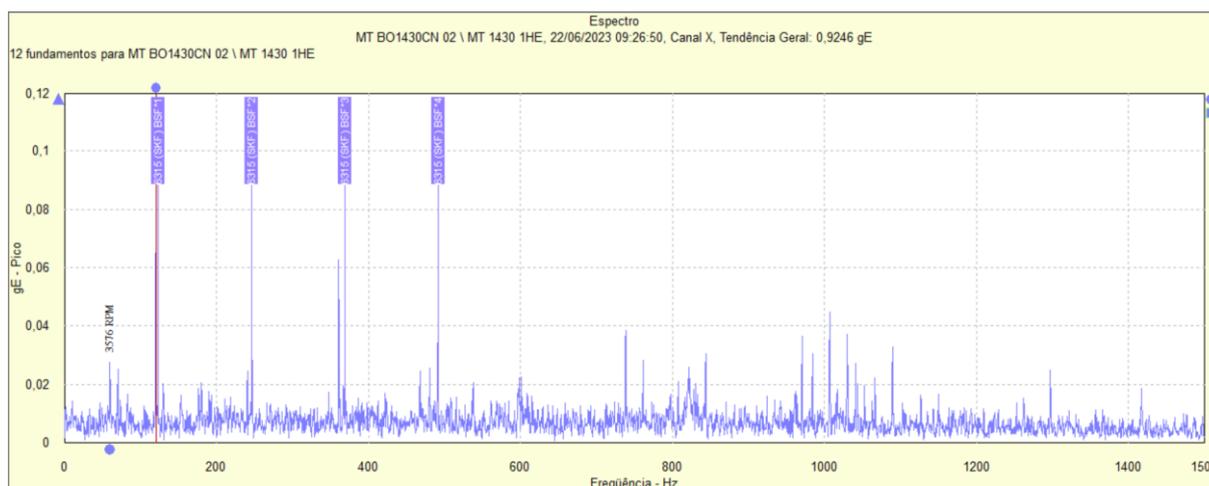
**Figura 9** – Gráfico de tendência 02 (software @ptitude Analyst - SKF)



Fonte: Os autores (2024)

A Figura 9, exibe as oscilações dos níveis globais de aceleração (G's), referente ao mancal LA do motor, no período de 05/01/2023 à 12/05/2024. Nota-se uma oscilação significativa da amplitude nos níveis globais de aceleração ao longo do período de monitoramento e queda após intervenção (substituição do motor para reparo), apresentando condições satisfatórias de operação no novo motor em operação. Os valores de aceleração referente ao período 05/01/2023 à 12/05/2024 são respectivamente: 0,3721 G's e 0,688 G's.

**Figura 10** – Espectro de frequências 01 (software @ptitude Analyst - SKF)

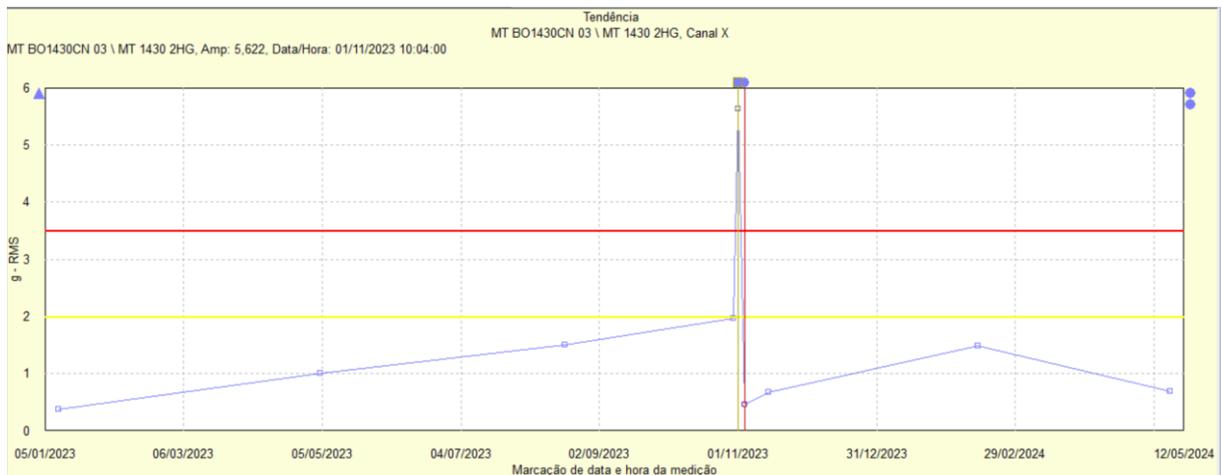


Fonte: Os autores (2024)

O espectro representado na Figura 10 é referente à data do dia 22/06/2023, com o motor operando a 59,5 Hz (3570 rpm), com frequências características de início



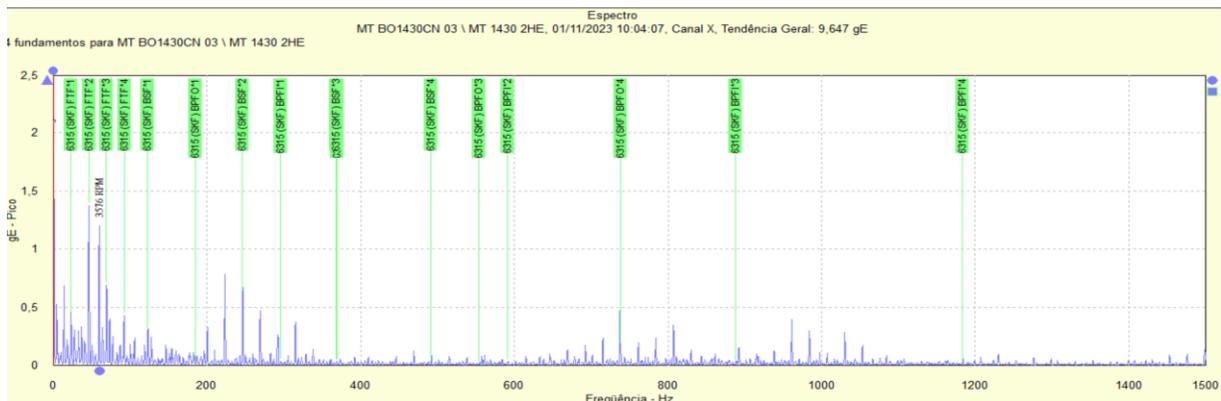
**Figura 13** – Gráfico de tendência 03 (software @ptitude Analyst - SKF)



Fonte: Os autores (2024)

A Figura 13, apresenta maior nível global de aceleração (G's), no mancal LA do motor, em 01/11/2023, ultrapassando os níveis de alarme aceitáveis, seguido de queda na medição do dia 04/11/2023, devido ao agravamento da anomalia, as frequências de defeito migram de alta para baixa frequência aparecendo em espectros em velocidade convencional (mm/s). Os valores de aceleração referente ao período 01/11/2023 à 04/11/2023 são respectivamente: 5,622 G's e 0,448 G's.

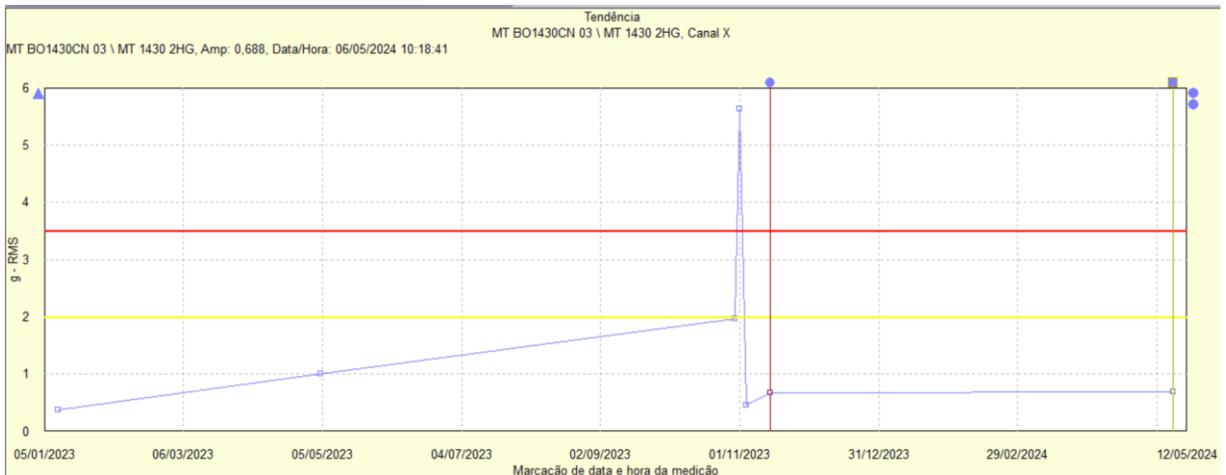
**Figura 14** – Espectro de frequências 04 (software @ptitude Analyst - SKF)



Fonte: Os autores (2024)

O espectro de aceleração (G's) da Figura 14, refere-se à data do dia 01/11/2023, com o motor operando a 59,5 Hz (3570 rpm), com frequências características de defeito na pista externa BPF0 (184,7 Hz), elementos rolantes BSF (123,3 Hz) e na gaiola FTF (22,97) bem definidas e em alta amplitude seguido de bandas laterais e em alta amplitude.

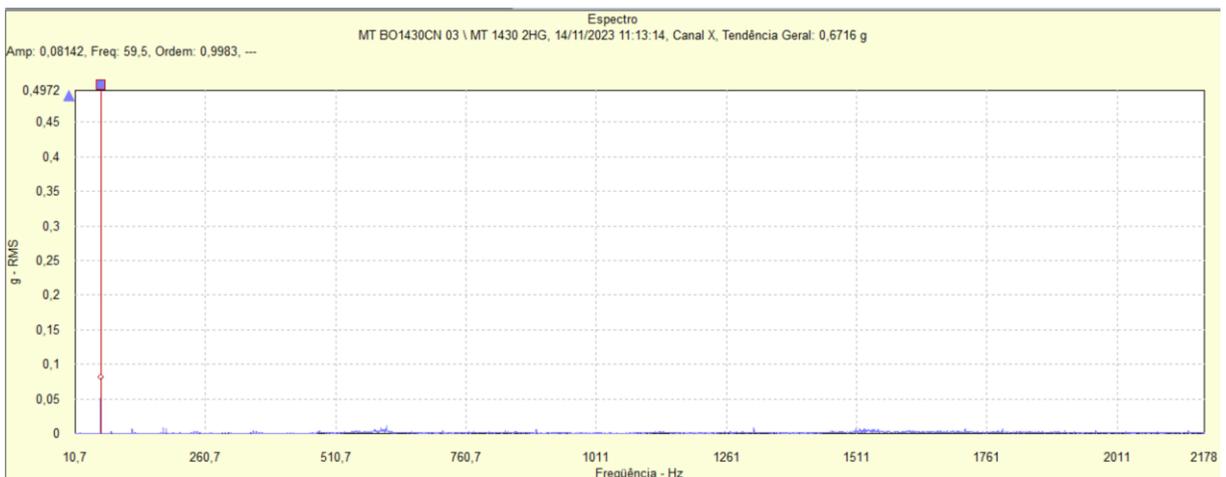
**Figura 15 - Gráfico de tendência 04 (software @ptitude Analyst - SKF)**



Fonte: Os autores (2024)

O gráfico da Figura 15, apresenta queda do nível global de aceleração (G's), no mancal LA do motor, em 14/11/2023, após intervenção da manutenção, em ação corretiva planejada para substituição do motor e envio do mesmo para reparo externo. Os valores de aceleração referente ao período 14/11/2023 à 12/05/2024 são respectivamente: 0,688 G's e 0,6717 G's.

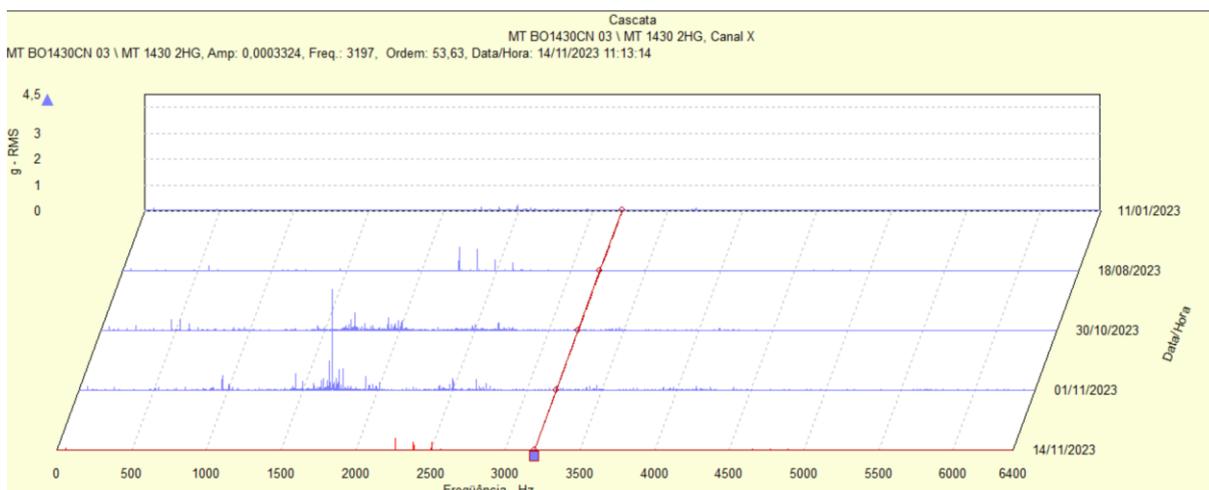
**Figura 16 – Espectro de frequências 05 (software @ptitude Analyst - SKF)**



Fonte: Os autores (2024)

O espectro de aceleração (G's) da Figura 16, refere-se à medição no mancal LA no dia 14/11/2023, após substituição do motor, operando com velocidade de 59,5 Hz(3570 rpm), com nível global satisfatório e sem frequências características de defeito no rolamento.

**Figura 17 – Mapa Espectral (software @ptitude Analyst - SKF)**



Fonte: Os autores (2024)

O gráfico de espectro em cascata apresentado na Figura 17, referente às sucessivas inspeções no ponto de medição em aceleração (G's) LA do motor, identificando bem as evoluções das frequências de defeito no rolamento (6315 C3), no intervalo de tempo entre 11/01/2023 e 14/11/2023.

Após a substituição do motor em estudo (Figura 19), já na oficina de reparo foi realizado a desmontagem, seguido da peritagem e análise de falha dos componentes. A Figura 18 apresenta a carcaça e estator do motor *SIMENS* em estudo monitorado sem presença de defeito ou anormalidade.

**Figura 18 – Carcaça e estator do motor**



Fonte: Os autores (2024)

A Figura 19 apresenta a tampa LA do motor com dimensões internas dentro da tolerância e sem marcas de oxidação e danos.

**Figura 19 – Sede do rolamento na tampa LA (mancal)**



Fonte: Os autores (2024)

A Figura 20 apresenta a pista interna do rolamento LA (6315 C3), com coloração amarronzada e marcas transversais ao longo da pista, como consequência da deficiência na lubrificação e vibrações externas com o equipamento parado.

**Figura 20 – Pista externa do rolamento LA (6315 C3)**



Fonte: Os autores (2024)

A Figura 21 apresenta a pista externa (BPFO) e os elementos rolantes (BSF) do rolamento LOA 6315 sem marcas de desgastes e anormalidades.

**Figura 21 – Pista externa do rolamento LA**



Fonte: Os autores (2024)

De acordo com as condições dos componentes elétricos e mecânicos, apresentado após desmontagem, segue as seguintes relações de custo referentes às atividades de manutenção e reparo empregadas no motor (Quadros 2, 3 e 4):

## Quadro 2 – Manutenções programadas

Item	MANUTENÇÕES PROGRAMADAS	CARCAÇA ABNT WEG (400L A/B)			
		(2/ 4/6 /8 /12 POLOS) - (2-4 / 6-8 POLOS)			
		SERVIÇOS (R\$)	MATERIAIS (R\$)	NCM	TOTAL
1	DESMONTAGEM	R\$ 500,00			R\$ 500,00
2	PERTAGEM	R\$ 500,00			R\$ 500,00
3	MONTAGEM	R\$ 500,00			R\$ 500,00
4	REJUVENESCIMENTO	R\$ 750,00			R\$ 750,00
5	BALANCEAMENTO DO INDUZIDO	R\$ 200,00			R\$ 200,00
6	BALANCEAMENTO DO INDUZIDO / POLIA / HELICE	R\$ 200,00			R\$ 200,00
7	NORMALIZAR CARCAÇA POR JATEAMENTO	R\$ 84,00			R\$ 84,00
8	NORMALIZAR SEDE DE ROLAMENTO NA TAMPA LA (AÇO FUNDIDO OU ALUMINIO - CONFORME CADA EQUIPAMENTO)	R\$ 700,00			R\$ 700,00
9	NORMALIZAR SEDE DE ROLAMENTO NA TAMPA LOA (AÇO FUNDIDO OU ALUMINIO - CONFORME CADA EQUIPAMENTO)	R\$ 265,00			R\$ 265,00
10	NORMALIZAR BASE DA CARCAÇA	R\$ 41,00			R\$ 41,00
11	NORMALIZAR ROSCAS DE FIXAÇÃO NA CARCAÇA	R\$ 32,00			R\$ 32,00
12	NORMALIZAR ROSCA DO OLHAL DE FIXAÇÃO	R\$ 22,00			R\$ 22,00
13	NORMALIZAR ROSCAS DE FIXAÇÃO CAIXA DE LIGAÇÃO	R\$ 22,00			R\$ 22,00
14	NORMALIZAR ROSCAS DE FIXAÇÃO TAMPA DE CAIXA DE LIGAÇÃO	R\$ 22,00			R\$ 22,00
15	NORMALIZAR ABAS DE FIXAÇÃO DE TAMPA LA	R\$ 32,00			R\$ 32,00
16	NORMALIZAR ABAS DE FIXAÇÃO DE TAMPA LOA	R\$ 32,00			R\$ 32,00
17	NORMALIZAR TAMPA DEFLETORA	R\$ 30,00			R\$ 30,00
18	NORMALIZAR VENTILADOR METALICO OU ALUMINIO	R\$ 70,00			R\$ 70,00
19	NORMALIZAR POR METALIZAÇÃO SEDE ROLAMENTO EIXO LA	R\$ 570,00			R\$ 570,00
20	NORMALIZAR POR METALIZAÇÃO SEDE ROLAMENTO EIXO LOA	R\$ 570,00			R\$ 570,00
21	NORMALIZAR POR METALIZAÇÃO PONTA DE EIXO LA	R\$ 990,00			R\$ 990,00
22	NORMALIZAR POR METALIZAÇÃO PONTA DE EIXO LOA	R\$ 990,00			R\$ 990,00
23	NORMALIZAR FURO ROSQUEADO NA PONTA DO EIXO LA	R\$ 75,00			R\$ 75,00
24	SUBSTITUIR CONJUNTO ROTOR COMPLETO		R\$ 3.400,00		R\$ 3.400,00
25	SUBSTITUIR CONJUNTO ESTATOR COMPLETO		R\$ 2.500,00		R\$ 2.500,00
26	SUBSTITUIR CARCAÇA		R\$ 2.500,00		R\$ 2.500,00
27	SUBSTITUIR SENSORES DE TEMPERATURA (TERMISTOR OU TERMOSTATO - 130 C - CONFORME CADA EQUIPAMENTO)		R\$ 210,00		R\$ 210,00
28	SUBSTITUIR EIXO DO ROTOR		R\$ 2.395,00		R\$ 2.395,00
29	SUBSTITUIR CAIXA DE LIGAÇÃO		R\$ 399,00		R\$ 399,00
30	SUBSTITUIR JUNTA DE BORRACHA DA CAIXA DE LIGAÇÃO E TAMPA		R\$ 27,00		R\$ 27,00
31	SUBSTITUIR TAMPA DA CAIXA DE LIGAÇÃO		R\$ 79,00		R\$ 79,00
32	SUNSTITUIR TAMPA LA		R\$ 440,00		R\$ 440,00
33	SUBSTITUIR TAMPA LA COM FRANGE FF. FC OU C		R\$ 2.157,00		R\$ 2.157,00
34	SUBSTITUIR TAMPA LOA		R\$ 440,00		R\$ 440,00
35	SUBSTITUIR ANEL DE FIXAÇÃO EXTERNO ROLAMENTO LA		R\$ 20,00		R\$ 20,00
36	SUBSTITUIR ANEL DE FIXAÇÃO INTERNO ROLAMENTO LOA		R\$ 20,00		R\$ 20,00
37	SUBSTITUIR ANEL DE FIXAÇÃO EXTERNO ROLAMENTO LOA		R\$ 20,00		R\$ 20,00
38	SUBSTITUIR ANEL DE FIXAÇÃO INTERNO DO ROLAMENTO LOA		R\$ 20,00		R\$ 20,00
39	SUBSTITUIR CENTRIFUGADOR DE GRAXA ROLAMENTO LA		R\$ 20,00		R\$ 20,00
40	SUBSTITUIR CENTRIFUGADOR DE GRAXA ROLAMENTO LOA		R\$ 20,00		R\$ 20,00
41	SUBSTITUIR VENTILADOR DE NYLON		R\$ 88,00		R\$ 88,00
42	SUBSTITUIR VENTILADOR METALICO OU ALUMINIO		R\$ 500,00		R\$ 500,00
43	SUBSTITUIR TAMPA DEFLETORA		R\$ 750,00		R\$ 750,00
44	SUBSTITUIR DEFLETOR DE AR INTERNO LA/LOA		R\$ 44,00		R\$ 44,00
45	SUBSTITUIR PARAFUSOS E ARRUELAS DE PRESSÃO DA TAMPA LA		R\$ 22,00		R\$ 22,00
46	SUBSTITUIR PARAFUSOS E ARRUELAS DE PRESSÃO DA TAMPA LOA		R\$ 22,00		R\$ 22,00
47	SUBSTITUIR PARAFUSOS E FIXAÇÃO DA CAIXA DE LIGAÇÃO		R\$ 22,00		R\$ 22,00
48	SUBSTITUIR PARAFUSOS DE ARRUELAS DE PRESSÃO DE TAMPA DEFLETORA		R\$ 22,00		R\$ 22,00
49	SUBSTITUIR PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DO DEFLETOR DE AR		R\$ 22,00		R\$ 22,00
50	SUBSTITUIR PARAFUSOS DE FIXAÇÃO TAMPA DA CAIXA DE LIGAÇÃO		R\$ 22,00		R\$ 22,00
51	SUBSTITUIR PARAFUSOS E ARRUELAS DE PRESSÃO DOS ANEIS DE FIXAÇÃO EXTERNA / INTERNO ROLAMENTOS LA E LOA		R\$ 15,00		R\$ 15,00
52	SUBSTITUIR PLUG COM TAMPA DO DRENO DE SAIDA		R\$ 6,00		R\$ 6,00
53	SUBSTITUIR PINOS GRAXEIROS		R\$ 12,00		R\$ 12,00
54	SUBSTITUIR OLHAL DE IÇAMENTO		R\$ 70,00		R\$ 70,00
55	SUBSTITUIR CHAVETA PONTA DO EIXO LA		R\$ 55,00		R\$ 55,00
56	SUBSTITUIR CHAVETA DO VENTILADOR		R\$ 36,00		R\$ 36,00
57	SUBSTITUIR PINO ELASTICO DO VENTILADOR		R\$ 9,00		R\$ 9,00
58	SUBSTITUIR ANEL ELASTICO		R\$ 8,00		R\$ 8,00
59	SUBSTITUIR ROLAMENTO LA - (FABRICANTES: SKF, NSK, FAG, NTN)		R\$ 900,00		R\$ 900,00
60	SUBSTITUIR ROLAMENTO LOA - (FABRICANTES: SKF, NSK, FAG, NTN)		R\$ 900,00		R\$ 900,00
61	SUBSTITUIR ARRUELA ONDULADA		R\$ 9,00		R\$ 9,00
62	SUBSTITUIR PARAFUSO E TERMINAL DE ATERRAMENTO		R\$ 10,00		R\$ 10,00
63	SUBSTITUIR PLACA DE BORNES		R\$ 150,00		R\$ 150,00
64	SUBSTITUIR PLACA DE FABRICANTE E REBITES		R\$ 40,00		R\$ 40,00
65	SUBSTITUIR RETENTORES LA E LOA - (FABRICANTES: SABÓ, VEDABRÁS)		R\$ 180,00		R\$ 180,00
66	SUBSTITUIR LABIRINTO TACONTE LA		R\$ 40,00		R\$ 40,00
67	SUBSTITUIR LABIRINTO TACONTE LOA		R\$ 40,00		R\$ 40,00
68	SUBSTITUIR ANEL V RING OU ANEL O RING LA		R\$ 37,00		R\$ 37,00
69	SUBSTITUIR ANEL V RING OU ANEL O RING LOA		R\$ 37,00		R\$ 37,00
70	SUBSTITUIR TERMINAIS DO CABO DE LIGAÇÃO		R\$ 40,00		R\$ 40,00

Fonte: Oficina de reparo (2023), adaptado pelos autores (2024)

As conclusões técnicas referentes à manutenção aplicada na oficina de reparo, localizado em Itabira, Minas Gerais são listadas em relatório, por meio de planilhas, de maneira a distinguir a atividade, causa e custo da manutenção envolvida, agregando informações construídas para enriquecimento do banco de dados

### Quadro 2 – Custos de manutenção preditiva

Manutenção Preventiva			
Reparador de Motor x Orçamento			
Descrição	Dados Técnicos	Descrição	Dados Técnicos
N° OM Orçamento do Reparador:	---	Tensão:	4000V
N° OM do Reparador:	---	Corrente:	733A
Tempo de Manutenção:	02 Dias	Rolamento LA:	6315 C3
Classe da Família:	CA	Rolamento LOA:	6315 C3
Potência (CV):	600 CV	Grau de Proteção:	IP55
Carcaça / Modelo / Tipo:	400L A/B	N° de Ponta de Eixo:	1
Velocidade (RPM):	3570 RPM	Fabricante	WEG
Numero de Polos:	2	TAG do Motor	1009393223
Forma Construtiva / Flange	B3R(E)	Data do Orçamento	30/10/2023

Itens	Descrição Técnica Conforme Descrito na Tabela de Preços	Valor (R\$)
1	Desmontagem	R\$ 500,00
2	Peritagem	R\$ 500,00
3	Rejuvenescimento	R\$ 750,00
4	Balanceamento do Induzido	R\$ 200,00
5	Substituir Rolamento LOA (Fabricantes, SKF, NSK, FAG, NTN)	R\$ 900,00
6	Substituir Rolamento LA (Fabricantes, SKF, NSK, FAG, NTN)	R\$ 900,00
7	Montagem	R\$ 500,00
<b>Valor Total dos Serviços:</b>		<b>R\$ 4.250,00</b>

Fonte: Os autores (2024)

Com intuito de comparar custos e manutenção aplicada e com base em histórico de dados, foi analisado uma situação ocorrida em 2023, onde um motor com as mesmas características do motor em estudo, locado sob mesmas condições de acionamento e não monitorado por técnicas preditiva. O mesmo começou a apresentar aumento de temperatura e ruído anormal, chamando atenção dos operadores que em contato com a equipe de manutenção responsável atuaram de forma corretiva na ocorrência.

Para evitar manutenções corretivas e tempos de parada longos foi implantado a manutenção preditiva com técnicas de análise de vibração, aumentando a disponibilidade e menor custo de manutenção de reparo aplicado.

Após a substituição do motor comparativo, já na oficina de reparo foi realizado a desmontagem, seguido da peritagem e análise de falha dos componentes, como pode ser visto na Figura 24.

**Figura 24 – Rolamento LA 6315 C3 (Parte 1)**



Fonte: Os autores (2024)

A Figura 24 mostra o rolamento LOA (6315 C3) com indicações de oxidação no anel externo e graxa com aparência ressecada e o rolamento LA(6315 C3) com presença de oxidação, gaiola com marcas aparentes de esforços e temperaturas elevadas, consequência de deficiência na lubrificação, folga na sede dos rolamentos e defeito nos mesmos.

A figura 25 demonstra a tampa LA do motor com dimensões internas fora da tolerância, com presença de oxidação e marcas de desgaste operacionais, consequência de folga entre rolamento/sede do rolamento (mancal).

**Figura 25** – Rolamento LOA 6315 C3 e rolamento 6315 C3 (Parte 2)



Fonte: Os autores (2024)

A Figura 26 mostra a ponta de eixo com marcas de desgaste, seguido de perdas dimensionais e como consequência de folga entre eixo e rolamento.

**Figura 26** – Rolamento LOA 6315 C3 e rolamento 6315 C3 (Parte 3)



Fonte: Os autores (2024)

O relatório técnico pós-manutenção de reparo mostra de maneira detalhada o número de atividades de reparo envolvida em um motor substituído via manutenção corretiva não planejada.

### Quadro 3 – Custos de manutenção corretiva

Manutenção Corretiva			
Reparador de Motor x Orçamento			
Descrição	Dados Técnicos	Descrição	Dados Técnicos
N° OM Orçamento do Reparador:	---	Tensão:	4000V
N° OM do Reparador:	---	Corrente:	733A
Tempo de Manutenção:	06 Dias	Rolamento LA:	6315 C3
Classe da Família:	CA	Rolamento LOA:	6315 C3
Potência (CV):	600 CV	Grau de Proteção:	IP55
Carcaça / Modelo / Tipo:	400L A/B	N° de Ponta de Eixo:	1
Velocidade (RPM):	3570 RPM	Fabricante	WEG
Numero de Polos:	2	TAG do Motor	1009393223
Forma Construtiva / Flange	B3R(E)	Data do Orçamento	13/11/2023

Itens	Descrição Técnica Conforme Descrito na Tabela de Preços	Valor (R\$)
1	Desmontagem	R\$ 500,00
2	Peritagem	R\$ 500,00
3	Rejuvenescimento	R\$ 750,00
4	Balanceamento do Induzido	R\$ 200,00
5	Substituir Rolamento LOA (Fabricantes, SKF, NSK, FAG, NTN)	R\$ 900,00
6	Substituir Rolamento LA (Fabricantes, SKF, NSK, FAG, NTN)	R\$ 900,00
7	Normalizar Sede de Rolamento na Tampa LA (Aço Fundido / Alumínio)	R\$ 700,00
8	Substituir Retentor LA	R\$ 180,00
9	Normalizar Por Metalização Ponta de Eixo LA	R\$ 990,00
10	Montagem	R\$ 500,00
<b>Valor Total dos Serviços:</b>		<b>R\$ 6.120,00</b>

Fonte: Os autores (2024)

Como forma de comparar as vantagens envolvidas na implantação do monitoramento preditivo por análise de vibração em motores elétricos, foram alinhados os custos, atividades e tempo de manutenção entre o motor em estudo e o motor comparado. O motor comparado apresentou 44% a mais no custo de manutenção aplicado e 66% a mais em tempo gasto em reparo do que o motor em estudo (monitorado por análise de vibração).

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a elaboração do estudo nota-se a importância na implantação da manutenção preditiva por análise de vibração em máquinas rotativas, devido a

minimizar quebras e falhas inesperadas, custos elevados, prolongados tempos de perda de produtividade e ameaça a segurança social e ambiental na planta industrial.

Através da utilização de curvas de tendência e análise espectral, pode-se observar e criar uma previsão de tempo necessário de intervir de maneira a determinar o grau e diagnóstico referente a deterioração dos componentes de forma planejada

Os benefícios da manutenção preditiva são percebidos através do comparativo entre a manutenção programada e a manutenção não programada, onde a redução de custo e de tempo de parada são ganhos notáveis para uma empresa que aplica a técnica. Após realização do estudo comparativo envolvendo motores monitorados e não monitorados, as manutenções de reparo e custos envolvidos, pode se concluir que com aplicação da técnica de análise de vibração obtém resultados lucrativos em tempo de parada, custo de manutenção, segurança e qualidade dos ativos.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. T. **Apostila do curso de análise de vibrações I**. Fupai: Itajubá, 2014.

BARONI, Tarcísio et al. **Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas**. Editora Qualitymark. Rio de Janeiro, 2002.

BENBOUZID, M. E. H., Vieira. And Theys,C. **Induction motor's faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques**. IEEE Transaction on Power Electronics,v.14(1),pp.14-22,1999

BONALDI, E. L. **Manutenção Preditiva em motores de Indução Trifásicos através do Espectro de Corrente do Estator**. Dissertação de mestrado apresentada a Escola Federal de Engenharia Itajubá, 2002.

BRITO, Nei. **Diagnóstico de Falhas em Motores Elétricos: Técnicas Convencionais Preditivas e de Inteligência Artificial**. 2013.

CARVALHO, Geraldo Nascimento Junior. **Máquinas elétricas: teoria e ensaios**. São Paulo: Érica, 2011.

FILHO, Gil Branco. **A Organização, o Planejamento e o Controle de Manutenção**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2008.

\_\_\_\_\_. **Custos em Manutenção**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2010.

FILTZGERALD, Charles Kingsley Jr; **Máquinas Elétricas**. Stephen Umans: tradução Anatólio Laschunk. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2008.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark - Petrobrás. 2009. 384p.

KARDEC, Alan. **Gestão de Ativos**. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark. 2014. 376p.

MARTIGNONI, Alfonso. **Máquinas de Corrente Alternada**. São Paulo: Globo, 2005.

MENEZES, Eстера Muszkat; SILVA, Edna Lúcia da. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**, Ed. Atual. Florianópolis, 2005. Disponível em:<<http://www.ppgep.ufsc.br>. >. Acesso em: 07 out., 2024

WEG - **General Catalog of Electric Motors**. Brazil: WEG Electric Motors Corporation, 2004