



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

FILIPE ANTUNES VERISSIMO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE TÉCNICAS PREDITIVAS EM
EQUIPAMENTO ROTATIVO: UM ESTUDO DE CASO**

ARAXÁ-MG

2022

FILIPPE ANTUNES VERISSIMO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE TÉCNICAS PREDITIVAS EM
EQUIPAMENTO ROTATIVO: UM ESTUDO DE CASO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Automação Industrial, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador(a): Prof. Me. Thiago Ferreira Quirino

ARAXÁ-MG

2022

FILIFE ANTUNES VERISSIMO

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE TÉCNICAS PREDITIVAS EM
EQUIPAMENTO ROTATIVO: UM ESTUDO DE CASO**

Projeto de pesquisa apresentado ao Curso de Engenharia de Automação Industrial, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

BANCA AVALIADORA

Araxá, 08 de fevereiro de 2022.

Presidente e Orientador(a): Prof. Thiago Ferreira Querino – Mestre em Engenharia Mecânica
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

Membro Titular: Prof. Thiago Gomes Cardoso – Mestre em Engenharia Mecânica
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Unidade Araxá

Membro Titular: Fabrizio de Alenkar Ferreira – Graduado em Engenharia Civil
Supervisor de Manutenção Preditiva

Dedico este trabalho à minha companheira Roberta Benatti,
a Deus, que me criou e cuida de mim todos os dias.
Aos meus familiares, pelo amor, cuidado e
incentivo na realização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTO

A Deus, por me possibilitar ter saúde e a oportunidade na qual não são todas as pessoas têm que é de ter acesso aos estudos, por isso me sinto privilegiado.

Aos meus pais João Romeu e Elizabeth que sempre apoiaram e incentivaram a nunca desistir de meus sonhos.

Aos meus irmãos Hugo e Rafael que sempre estiveram presentes e não me deixaram desistir.

A minha companheira de vida Roberta Benatti que deu suporte para persistir até chegar ao final desta graduação e sua compreensão nos momentos de ausência.

Aos professores do CEFET-MG Campus IV de Araxá por todos conhecimentos repassados a nós alunos.

Ao professor Admilson e ao profissional Fabrizio por aceitarem o convite para participar da banca de defesa desta monografia.

Ao meu orientador, professor Thiago Querino que me orientou no desenvolvimento desta pesquisa e não mediu esforços para me apoiar.

A todos os meus amigos do curso de graduação que estiveram comigo ao longo de todos esses anos que ficaram para sempre em minha memória

Ao CEFET-MG, seu corpo docente e seus colaboradores, que certamente fizeram parte desta história.

*“Suba o primeiro degrau com fé.
Não é necessário que você veja toda a escada.
Apenas dê o primeiro passo.”*
Martin Luther King

RESUMO

A manutenção industrial é de suma importância para o processo produtivo e influencia diretamente nos resultados da empresa. A evolução da manutenção associada aos avanços tecnológicos possibilita, atualmente, que a manutenção seja feita de forma mais rápida, assertiva, com mais qualidade e sem impactos significativos na produção, desde que uma estratégia adequada seja adotada, pois todas as estratégias têm como objetivo a busca de resultados positivos e conseqüentemente, competitividade e sobrevivência no mercado. Seguindo esse caminho o trabalho a ser desenvolvido tem como objetivo realizar uma pesquisa acerca de técnicas preditivas como a análise de vibrações, analisando seus resultados e explorando sua funcionalidade. Se baseando em pesquisas bibliográficas descrevendo e revisando um procedimento para a aplicação das técnicas preditivas de forma a maximizar os resultados vantajosos e por fim, apresentar quais são os impactos gerados na confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos os quais serão aplicadas as técnicas. Enfim constatou-se o estabelecimento de um relacionamento entre as variáveis de vibração com a temperatura coletada por meio de pirômetro, para reconhecimento de falhas. Identificou-se a real previsibilidade das falhas no equipamento rotativo por meio das técnicas empregadas, como foi o caso no dia 19/04/2021 no qual por meio da análise de vibrações foi identificada falha o que foi confirmado após com a coleta de temperatura do componente no mesmo dia.

Palavras-chave: Manutenção Preditiva, Análise de Vibrações, Mancal de Rolamento. Técnicas.

ABSTRACT

Industrial maintenance is of paramount importance to the production process and directly influences the company's results. The evolution of maintenance associated with technological advances currently makes it possible for maintenance to be carried out faster, more assertively, with more quality and without significant impacts on production, provided that an appropriate strategy is adopted, as all strategies aim to search for positive results and, consequently, competitiveness and survival in the market. Following this path, the work to be developed aims to carry out a research on predictive techniques such as vibration analysis, analyzing their results and exploring their functionality. Based on bibliographic research describing and reviewing a procedure for the application of predictive techniques in order to maximize the beneficial results and finally, present what are the impacts generated in the reliability and availability of the equipment which will be applied the techniques. Finally, it was found the establishment of a relationship between the vibration variables with the temperature collected by means of a pyrometer, for fault recognition. The real predictability of failures in rotating equipment was identified through the techniques used, as was the case on 04/19/2021 in which, through vibration analysis, failure was identified, which was confirmed after collecting the temperature of the component on the same day.

Keywords: Predictive Maintenance, Vibration Analysis, Rolling Bearing. Techniques.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Curva Performance X Tempo de Funcionamento.	20
Figura 2 - Evolução das Gerações da Manutenção.....	21
Figura 3 - Aplicação da Mão de Obra da Manutenção.....	22
Figura 4 - Vibração livre e Frequência natural.....	27
Figura 5 - Forma de onda $x(t)$	28
Figura 6 - Espectro de Frequência.	28
Figura 7 - Norma ISO 10816, limites para vibração.	29
Figura 8 - Representação do Sensor Acelerômetro.	31
Figura 9 - Imagem de um Acelerômetro de 100mV/g.....	32
Figura 10 - Café quente conduzindo calor para a xícara.	35
Figura 11 - Interruptor sob o vento (esquerda) e interruptor sem vento (direita).....	36
Figura 12 - Espectro Eletromagnético.	37
Figura 13: Pirômetro Infravermelho.....	38
Figura 14 – Norma ISO 4406-99.....	40
Figura 15 - Ferrograma representando desgaste normal após aquecimento.....	41
Figura 16 - Velocidade do som (m/s) em alguns meios materiais.	43
Figura 17 - Onda sonora senoidal.....	44
Figura 18 - Espectro Sonoro.....	45
Figura 19 - Representação da vista superior do equipamento.	51
Figura 20 - Análise de Criticidade ABC.	51
Figura 21 - Redutor CESTARI.....	52
Figura 22 - Informações técnicas do redutor.	53
Figura 23 - Acoplamento Hidrodinâmico.....	53
Figura 24 - Dados de Cálculo Rolamento 22226 E.....	54
Figura 25 - Mancal de rolamento 22226 E.....	55
Figura 26 - Dimensões dos rolamentos 22226 E.....	55
Figura 27 - Gráfico de Porcentagens das Ordens selecionadas.	60
Figura 28 - Porcentagens de Ordens das Equipes Responsáveis.....	60
Figura 29 - Quantidade de ordens selecionadas.	61
Figura 30: Quantidade de ordens por disciplina Mecânica e Lubrificação.....	62
Figura 31 - Coletor de dados CSI 2140.	66

Figura 32 - Representação do cadastro do equipamento no Software AMS	67
Figura 33 - Características da Graxa Lubrax Clay 2.	68
Figura 34 - Tela de coleta de dados em rota CSI 2140.....	68
Figura 35 - Gráfico de Tendência formado pelo Software AMS.	69
Figura 36 - Dados Rolamentos do Redutor.	71
Figura 37- Frequências de falha de rolamento dos rolos de apoio.	71
Figura 38 – Espectro representando desalinhamento em um equipamento.	71
Figura 39- Espectro de vibração do mancal 7 do conjunto de apoio 4 do equipamento estudado.	72
Figura 40 - Gráfico Falhas ocorrentes em 2021.	73
Figura 41 - Gráfico Falhas ocorrentes em 2021 x Rolos de Apoio.	74
Figura 42 - Gráfico falhas ocorrentes Mancais x Rolos de Apoio.	75
Figura 43 – Espectro representando folga no mancal do rolo de apoio1.	76
Figura 44 – Espectro representando falha no BPFO mancal e rolamento 4.....	77
Figura 45 – Pirômetro 62 MAX+ do Fabricante FLUKE.	78
Figura 46 - Especificações do pirômetro FLUKE 62 MAX+.	79
Figura 47 – Gráfico da variação de temperatura nos rolos de apoio em fevereiro de 2021.	81
Figura 48 – Gráfico de variação de temperatura nos rolos de apoio em abril de 2021. .	82
Figura 49 - Câmera Termográfica T540.....	84
Figura 50 - Tela do software FLIR TOOLS.	85
Figura 51 - Tela do software FLIR TOOLS.	86
Figura 52 - Valores aproximados de emissividade de alguns materiais metálicos.	87
Figura 53 – Características do lubrificante MATRIX® LM.	88
Figura 54 – Porca Autotravante Nylon.....	89

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 - Relação de Ordens Seleccionadas.....	58
Tabela 2 - Relação de ordens de paradas e grade semanal.....	62
Tabela 3 - Relação de ordens de prioridade de emergência e de urgência.....	63
Tabela 4: Tempo gasto para coleta de vibrações do equipamento rotativo com um coletor de dados.....	64
Tabela 5 – Falhas vigentes em 2021.....	73
Tabela 6 – Medições de temperatura nos rolos de apoio em fevereiro de 2021.....	80
Tabela 7 – Medições de temperatura nos rolos de apoio em abril de 2021.....	82
Tabela 8 – Medições de temperatura nos rolos de apoio em 12 a 19 de abril de 2021..	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NBR	Norma Técnica Brasileira
PF	Curva Performance por Funcionamento
RPM	Rotações por Minuto
Hz	Hertz
ITC	<i>Infrared Training Center</i>
SKF	<i>Svenska KullagerFabriken</i>
TAN	Número de Acidez Total
KOH	Hidróxido de Potássio
TBN	Número de Basicidade
IPC	Índice de Partículas Ferrosas
MHM	Gerenciamento de Machinery Health;
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada rápida de Fourier);
BPMI	Ball Pass Frequency Inner Race (Frequência de falha na Pista interna);
BPMO	Ball Pass Frequency Outer Race (Frequência de falha na Pista Externa);
BSF	Ball Spin Frequency (Frequência de falha de elementos girantes);
FTF	Fundamental Train Frequency (Frequência de falha na gaiola);
N	Número de elementos rolantes de um rolamento (esferas ou rolos);
Fo	Frequência de giro do eixo;

LISTA DE SÍMBOLOS

f	Frequência
T	Período
Sen	Seno
F_e	Frequência de Engrenamento
ρ	Densidade
λ	Comprimento de Onda
mV/G	Milivolt por Gravidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivo Geral.....	16
2.2. Objetivos Específicos	16
2.3. Justificativas.....	17
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1. Manutenção Industrial	18
3.2. Tipos de Manutenção	19
3.2.1. Manutenção Corretiva	21
3.2.2. Manutenção Preventiva	23
3.2.3. Manutenção Preditiva	24
3.2.3.1. Análise de Vibrações	25
3.2.3.2. Sensores de Vibração.....	30
3.2.3.3. Termografia Infravermelha.....	32
3.2.3.4. Pirômetro	37
3.2.3.5. Análise de Lubrificante	39
3.2.3.6. Emissão Acústica.....	42
4. METODOLOGIA	47
4.1 Estudo e arranjo físico do equipamento.....	47
4.2 Histórico e Análise do Equipamento	48
4.3 Parâmetros técnicos para aplicação das técnicas preditivas	48
4.4 Análise Resumida	49
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1 Estudo e arranjo físico do Equipamento	50
5.2 Histórico e aplicações técnicas executadas.....	56
5.2.1 Levantamento de Intervenções.....	56
5.3 Análise de falhas	64
5.3.1 Aplicação de análise de vibrações no equipamento rotativo.....	64
5.3.1.1 Cadastro e Armazenamento de dados.....	66
5.3.1.2 Método de Identificação de Falhas	69
5.3.1.3 Análise de Dados – Vibração	72
5.3.2 Aplicação de análises da varável temperatura no equipamento rotativo	77

5.3.2.2 Análise de Dados - Temperatura	80
5.4 Sugestões de melhoria.....	83
5.4.1 Proposta de Melhoria na Termografia.....	84
5.4.2 Proposta de Melhoria na Lubrificação dos Mancais	87
5.4.3 Proposta de Melhoria na Fixação dos Mancais	88
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
REFERÊNCIAS	95

1. INTRODUÇÃO

A manutenção industrial é de suma importância para o processo produtivo e influencia diretamente nos resultados da empresa. A evolução da manutenção associada aos avanços tecnológicos possibilitou, atualmente, que a manutenção seja executada de forma mais rápida, assertiva e sem impactos significativos na produção. Aliado ao desenvolvimento tecnológico, a manutenção industrial de qualidade vincula-se à gestão estratégica, a qual tem como função estabelecer melhores práticas/ferramentas da manutenção para a obtenção de resultados eficazes. Para isso, faz uso de variadas técnicas processo produtivo. Todas as estratégias têm como objetivo a busca de resultados positivos e, conseqüentemente, competitividade e sobrevivência no mercado. Com a globalização da economia, observa-se um aumento na demanda por produtos e sistemas de superior desempenho a custos competitivos. (FOGLIATTO, F.; RIBEIRO, J. 2009).

Mediante a isso, técnicas de manutenção preditiva, realizadas através de monitoramento da condição de ativos, são amplamente empregues. A utilização dessas técnicas, aumenta a disponibilidade operacional dos equipamentos e proporciona a redução de custos destinados à manutenção, uma vez que aplicada de forma assertiva. Tal fato revela-se quando é efetuado o acompanhamento constante das condições dos ativos industriais, evitando assim, intervenções desnecessárias e, conseqüente, diminuição do capital perdido. Esses monitoramentos são feitos com o equipamento em operação, sem a necessidade de interrupção de seu funcionamento. Tal fato reduz os tempos de parada, além de melhorar aspectos relacionados à segurança ambiental e operacional dos colaboradores, haja vista que a manutenção poder ser realizada sem o contato direto com o equipamento em operação (KARDEC, A.; NASCIF, J. 2017).

Várias técnicas de manutenção preditivas são aplicáveis, dentre elas há maior destaque para as técnicas: monitoramento de vibração, termografia, inspeção visual, detecção de vazamentos, medição de espessuras, emissão acústica, entre outras. O estudo de suas respectivas aplicações em determinadas atividades dependerá das possibilidades e limitações da instalação e/ou equipamento. (KARDEC, A.; NASCIF, J. 2017).

Dessa forma, aspirando acompanhar e analisar as melhorias nas técnicas preditivas aplicáveis em um equipamento rotativo, localizado em uma indústria mineradora, este trabalho objetiva desenvolver um estudo da viabilidade das técnicas preditivas aplicadas em um equipamento rotativo instaurado em uma indústria mineradora, afim de aprimorar a eficiência operacional do ativo. Em suma, dentre as

técnicas atualmente aplicadas destacam-se a análise de vibrações e termografia. Com isso, a pesquisa realizada na execução da técnica de análise de vibrações, caracterizada como uma técnica de manutenção preditiva, com o intuito de quantificar e observar os dados de frequências de vibrações e de suas amplitudes, e por meio destes dados identificar e prever diversos tipos possíveis de falhas em equipamentos rotativos. Por sua vez, a termografia lança, por meio do acompanhamento das condições de seus mancais e rolamentos, imagens por meio de uma câmera termográfica capaz de realizar o levantamento da distribuição da radiação de um corpo.

As duas técnicas supracitadas serão os pilares para estudo e detalhamento do equipamento. O mesmo apresenta a função de realizar em altas temperaturas a fusão do material final de uma planta química de uma indústria mineradora. Com a intenção de buscar e desenvolver melhores práticas a serem implantadas na manutenção, a fim de diminuir os eventos de paradas ou possibilitar uma maior previsibilidade de falhas funcionais no equipamento estudado.

Baseado nas informações supracitadas, manifesta-se o questionamento de pesquisa que embasa esta proposta, qual seja: as técnicas de análise de falhas (análise de vibrações e termografia) realizadas no equipamento rotativo estudado estão sendo aplicadas de forma satisfatória? Logo, com a finalidade de efetivar a análise aqui explanada, este trabalho está construído, em três capítulos, além de introdução, objetivos, justificativa e considerações finais. A princípio, no segundo capítulo expõe-se por meio de uma revisão bibliográfica os principais conceitos sobre a manutenção e seus tipos existentes, sendo suas principais a corretiva, preventiva e preditiva. A seguir expõe-se técnicas de manutenção preditiva empregadas neste trabalho, cita-se e define-se as práticas de análise de vibrações, termografia, sensores de vibração, análise de lubrificante e emissão acústica. No terceiro capítulo, especifica-se a metodologia utilizada neste estudo de caso, com a determinação das condições de estudo e arranjo físico do equipamento, histórico e análise do equipamento, parâmetros técnicos para aplicação das técnicas preditivas e finalmente, análise resumida deste estudo. No quarto capítulo, investiga-se o equipamento rotativo, objeto de estudo deste projeto. Em seguida, segue-se para a avaliação e análise do histórico de falhas do equipamento ao longo de sua vida útil. Após isso, argumenta-se e aborda-se a instauração das análises de falha realizadas no equipamento rotativo. Melhor dizendo, discute-se o modo no qual as ferramentas de análise de vibrações e termografia são empregues e se suas aplicações são satisfatórias e eficientes para a identificação de falhas funcionais. Finalmente, discute-se os resultados

obtidos e análises são realizadas a fim de verificar a viabilidade das técnicas e propor melhorias a serem implantadas.

2. OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados os objetivos (gerais e específicos) que levaram ao desenvolvimento da pesquisa, além de apresentar as justificativas que possibilitaram a realização da mesma.

2.1. Objetivo Geral

O presente projeto tem como objetivo desenvolver um estudo da viabilidade das técnicas preditivas aplicadas em um equipamento rotativo instaurado em uma indústria mineradora, a fim de aprimorar a eficiência operacional do ativo.

2.2. Objetivos Específicos

Pretendendo a assertividade na execução do objetivo desta pesquisa, foram traçados objetivos específicos exibidos ao longo do trabalho, são eles:

- Realizar a revisão bibliográfica do estado da arte de aplicação de técnicas preditivas no monitoramento da condição de ativos físicos de mineradoras;
- Levantar o histórico de manutenções e informações técnicas pertinentes ao ativo a ser estudado;
- Descrever a forma como as técnicas preditivas são empregues dentro da empresa em questão;
- Propor métodos e técnicas de análises de falhas para aprimoramento da eficiência operacional do ativo;
- Analisar a efetividade da aplicação das técnicas preditivas segundo a situação vigente;
- Propor melhorias a serem aplicadas nas técnicas preditivas listadas anteriormente;
- Aprimorar a condição de funcionamento do ativo ao longo de sua vida útil.

2.3. JUSTIFICATIVAS

Em processos produtivos a utilização de equipamentos para realização de determinadas tarefas e/ou funções são essenciais para agregar valor em algum produto, o que não é diferente na mineração. Ao longo do tempo, com a complexidade das tarefas a serem realizadas, aliadas ao aumento da demanda das empresas e a necessidade de serem mais competitivas no mercado, a meta passou a ser, produzir mais, com maior qualidade e de menor custo para as empresas. O desafio então passou a ser a capacidade de proporcionar maior disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos, inerentes aos processos produtivos, de modo a aumentar a vida útil dos equipamentos e componentes.

Todo ativo físico de uma empresa possui uma dada vida útil. Essa vida útil, ao passar do tempo e da utilização dos mesmos é diminuída devido ao desgaste natural que sofrem pela sua utilização e por fatores como a existências de falhas potenciais e funcionais. Com isso, em alguns momentos esses equipamentos irão necessitar de alguma intervenção para manter sua performance e cumprimento de sua função a qual foi destinado, como uma manutenção corretiva. Porém, há outros tipos de manutenção que podem ser aplicadas nos equipamentos, a fim de evitar a parada corretiva emergencial, ou até mesmo possibilitar a ocorrência de uma corretiva planejada. Esse modelo de manutenção é a Preditiva, manutenção que se faz o uso de técnicas a fim de identificar falhas potenciais, possibilitando às equipes de manutenção a fazerem as intervenções nos equipamentos otimizando os recursos da empresa.

Esta será a metodologia seguida nessa pesquisa, para mapear melhorias nas técnicas preditivas empregues em equipamentos industriais em uma mineradora. Caso seja possível, implementar novas técnicas possíveis de serem aplicadas considerando a viabilidade para o equipamento a ser estudado, partindo da identificação de um equipamento com uma certa reincidência de falhas. Falhas estas que causaram paradas corretivas no equipamento e devem ser corrigidas, com a finalidade de aumentar o nível de performance do equipamento. Para tanto, devido à grande gama de tipos de manutenção disponíveis para a aplicação, cabe aos responsáveis do setor de manutenção traçar a melhor estratégia de gerenciamento de manutenção que melhor se adeque a sua realidade e à realidade dos equipamentos do processo produtivo.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ao longo dos anos, o emprego de novas tecnologias difundiu-se em todo mundo, o que possibilitou o crescente desenvolvimento tecnológico mundial atual. Proveniente de tal crescimento, as pessoas vivenciaram a necessidade de se aprimorar para atuação em diversas áreas do conhecimento. Muito disso deve-se a indispensabilidade de obtenção de alta eficiência em determinados processos, ocasionando essencialidade de graus superiores de credibilidade e de assertividade nas análises realizadas e nos resultados obtidos em diferenciadas áreas. Ainda assim, o investimento em tecnologia supriu determinadas incapacidades dos seres humano no desempenho de certas atividades (KARDEC; NASCIF, 2017).

Várias áreas do conhecimento e segmentos de serviços sofreram os impactos do desenvolvimento tecnológico. “O crescimento da automação e da mecanização passou a indicar que a confiabilidade e disponibilidades se tornaram postos-chave em setores tão distintos quanto saúde, processamento de dados, telecomunicações e gerenciamento de edificações” (KARDEC; NASCIF, 2017, p. 3). O setor de manutenção foi vastamente influenciado pelos avanços tecnológicos atuais, pois, novas formas de aplicar e efetuar práticas mantenedoras surgiram em seus diferenciados setores. Aliado às essas novas técnicas de manutenção, destaca-se o reconhecimento da importância da manutenção como função estratégica, a fim de melhorar resultados e aumentar a competitividade das organizações (KARDEC; NASCIF, 2017).

3.1. Manutenção Industrial

A manutenção é definida como um conjunto de procedimentos técnicos e cuidados que precisam ser aplicados, em busca do bom funcionamento de equipamentos, peças, instalações e veículos. Proveniente da evolução dos processos produtivos e das máquinas, estes procedimentos ficaram ainda mais indispensáveis, atuando a fim de não somente concertar a falha de imediato, mas prevenir e evitar problemas de manutenção anteriores à falha (ALMEIDA, 2017).

A evolução da manutenção no cenário industrial se apresenta de forma bem emblemática, sendo a grande responsável por garantir a funcionalidade operacional dos equipamentos e, conseqüentemente, a funcionalidade dos processos ao quais os mesmos estão inseridos. Com isso, de acordo com Braidotti (2020), pode-se atingir melhores

resultados se a manutenção é realizada baseada na condição de um determinado equipamentos. Em concordância com Kardec e Nascif (2017), há de se considerar o grande avanço na área de microeletrônica, o que reduz sobremaneira o preço de instrumentos para acompanhamento periódico de máquina. Os autores ainda afirmam que os custos de mão de obra são insignificantes e que o de investimento inicial aproxima-se de 1 % do valor do equipamento a ser monitorado.

A manutenção está presente no cotidiano de organizações e dos colaboradores das mesmas. Até as pessoas que não trabalham diretamente na manutenção sofrem suas interferências, haja vista que tudo que utilizam de equipamentos, como componentes, peças, veículos, equipamentos eletrônicos, maquinários e etc., que apresentam vida útil e necessitam de manutenção. Para tanto, ao longo de sua vida útil esse componente necessitará de intervenções para reparo de seu desempenho. Assim sendo, necessitam da restauração de sua funcionalidade e reestabelecimento da confiabilidade. Conforme a norma NBR-5462, confiabilidade é a “capacidade que um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo” (ABNT, 1994, p. 3).

Com a crescente importância da manutenção para a indústria, a forma de gerir e aplica-la é fundamental para obtenção de bons resultados, ou seja, a definição da estratégia está diretamente ligada com o lucro da empresa. Um erro na estratégia de manutenção adotada pela empresa provê altos gastos, podendo custar a competitividade que a empresa possui diante seus concorrentes (TELES, 2019).

Neste contexto, as formas de atuação da manutenção apresentam-se com grandes variedades de denominações. Fato que pode causar certa confusão, contudo o mais importante compreender o conceito (KARDEC; NASCIF, 2017). Entre as discrepantes titulações destacam-se as manutenções: corretivas, preventivas, preditivas, programadas e não programadas, explica a norma NBR-5462 (ABNT, 1994).

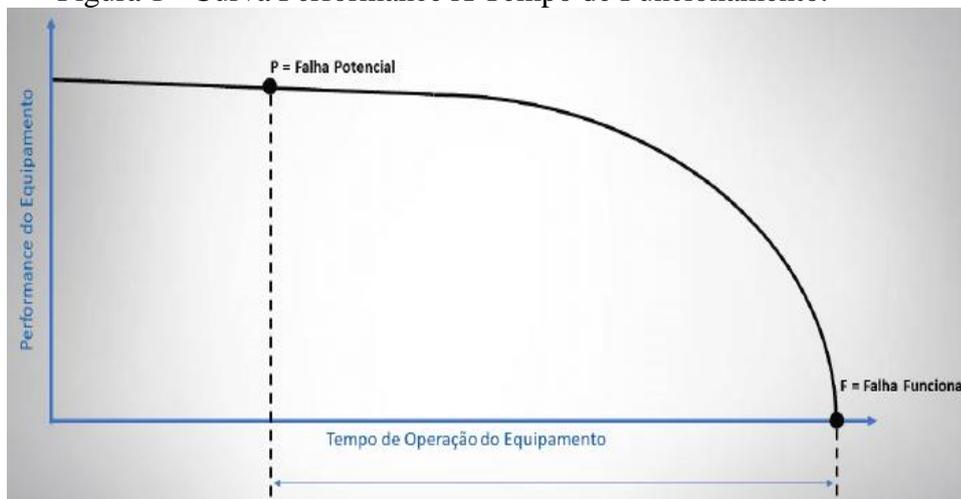
3.2. Tipos de Manutenção

A Norma Técnica Brasileira (NBR-5462) destaca três grandes tipos de manutenção, sendo elas a corretiva, preventiva e preditiva, porém esta última convencionada em 1994. Os tipos de manutenção existentes podem ser considerados como os tipos de estratégias de manutenção a serem adotadas. As mais comuns são: Manutenção Corretiva Não Planejada, Manutenção Preventiva, Manutenção Preditiva,

Manutenção Detectiva, Manutenção Corretiva Planejada e Engenharia de Manutenção (KARDEC; NASCIF, 2017).

A falha de um ativo é intitulada um processo de degradação e não um evento (DYNAMOX, 2020). A análise da Curva de Performance (PF) por tempo de funcionamento informa as fases da condição do ativo por tempo de funcionamento. As condições envolvem falhas ocultas, potenciais, funcionais e total. Seu objetivo é demonstrar o intervalo entre a Falha Potencial e a Falha Funcional., momento em que correções possam ser executadas por meio de manutenções preditivas e sensitivas. “O desempenho ou condição de um ativo declina ao longo do tempo, levando a falha funcional, isto é, perda de função para a qual se destinava” (DYNAMOX, 2020). A Figura 1 ilustra sua construção.

Figura 1 - Curva Performance X Tempo de Funcionamento.



Fonte: Teles (2019, p.21).

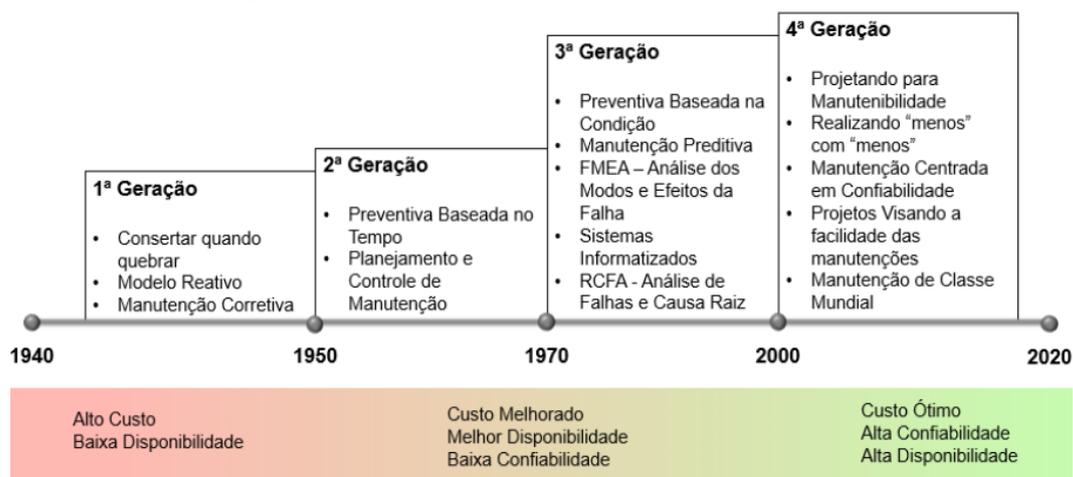
Ao optar por algum tipo de manutenção deve-se levar em consideração fatores econômicos. Para tanto, analisa-se a viabilidade de efetuar o reparo das falhas de forma corretiva ou por meio de ações preventivas. Além de considerar as perdas e custos por paradas na produção, aspectos relacionados à segurança e ao meio ambiente. Com isso, a manutenção corretiva é indicada quando na instalação há um equipamento em *stand-by*. Em situações em que não é possível prevenir a falha, o impacto da falha é pequeno ou nulo ou são baixos os custos para reparo, mostra-se inviável a opção do uso da manutenção preventiva (SOEIRO *et al.*, 2017, p. 17).

3.2.1. Manutenção Corretiva

Conforme evidencia Almeida (2017), a manutenção corretiva ocorre quando há paradas imprevistas de uma máquina ou equipamento que opera dentro de um processo executando sua função. A interrupção de suas atividades compromete os indicadores de entrega e qualidade, o que exige que as equipes de manutenção executem o reparo o mais breve possível. O autor afirma que essa parada imprevista, mesmo realizada rapidamente produz prejuízos provenientes da interrupção da produção, ociosidade de funcionários, além da urgência na aquisição de peças ocasionando altos custos de compra. Entretanto, é possível otimizar processos e recursos com uso da manutenção corretiva, desde que ela seja executada e administrada de maneira organizada, até mesmo se fazendo do uso de tecnologias (ALMEIDA, 2017).

Na primeira geração da manutenção entre meados de 1940 a 1950, as indústrias eram poucas mecanizadas, os equipamentos utilizados não possuíam baixa tecnologia, baixa velocidade, além de serem superdimensionados. Por sua vez, o homem mantenedor não apresentava seu pensamento explorado, ou seja, “não havia a necessidade de pensar”. Com isso, não se fazia necessário executar uma manutenção sistematizada, mas sim práticas destinadas à limpeza, lubrificação e reparos após as ocorrências de defeitos. Portanto, a manutenção era totalmente e plenamente corretiva (SOEIRO *et al.*, 2017, p. 15). A Figura 2 evidencia a evolução das 4 gerações da manutenção.

Figura 2 - Evolução das Gerações da Manutenção.



Fonte: Teles (2019, p. 17).

Uma das vertentes da manutenção corretiva refere-se à manutenção corretiva planejada, definida como a ação de correção de desempenho e/ou das funções de

instalações, que foi minimizada o longo do uso e da vida útil do equipamento. As intervenções da manutenção corretiva planejada são baseadas por meio de acompanhamentos de parâmetros de condições do equipamento monitorado. Uma de suas vantagens é que seu planejamento prévio pode ser efetuado por meio de uma informação proveniente e com auxílio de um outro tipo de manutenção (KARDEC; NASCIF, 2017).

Quando ocorre inesperadamente a longa interrupção de uma planta podem ocorrer prejuízos significativos. Com isso, em casos em que a manutenção corretiva é escolhida para um equipamento crítico, deve-se tomar mão do uso de recursos a fim de minimizar possíveis impactos gerados. Contudo, faz-se necessário, além corrigir a falha, identificar a causa raiz dessas interrupções com o intuito de evitar que a mesma ocorra novamente (XENOS, 2014).

De acordo com o Documento Nacional do ano de 2013, do 5º congresso mundial de manutenção e gestão de ativos, o qual apresenta a situação da manutenção no Brasil, mais especificamente a representação de alguns anos de estudo da aplicação das horas totais de cada tipo de manutenção sobre as horas totais de manutenção. A Figura 3 demonstra a Tabela com informações sobre o percentual de aplicação dos recursos na manutenção ao decorrer dos anos.

Figura 3 - Aplicação da Mão de Obra da Manutenção.

Aplicação dos Recursos na Manutenção (%)				
Ano	Manutenção Corretiva	Manutenção Preventiva	Manutenção Preditiva	Outros
2013	30,86	36,55	18,82	13,77
2011	27,40	37,17	18,51	16,92
2009	26,69	40,41	17,81	15,09
2007	25,61	38,78	17,09	18,51
2005	32,11	39,03	16,48	12,38
2003	29,98	35,49	17,76	16,77
2001	28,05	35,67	18,87	17,41
1999	27,85	35,84	17,17	19,14
1997	25,53	28,75	18,54	27,18
1995	32,80	35,00	18,64	13,56
Hh (serviços de manutenção) / Hh (total de trabalho)				

Fonte: Abramam (2013).

3.2.2. Manutenção Preventiva

Na manutenção Preventiva atividades são efetuadas em intervalos de tempos predeterminados previamente ou conforme recomendações e/ou critérios prescritos. Seu objetivo circunda em reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas ou de reduzir a degradação do funcionamento de um item, segundo a NBR 5462 (ABNT, 1994).

Diferentemente da estratégia da manutenção corretiva, a manutenção preventiva visa evitar a ocorrência de falha, ou seja, como o próprio nome diz, apresenta a finalidade de prevenir a falha. Sua utilização é de essencial viabilidade em setores nos quais a falha pode ocasionar ameaça a vida e à saúde das pessoas, como ocorre na aviação (KARDEC; NASCIF, 2017).

A segunda geração da manutenção surgiu entre meados de 1950 a 1970, em período de pós-guerra, momento histórico no qual a demanda por mercadorias aumentou drasticamente e juntamente com isso, o contingente de operação diminuiu na mesma proporção. Em contrapartida, ocorreu um grande avanço da mecanização e complexidade das instalações. Desse ponto em diante, surgiu a necessidade de aumento da disponibilidade e confiabilidade das máquinas. Com intuito de dispor uma maior produtividade, a máquina não poderia ficar muito tempo ociosa. Para isso, idealizou-se a redução de evitar as falhas sofridas pelas máquinas, trazendo à tona o conceito de manutenção preventiva (SOEIRO *et al.*, 2017).

A utilização da manutenção preventiva foi reforçada em 1970, durante a terceira geração da manutenção, com o avanço da informática permitindo assim, maior controle sobre o planejamento da manutenção e início do conceito de confiabilidade na engenharia de manutenção. A partir da terceira geração, a confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade passam a medir o desempenho da manutenção (SOEIRO *et al.*, 2017).

Em concordância com Almeida (2018), na manutenção preventiva deve se utilizar de recursos que permitam o controle de execução de atividades necessárias, com intuito de garantir o cumprimento dos prazos, das datas programadas e das atividades a serem executadas. O autor complementa que esse documento deve conter todas as informações pertinentes para a realização das atividades de manutenção, juntamente com um cronograma de execução, intitulado plano de manutenção preventiva.

Contudo, a manutenção preventiva tem uma possível desvantagem, a troca prematura de peças. Como a manutenção é realizada por intervalos determinados de tempo, pode ser efetuada sem necessidade ou antes do necessário. Assim sendo, conforme

Teles (2019), esse tipo de manutenção oferece resultados satisfatórios, se aplicado somente em apenas 11 % dos equipamentos de uma unidade industrial. Caso o porcentual de aplicação ultrapassar esse valor, a manutenção preventiva deixa de ser eficaz e a empresa acaba disponibilizando gastos desnecessários.

A manutenção preventiva envolve tarefas sistemáticas, como inspeções e troca de peças. Contudo, as trocas de peças podem ocorrer antes do fim de sua vida útil, tornando maior o custo da manutenção preventiva. Entretanto, com essas intervenções periódicas baseadas no tempo, pode ocorrer a diminuição das ocorrências de falhas e paradas imprevistas, o que se mostra como uma vantagem quando comparada a manutenção corretiva (XENOS, 2014).

Entre as desvantagens da manutenção preventiva destaca-se a possibilidade de a execução da manutenção preventiva introduzir falhas aos equipamentos e às instalações, falhas humanas e de sobressalentes, contaminações introduzidas no lubrificante, por exemplo, e danos provenientes de partidas e paradas bruscas em equipamentos (KARDEC; NASCIF, 2017).

3.2.3. Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva ou manutenção controlada, conforme a norma NBR5462, é uma manutenção que permite a garantia da qualidade de serviço desejada, tendo como base para isso a aplicação de forma sistemática de técnicas de análise. Para tal utiliza-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, a fim de reduzir a quantidade de aplicação da manutenção preventiva e diminuir a ocorrência de aplicação de manutenção corretiva (ABNT, 1994).

A manutenção preditiva surge como uma quebra de paradigma na manutenção e tem sido largamente divulgada. De certa forma se apresenta alheia aos outros tipos de manutenção. Proveniente da tecnologia atual avançada, a manutenção preditiva é tratada de forma diferenciada, semelhante à uma ciência avançada destinada apenas à pessoal especializado. Os avanços tecnológicos atualmente, possibilitam o emprego de várias técnicas de manutenção preditiva, capazes de apresentar alta eficiência e eficácia, conseqüentemente, fornecendo bons frutos para a empresa (SOEIRO *et al.*, 2017).

A aplicação da manutenção preditiva, como afirma Nepomuceno (2002), na realização de monitoramento e análise dos parâmetros, necessita de um investimento inicial, destinado à aquisição de equipamentos e instrumentos. O autor complementa que

a utilização deste tipo de manutenção permite uma identificação da falha antes de a mesma ocorrer. Entretanto, não basta simplesmente realizar o monitoramento das condições, faz-se importante obter um pessoal treinado e capacitado, suprimindo de habilidades de interpretar os dados e formular diagnósticos precisos para realização de intervenções. Dessa forma, será ofertado melhores resultados, se comparada a outros tipos de manutenção, tendo em vista que na preditiva se intervém o mínimo possível na planta (KARDEC; NASCIF, 2017).

Atualmente, devido as tecnologias disponíveis, há a possibilidade de se ter o desenvolvimento de várias técnicas de manutenção preditiva, como é o caso da emissão acústica. A partir desta forma, as empresas passam a ter a seu dispor um aparato tecnológico de manutenção preditiva que, se bem utilizado, é capaz de trazer um resultado bastante eficaz e, conseqüentemente, de colher bons frutos para a empresa (OLIVIO; LUCATO, 2017). Tal fato influencia no lucro cessante da empresa, que se compreende ao lucro proveniente da interrupção da atividade que fornece receita à empresa, ou seja, se a empresa teve que cessar a atividade que a faz gerar receita, ela obteve um lucro cessante (TELES, 2019).

De acordo com Nepomuceno (2002), a manutenção preditiva tem como objetivo possibilitar a programação de uma atividade de forma antecipada, sendo grandes ou pequenos reparos. A identificação de forma antecipada permite reunir e providenciar todos os recursos necessários para realização, possibilitando que ela seja feita de forma mais organizada e com segurança. Além disso, possibilita o alinhamento dos executores à equipe de operação, na busca de melhores datas, de forma a não comprometer a produção.

Atualmente, existem quatro técnicas preditivas que podem ser aplicadas nas indústrias nacionais, sendo elas: análise de vibrações, análise de lubrificante, termografia e aplicação de ultrassom (VIANA, 2008).

3.2.3.1. Análise de Vibrações

A vibração, segundo Costa (2017), é determinada como um movimento oscilatório em torno de um ponto de referência, onde essa vibração pode ser provocada por forças dinâmicas externas ou inerentes ao sistema. Essas forças podem ser geradas por defeitos contidos nos sistemas em questão, com vibrações características de falhas específicas. As

quais apresentam sua gravidade ligada aos níveis de amplitudes de vibração, que também dependem da força de excitação, massa rigidez e amortecimento.

O acompanhamento das condições, por meio de análise de vibração, apresenta-se entre os principais tipos de técnicas de manutenção preditiva. Seu objetivo é fornecer maior ênfase nos equipamentos rotativos, para os quais já possui nos dias atuais, vastas opções quanto à instrumentação, aparelhagem e de softwares para aplicação. Portanto, este fato a torna bastante robusta e bem confiável (KARDEC; NASCIF, 2017).

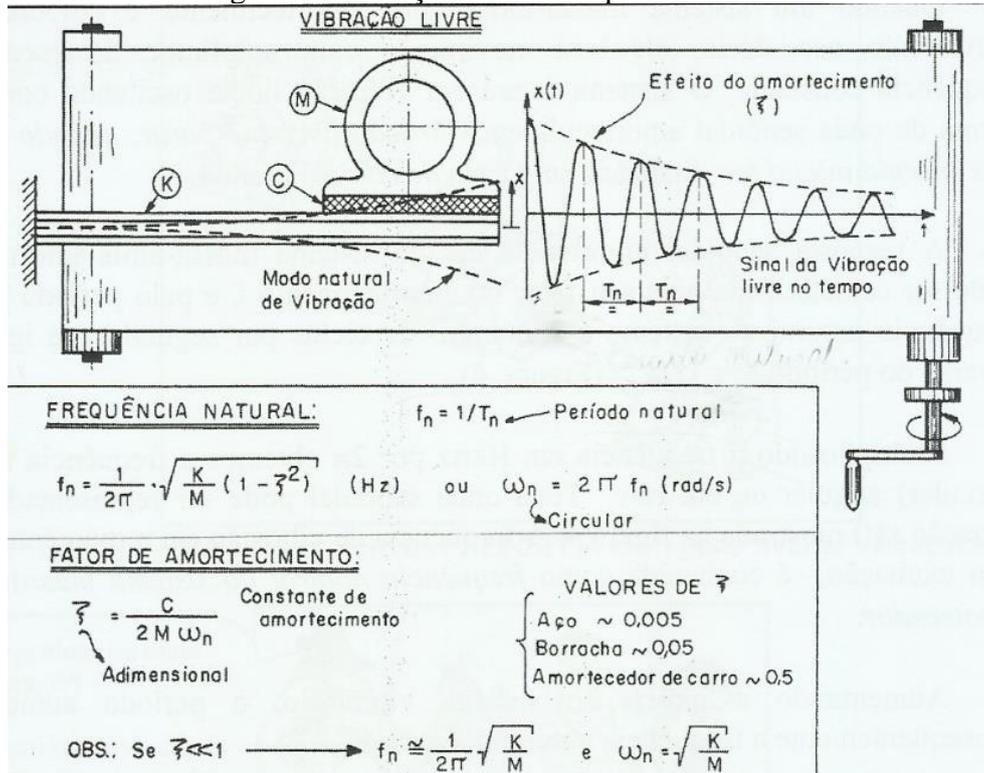
De acordo com Almeida e Almeida (2014), todos os sistemas vibracionais contêm três componentes básicos, que interagem entre si e que são responsáveis por produzir comportamentos dinâmicos. Esses componentes são: mola (que se apresenta na forma de rigidez ou flexibilidade), amortecedor (na forma de dissipação de energia) e finalmente a massa (que se apresenta em forma de inércia).

Por sua vez, Mobius (2017) explica que a frequência é a quantidade de vezes que um evento ocorre em um determinado período (1s), normalmente medida em Hz, e período é o inverso da frequência, conforme Equação 1.1.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.1)$$

Para descobrir a frequência natural de um corpo, introduz-se um distúrbio inicial ao corpo fazendo-o vibrar. Ao deixa-lo vibrar por si só (sem a presença de forças externas sobre ele), a frequência com que ele passa a oscilar é a sua frequência natural (SHIGLEY *et al*, 1969). Conforme Almeida e Almeida (2014), mola, amortecedor e massa se relacionam com a frequência de forma que com o aumento da massa, aumenta-se o período e diminui-se a frequência natural. Por sua vez, com o aumento da rigidez da estrutura, a frequência natural aumenta. A Figura 4 ilustra os parâmetros supracitados e as fórmulas que os relacionam.

Figura 4 - Vibração livre e Frequência natural.



Fonte: Almeida; Almeida (2014, p. 10).

Em que:

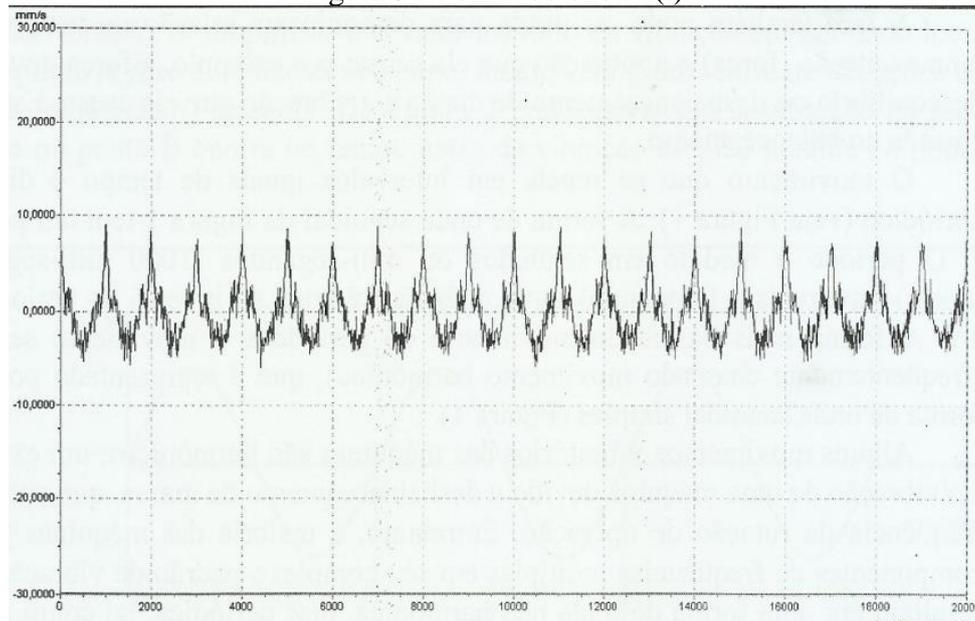
M – Massa do motor;

K – Rigidez ou constante de mola da viga na direção vertical;

C – Constante de amortecimento do conjunto.

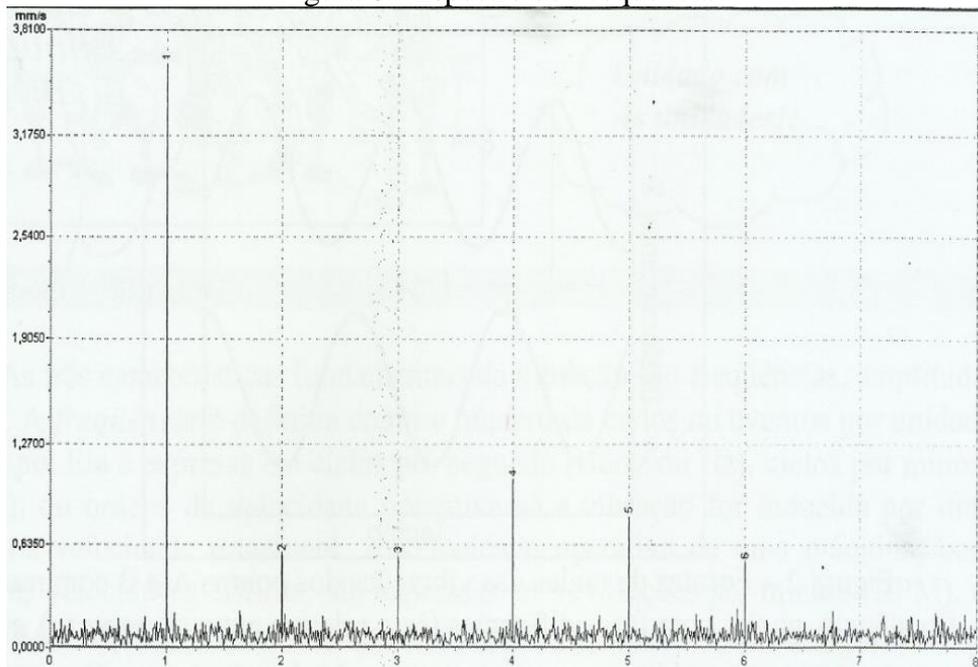
Considerando o sistema mola, exposto na Figura 4, utilizando como exemplo um motor colocado em uma vibração forçada, através dessa consegue-se observar o período natural da vibração, que devido ao efeito do amortecimento tem seu sinal reduzido (ALMEIDA; ALMEDA, 2014).

O sinal de vibração de um equipamento é composto usualmente por muitas frequências, que ocorrem simultaneamente. Estas podem ser analisadas por amostragem de amplitude x tempo, o qual intitula-se de espectro de sinal em função do tempo ou ainda de forma de onda, dispostas na Figura 5 e na Figura 6. A partir do espectro, aplicando o FFT (*Fast Fourier Transform*), definido como a transformada rápida de Fourier, que é o cálculo que converte a forma de onda no espectro. Finalmente pode-se plotar um espectro em função da frequência, pela amplitude de vibração x frequência, o qual mostra o nível de vibração que o equipamento está sujeito em função de uma frequência (ALMEIDA; ALMEDA, 2014).

Figura 5 - Forma de onda $x(t)$.

Fonte: Almeida; Almeida (2014, p. 54).

Figura 6 - Espectro de Frequência.



Fonte: Almeida; Almeida (2014, p. 54).

De acordo com Emerson (2006, p.15):

Para simplificar esse processo, os modernos analisadores de vibração utilizam a Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*). Uma FFT é uma transformação de dados de domínio de tempo (amplitude em função do tempo), em dados de domínio de frequência (amplitude em função da frequência), feita por um computador (microprocessador).

As realizações de medições de vibração de forma periódica, apresentam o objetivo de realizar o acompanhamento das performances das máquinas. Para tanto, utilizam como premissa acompanhar as intensidades de vibração geradas através do funcionamento, a fim de garantir a qualidade das máquinas fornecendo, por meio das medições e análises de vibração, relatórios de diagnósticos das máquinas contendo recomendações de intervenções para correção de falhas (LABRE, 2019). Para a aplicação da manutenção em equipamentos rotativos é usada como fundamento a Norma mundialmente reconhecida que é a norma ISO 10816 a qual teve sua primeira versão publicada em 1995, esta norma fornece em valores quantitativos quais limites de vibração em parâmetros de velocidade podem ser aceitáveis em equipamentos rotativos. A Figura 7 ilustra a Norma ISO 10816 para velocidade supracitada.

Figura 7 - Norma ISO 10816, limites para vibração.

Norma ISO 10816 - Classe de equipamento				
R.m.s (mm/s)	Classe I Máq. Pequena	Classe II Máq Média	Máquinas Grandes	
			Classe II fundação rígida	Classe IV fundação flexível
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	A
1,8				
2,8	C	C	B	B
4,5				
7,1	D	D	C	B
11,2			C	
18			D	C
28			D	D
45			D	

Zona A Verde: valores de vibração operacionais.
 Zona B Amarelo: Operação contínua sem restrições
 Zona C Laranja: Condição é aceitável apenas por um período limitado de tempo.
 Zona D Vermelha: Valores de vibração perigosos – falha iminente.

Fonte: Nascimento (2019, p. 1).

Como mencionado anteriormente, Almeida e Almeida (2014) citam os três parâmetros de vibração: velocidade, deslocamento e aceleração. Cada um fornecerá melhores resultados para investigar determinada faixa de frequência e, conseqüentemente, as falhas se apresentarão melhor dentro dessa determinada faixa. A velocidade terá melhor funcionalidade para visualizar falhas em baixa (0 a 1 000 Hz) e média frequência (1 000 a 2 000 Hz), como falhas de desbalanceamento, desalinhamento,

eixo empenado e etc., que são falhas que se apresentaram na frequência de rotação (geralmente 30 ou 60 Hz) em 1xRPM ou 2xRPM. Já para identificar defeitos na faixa de média a alta frequência é recomendável a utilização do parâmetro de aceleração (acima de 2 000 Hz), identificando falhas de rolamentos que se apresentem geralmente na frequência de 3 000 a 5 000 Hz e falhas de engrenamento. As falhas de engrenamento são identificadas através da frequência de Engrenamento obtida através da Equação 1.2:

$$F_e = Z * n \quad (1.2)$$

Em que:

Z – Número de dentes da engrenagem;

n – Rotação do eixo da engrenagem.

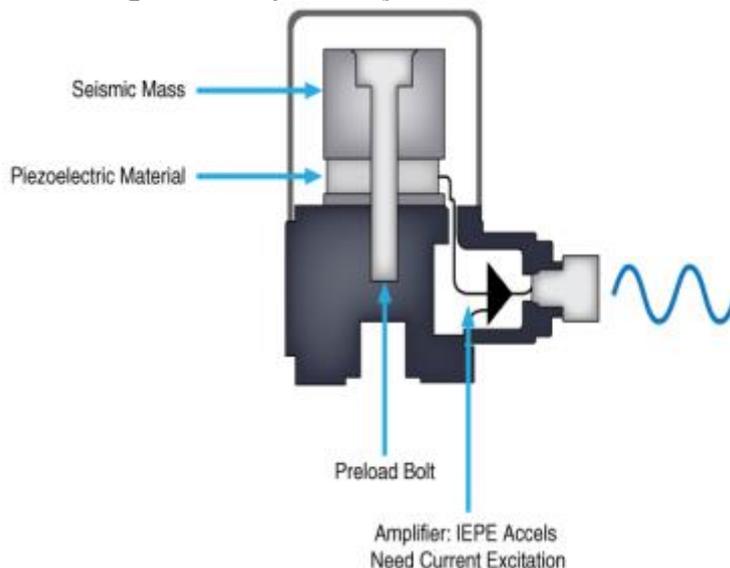
3.2.3.2. Sensores de Vibração

Para a realização de medições de vibrações em partes estacionárias de equipamento rotativos, pode-se utilizar três principais tipos de sensores de vibrações sendo eles sensores de deslocamento, de velocidade e de aceleração. As escolhas de quais sensores a serem utilizados estão relacionados com à frequência de interesse e também aos níveis de sinais envolvidos no processo (SKF, 2004).

Os sensores acelerômetros são sensores que não necessitam de fonte de alimentação para seu funcionamento e possuem como característica operar dentro de uma larga faixa de frequências e de temperatura. A instalação dos mesmos ocorre na parte externa dos equipamentos a serem monitorados. As tecnologias de sensores acelerômetros que estão disponíveis no mercado são os piezoelétricos, piezorresistivos e os capacitivos (SILVA, 2013).

Atualmente, a maioria das medidas de vibrações são executadas da medida de aceleração, para somente assim, se obter a velocidade ou o deslocamento, integrando uma ou duas vezes respectivamente. Portanto, o sensor utilizado pode ser o acelerômetro, que consiste em um sistema de massa mola, classificados como transdutores sísmicos. O mais comum é o acelerômetro de cristais piezoelétricos pré-tensionados por uma massa. Esses cristais produzem um sinal elétrico assim que pressionados proporcional à aceleração (KARDEC; NASCIF, 2017). A Figura 8 ilustra um sensor acelerômetro.

Figura 8 - Representação do Sensor Acelerômetro.



Fonte: FACULDADE ANHANGUERA JAGUARÁ DO SUL (2018, p. 52).

Esse tipo de sensor possui como característica ampla faixa de frequência, com pesos e dimensões reduzidas se comparado a outros sensores. Além disso, apresenta elevada resistência em altas temperaturas (KARDEC; NASCIF, 2017).

O sensor acelerômetro dotado de um cristal piezoelétrico, exposta na Figura 8, é utilizado para coleta de vibrações e funciona como um transdutor, convertendo o sinal mecânico da vibração em sinal elétrico reconhecido por um analisador de dados de vibrações. O acelerômetro faz-se necessário para medir a vibração ou a aceleração do movimento de uma estrutura ou de um equipamento. A força causada por uma vibração ou alteração do movimento (aceleração) atua de forma que a massa "comprima" o material piezoelétrico, produzindo uma carga elétrica proporcional à força exercida sobre ele (ALMEIDA; ALMEDA, 2018).

Com diferentes tipos, os sensores acelerômetros possuem discrepantes sensibilidades e massas, que dependem diretamente da medição da aceleração desejada, geralmente em mV/g (Milivolt por g – que é unidade de aceleração da gravidade). Em sua maioria, os acelerômetros piezoelétricos relativamente extensos exibem maiores valores de sensibilidade. No entanto, a massa do acelerômetro não pode exceder a fração de um décimo da massa dinâmica da peça ou do componente que está sendo medido pelo sensor (SILVA, 2013).

Exposto na Figura 9, o sensor acelerômetro opera na frequência de 1 a 10 000 Hz. Podendo ainda, medir baixas frequências na ordem dos 0,02 Hz. Além de serem fortemente resistentes aos choques, quedas, umidade, poeiras, óleo e outras

agressividades ambientais e de manuseamento. Assim sendo, mostram-se adequados para serem utilizados em indústria compostas por ambientes agressivos (MARÇAL; SANTOS, 2013).

Figura 9 - Imagem de um Acelerômetro de 100mV/g.



Fonte: FACULDADE ANHANGUERA JAGUARÁ DO SUL (2018, p. 54).

A utilização desses sensores desenrola-se, em sua maioria, de forma *offline*. Todavia, existem sensores que possuem sistemas *online* de medição. Estes últimos oferecem um monitoramento automatizado das máquinas em que são empregues. Com eles, as informações são coletadas 24 horas por dia. Usualmente, são utilizados em locais onde o acesso é restrito a presença humana ou em equipamentos rotativos situados em sistemas críticos e como resultado ofertam uma abordagem proativa à confiabilidade das máquinas (MARTINS; SARTO, 2014).

O desenvolvimento tecnológico atual possibilitou a inclusão no mercado de diversos tipos de sensores de vibração. Os sensores *online* abriram portas para os sensores *wireless* com comunicação via *gateway* e *bluetooth*. Esse último exibe limitação de distâncias e necessidade de deslocamento até o local de instalação do equipamento para realizar as medições de vibração. Portanto, atua de forma *offline*, mas se conectado com um *gateway* permite exploração de sensoriamento *online* (DYNAMOX, 2021).

3.2.3.3. Termografia Infravermelha

A temperatura é uma variável essencial para qualquer situação e tipo de processo. Sua importância vincula-se à diferença que proporciona. Por um exemplo simples, desenrola-se do fato de qualquer desvio pequeno na temperatura corporal, indicar

anormalidades ocorrendo. Na indústria a temperatura é utilizada na constituição de processos, como na fundição, para geração de calor em uma caldeira. Portanto a temperatura é de suma importância e extremamente útil (ITC, 2019, p. 3).

O acompanhamento da variável temperatura permite constatar alterações nas condições de um equipamento e de componentes. Como exemplo, variações de temperaturas em mancais de máquinas rotativas podem indicar problemas relacionados a lubrificação. Por sua vez, temperaturas elevadas podem indicar, conforme Kardec e Nascif (2017):

- Na superfície de equipamentos estacionários, pode indicar danos ao isolamento;
- Em mancais de máquinas rotativas, pode indicar desgaste ou problemas de lubrificação;
- Em barramentos e equipamentos elétricos, pode indicar mal contato.

A termografia revela-se um tipo de sistema de medição em que não há contato de temperaturas. Para tal, intitula-se uma técnica de medição realizada na superfície de um corpo, que emite uma imagem termográfica no espectro infravermelho gerada pela radiação térmica de um corpo (QUERINO, 2015). Uma das vantagens de sua utilização envolve a não necessidade desse contato, pois utiliza sensor remoto. Tal abordagem oferece segurança ao usuário, haja vista que o mesmo se mantém afastado do perigo de contato com superfícies quentes ou com eletricidade. Sendo assim, a termografia não afeta no funcionamento do alvo.

A técnica abordada se apresenta e permite a visualização em duas dimensões. Primeiramente possibilita a visualização da superfície externa do mesmo e por intermédio de uma imagem pode-se descobrir onde estão os problemas. Através de padrões térmicos de forma, a análise da imagem pode ser realizada. Imagens essas que são feitas em tempo real, o que permite rápidas varreduras de alvos estacionários (ITC, 2019).

De acordo com ITC (2019), as definições do que é calor e do se denomina temperatura por vezes se misturam e se torna difícil separá-las, isso devido à proximidade de seus conceitos que além disso ainda estão relacionados um ao outro. Uma grande diferença que auxilia é o fato de temperatura ser relativa, ou seja, dois objetos a 100° C, misturados não tem sua temperatura dobrada e continua 100 °C essa mistura enquanto o calor não é relativo, o que significa que se dois objetos cada um com 100 J de energia são misturados sua energia no final é de 200 J.

A forma com que a energia é transferida através das fronteiras de um dado sistema ou ambiente para um outro sistema ou ambiente com temperatura menor que o primeiro é chamado de calor, com isso pode-se definir calor como sendo um fenômeno de energia em trânsito (SONNTAG, 2018). Assim sendo o calor que um objeto contém é a energia cinética total das moléculas que o compõem (ITC, 2019). Energia esta que é criada por meio da conversão de outras formas de energia, e é medida por joule (J), watt-segundo (Ws), quilowatt-hora (kWh) e newton-metro (Nm) no SI (ITC, 2019).

Por sua vez, a temperatura para um corpo depende exclusivamente da velocidade ou da agitação das moléculas. Dessa forma, pode ser definida como a medida do grau de agitação dessas moléculas. Portanto, é diretamente proporcional à agitação das mesmas, ou seja, quanto maior o grau de agitação, maior temperatura de um corpo. A temperatura pode ser medida pelas unidades do SI em kelvin (k) ou em graus Celsius (°C) (BERTOLDO, 2009).

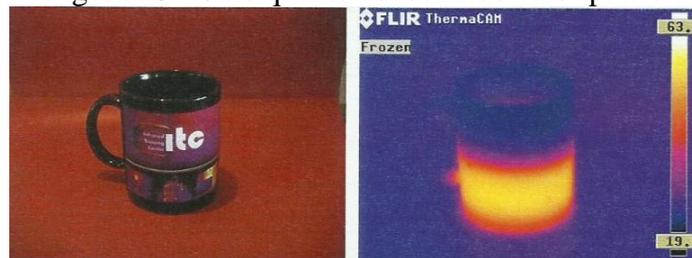
Em concordância com BERGMAN *et al* (2014), a transferência de calor ou simplesmente o calor pode ser definido como a energia térmica em trânsito que ocorre devido a diferença de temperaturas no espaço. Ou seja, é a energia que transcorre do corpo mais quente para o mais frio. O autor ainda afirma que irá ocorrer transferência de calor quando existir discrepância entre as temperaturas em um meio ou diferença de temperaturas entre os meios.

De acordo com SILVA *et al.* (2018), a segunda lei da termodinâmica é expressa pelo princípio da conservação da energia. Este princípio define que: a energia não pode ser criada e nem destruída, somente convertida. Por sua vez, Sonntag e Borgnakke (2018) explicam que esta lei também indica que as transferências de calor ocorrem de forma espontânea em um certo sentido e não no oposto. Por exemplo, uma xícara de café quente que esfria pelo fato de transferir calor para o meio ambiente. Dessa forma, pode-se dizer que o calor flui de forma espontânea do corpo mais quente para o corpo mais frio até atingir equilíbrio (SONNTAG; BORGNAKKE, 2018).

Toda troca de calor entre corpos somente ocorre mediante a diferença de temperatura entre eles. Para tanto, há três diferentes mecanismos de transferência de calor entre esses corpos, sendo eles condução, convecção e radiação (ÇENGEL; GHAJAR, 2009). Primeiramente, a condução conceitua-se como a transferência de energia térmica de moléculas para moléculas, causadas pelas colisões entre elas. Dessa forma, uma molécula apresenta maior temperatura e movimento mais forte que a outra. Portanto, transfere um pouco de energia para a molécula mais lenta, podendo repetir esse processo

em reação de cadeia entre as moléculas. Então, para ocorrer o fenômeno de condução deve haver contato entre as moléculas e uma diferença de entre suas temperaturas. A ocorrência deste fenômeno pode ser entre objetos diferentes, dentro de um mesmo objeto, entre gases, líquidos e sólidos (nesses, a única forma de transferência de calor possível é a condução, alguns raros e com valor elevado podem transmitir por radiação) (ITC, 2019). A ilustração desta forma de transferência de calor está disponível na Figura 10.

Figura 10 - Café quente conduzindo calor para a xícara.



Fonte: ITC (2019, p. 50).

A condução pode ser medida através da Equação 2.1.

$$Q(t) = \frac{kA * (T1 - T2)}{L} \quad (2.1)$$

Na qual:

k – Condutividade do material (W/m*K);

A – Seção transversal (m²);

T1 – T2 – Diferença de temperatura (K);

L – Comprimento do percurso de condução (m).

A convecção, também intitulada um mecanismo de transferência de calor, ocorre entre superfícies sólidas e líquida ou gás adjacentes. Está relacionada com o movimento de um fluido, que quanto mais veloz, maior também será a transferência de calor por convecção, podendo ser ela forçada ou natural. A convecção forçada ocorre quando o líquido é forçado a fluir sobre uma superfície por um meio externo, como um ventilador ou bomba por exemplo. Já a convecção natural decorre quando a movimentação do fluido no processo se dá por meio de forças de flutuação, devido as diferenças de densidade causadas pela variação da temperatura do fluido. A taxa de transferência de calor por convecção é obtida pela Lei de Newton do Resfriamento, exposta na Equação 2.2 (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).

$$Q_{conv} = hA_s (T_s - T_{\infty}) \quad (2.2)$$

Na qual:

Q_{conv} – Taxa de transferência de calor por convecção (w);

h – Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção ($W/m^2 \cdot K$);

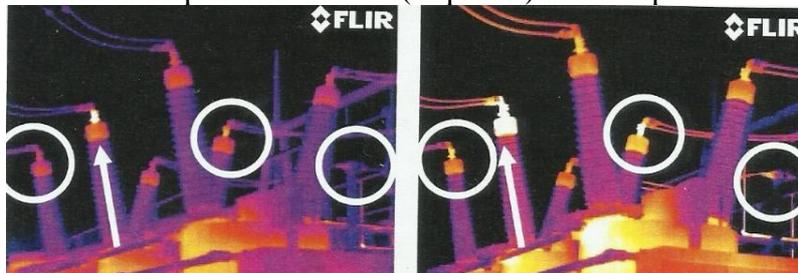
A_s – Área da Superfície em que a convecção ocorre;

T_s – Temperatura da Superfície;

T_{∞} – Temperatura do fluido suficientemente longe da superfície.

Na Figura 11 pode-se observar que a indicação por flecha está na conexão quente no topo do interruptor. Por sua vez, na imagem da esquerda ela trocou calor com o vento, não sendo possível perceber que a conexão em questão apresentava algum ponto quente. De maneira discrepante, na imagem da direita consegue-se observar a mesma conexão, porém com temperatura elevada e sem a presença de vento. Com isso, neste caso ocorreu um resfriamento ocasionado pelo vento (ITC, 2019).

Figura 11 - Interruptor sob o vento (esquerda) e interruptor sem vento (direita).



Fonte: ITC (2019, p.58).

Em concordância com Frota e Schiffer (2006), a forma de transferência de calor entre dois corpos separados por uma distância qualquer se denomina transferência por radiação. Esta se dá por meio da transferência de calor por meio da emissão e absorção de radiação térmica, através de ondas eletromagnéticas da energia. Diferentemente da transferência de calor por condução, que necessita de um meio para ocorrer, a transferência de calor por radiação não necessita, podendo ocorrer até mesmo no vácuo. O fluxo de calor envolvido na transferência por radiação é calculado por meio da Equação 2.3.

$$q_r = hr * (\theta - \theta_r) \quad (2.3)$$

Na qual:

q_r – Intensidade do fluxo térmico por radiação (W/m^2);

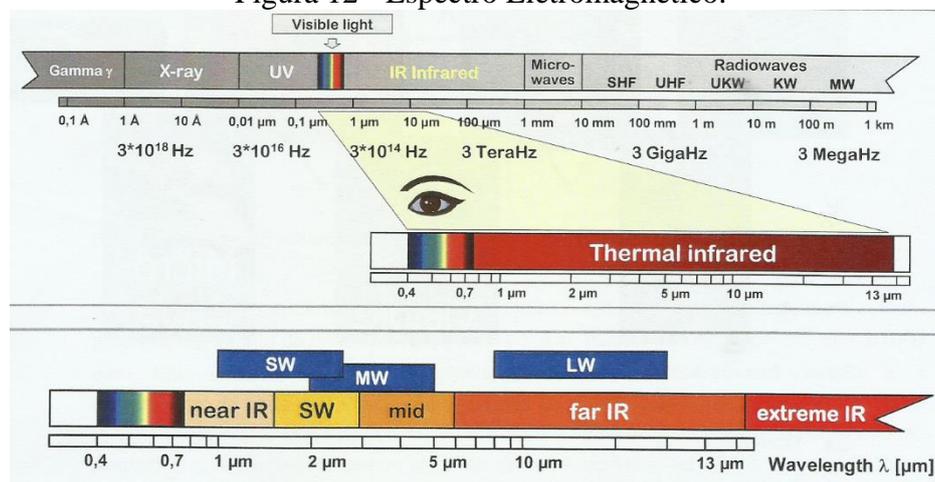
h_r – coeficiente de trocas térmicas por radiação ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$);

θ – Temperatura da Superfície da parede considerada ($^\circ\text{C}$);

θ – Temperatura radiante relativa às demais superfícies ($^\circ\text{C}$).

A radiação térmica ocorre na faixa do espectro eletromagnético inteiro. Sua intensidade depende da temperatura da fonte e da parte do espectro que está sendo observada. As temperaturas as quais se está sujeito a intensidades maiores encontra-se na faixa de onda infravermelha (acima da faixa visível ao olho humano), como exposto na Figura 12.

Figura 12 - Espectro Eletromagnético.



Fonte: ITC (2019, p. 71).

É nesta faixa de onda que os termovisores operam, para que seja possível utilizar a termografia infravermelha como uma técnica preditiva, de maneira assertiva e bastante eficaz (ITC, 2019).

3.2.3.4. Pirômetro

Devido a diversidade de processos industriais, existe a necessidade de utilização de diferentes tipos de máquinas e matérias primas afim de se obter determinados produtos. A demanda desses produtos exige alto grau de qualidade dos mesmos, com isso, nesses processos industriais há a necessidade de se utilizar de formas precisas de controle de variáveis (pressão, nível, temperatura e etc.,) que influenciam durante o processo para

atingimento dos altos atributos necessários nos produtos. Para isso faz-se a uso de instrumentos capazes de medir as variáveis envolvidas nos processos determinados. (PAVANI, 2011)

A temperatura é umas das variáveis atualmente muito útil e presentes em processos industriais e de manufaturas. Com isso o acompanhamento desta variável por meio de medição se mostra bastante pertinente. (BOJORGE, 2017).

Além disso a temperatura, em grande parte das vezes, dentro de processos industriais é a primeira indicação da existência de possíveis problemas relacionados a conjuntos elétricos e mecânicos (FLUKE, 2022).

De acordo com DILLENBURG *et al* (2000), para realizar o controle de temperatura em aplicações industriais pode-se utilizar o pirômetro infravermelho. Os Pirômetros infravermelho apresentados na Figura 13, podem também ser chamados de termômetros infravermelho, eles podem realizar aferições das temperaturas superficiais, dados que são adquiridos através da medição da energia infravermelha que está sendo radiada pela superfície alvo. (FLUKE, 2022).

Figura 13: Pirômetro Infravermelho



Fonte: FLUKE (2022, p. 24).

Nos pirômetros infravermelhos não há a disponibilidade de configuração da emissividade. Como relatado anteriormente a emissividade é a propriedade radiante da superfície, definida pela taxa de radiação emitida por um corpo em uma determinada temperatura em um comprimento de onda que varia de 0 a 1. Essa propriedade fornece uma medida da eficiência na qual uma superfície emite energia em relação ao corpo negro (BERGMAN, T. et al., 2014).

3.2.3.5. Análise de Lubrificante

O lubrificante tem uma função indispensável para a os equipamentos industriais. Dentre suas funções destaca-se o controle de atrito, pois o lubrificante tende a fornecer, quando em boas condições de uso, um filme lubrificante entre as superfícies móveis dos componentes de uma máquina, o que reduz significativamente o atrito natural entre essas partes. Dessa forma, exigirá menos esforços e energias para realizar os movimentos necessários. Outra função essencial é controle de desgaste, pois quando existe contato entre duas superfícies, em que as duas se movem ou uma fica estática, um desgaste natural é gerado. Para tanto, o lubrificante contribui para diminuição desse desgaste. Sequencialmente, o lubrificante atua no controle de corrosão, de forma que o filme de lubrificante evita a entrada de ar e umidade, o que reduz a quantidade de oxidação das superfícies. Ainda atua no controle de temperatura ao realizar troca de calor entre o lubrificante bombeado e as superfícies das peças, mantendo o equipamento com uma temperatura de funcionamento adequada. Tal função ocorre na utilização de óleos refrigerantes em compressores, turbinas e etc. (SKF, 2013).

Com isso, a utilização e manuseio de óleos lubrificantes deve ser feita da melhor forma e seguindo determinados procedimentos, haja vista que sua aplicação inadequada pode ser prejudicial para os equipamentos. Quando utilizado em excesso pode causar altas temperaturas. Entretanto, quando pouco utilizado (em falta), aumenta o atrito e desgaste dos componentes. Em situações de contaminação por alguma partícula pode produzir resultados negativos dentro dos sistemas. Dessa forma, faz-se necessário traçar planos de lubrificação que contemplem trocas ou análises desses lubrificantes periodicamente, a fim de evitar perdas de suas funções e, conseqüentemente, de sua eficiência (SKF, 2013).

Visando manter o lubrificante em boas condições, é aplicada a análise do lubrificante, a fim de conhecer sua real condição. Atualmente, existem duas técnicas de análise de óleos mais utilizadas, são elas: análise de óleos lubrificantes em laboratório

para verificar suas principais características; e a análise ou contagem de partículas presentes no óleo lubrificante proveniente de desgastes dos componentes dos equipamentos (KARDEC; NASCIF, 2017). A Figura 14 evidencia a Tabela de Contagem de Partículas conforme ISO 4406-99.

Figura 14 – Norma ISO 4406-99.

Quadro ISO 4406		
Número de partículas	Número de partículas por ml	
	Mais de	Até e inclusive
24	80.000	160.000
23	40.000	80.000
22	20.000	40.000
21	10.000	20.000
20	5.000	10.000
19	2.500	5.000
18	1.300	2.500
17	640	1.300
16	320	640
15	160	320
14	80	160
13	40	80
12	20	40
11	10	20
10	5	10
9	2.5	5
8	1.3	2.5
7	.64	1.3
6	.32	.64

Fonte: PARKER (2019, p. 3).

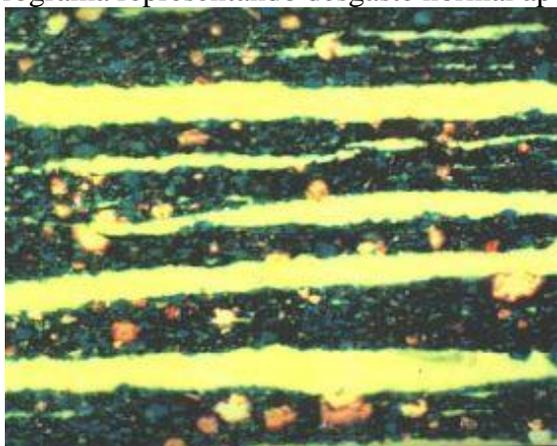
Entre as possíveis falhas ocorrentes em um equipamento, as mais comuns são as contaminações dos lubrificantes, cargas excessivas e temperaturas elevadas, deficiência das propriedades dos lubrificantes (como viscosidade, aditivos, etc.), além dos defeitos mecânicos que podem ser identificados por análise de vibrações (como desalinhamento, desbalanceamento, falhas em rolamentos, defeitos relacionados com a lubrificação) (SKF, 2013).

As análise físico-químicas consistem na retirada de uma amostra de óleo lubrificante de um sistema. Amostragem que deve ser feita em períodos pré-determinados, para acompanhamento das características dos lubrificantes, controle de suas condições e verificação da necessidade troca do lubrificante no tempo correto (KARDEC; NASCIF, 2017).

Entretanto, há vários outros tipos de ensaios para lubrificantes. A ferrografia, é um exemplo de análise de lubrificante, podendo ser óleos ou graxas, que tem a finalidade

de determinar o grau de severidade, modo e tipo de desgaste sofridos por equipamentos industriais através de uma análise morfológica (forma, aparência externa da matéria), tamanho e coloração das partículas. O resultado, exposto na Figura 15, determina a condição do lubrificante. Em casos em que a quantidade e tamanho das partículas é reduzido, a condição do lubrificante é normal. Caso contrário, ou seja, se a quantidade e tamanho das particular for superior, há a ocorrência de desgaste, o que pode culminar em uma falha da máquina (KARDEC; NASCIF, 2017).

Figura 15 - Ferrograma representando desgaste normal após aquecimento.



Fonte: LUBRIN (2021, p. 7).

Para determinar qual ensaio deve ser executado, leva-se em consideração a necessidade, o que se pretende observar e o qual o tipo de lubrificante (óleo ou graxa). Outros ensaios podem ser realizados, tais como Índices de viscosidade (que indica o efeito da variação da temperatura sobre a viscosidade de óleo), Teor de Água (que determina a presença ou não de água em óleos lubrificantes), TAN – Número de Acidez Total (que representa a massa (dada em mg de Hidróxido de Potássio – KOH) que é necessária para neutralizar os componentes ácidos contidos em uma grama de óleo e que mede a degradação do lubrificante em serviço), TBN – Número de basicidade Total (que determina os constituintes básicos nos produtos de petróleo e que também é usado para medir a degradação do lubrificante utilizado na máquina), IPC – Índice de Partículas Ferrosas (que determina o grau de incidência de detritos de material de liga ferrosa que estão presentes na amostra de óleo a ser analisada), entre outros (LABOROIL, 2012).

3.2.3.6. Emissão Acústica

Como a temperatura, o som também está presente no dia a dia das pessoas. Quando se ouve alguma coisa pode-se associar esse som a determinados fatores. Na indústria não é diferente, da mesma forma que é possível utilizar vibração e temperatura (com a termografia) para identificar as condições de uma instalação, sistema, máquina e etc., o som também tem a capacidade de ser empregado de modo a se obter resultados quanto a condição de máquinas (SKF, 2013).

O som é uma ocorrência natural que está presente na vida dos seres vivos. Esse evento possibilita que o ser vivo possa ter um nível de percepção do que está ocorrendo ao seu redor. Tal fato está relacionado com a percepção sensitiva e, conseqüentemente, a adaptação ao meio (BISCEGLI, 2004). De acordo com MORAIS *et al.* as ondas sonoras podem ser ditas como ondas mecânicas, pois se dão através da propagação da energia em um meio material.

O som pode ser dito como sendo uma sensação que é produzida no sistema auditivo das pessoas, são produzidos através de vibrações de partículas de ar as quais têm suas propagações por meio de estruturas vibrantes (BISTAFA, 2018).

As vibrações ditas são observadas dentro de faixas de frequências e podem ser consideradas como sendo rápidas e com isso podem ser denominadas como vibrações sonoras. As ondas sonoras no meio ao qual se propaga com velocidade uniforme em diversas direções produzindo neste meio compressões e distensões de forma consecutivas (COSTA, 2003).

Como ondas mecânicas, os sons são interceptados pelos ouvidos humanos e sensibilizam a audição, havendo ainda a capacidade de diferenciar diversos e diferentes tipos de sons. Mesmo quando recebidos de uma só vez, como em uma orquestra, é possível perceber e identificar os sons dos instrumentos que atuam simultaneamente (UFSM, 2009). Necessitante de um meio material para se propagar, sendo esse meio sólido, líquido e gasoso, o som, como onda mecânica, não se propaga no vácuo. Quando a fonte vibra, produz inicialmente a compressão do ar na região próxima a ela e é seguida por uma refração, o que faz com as moléculas da região em questão vibrem de forma longitudinalmente. Dessa forma, passam a perturbação para as moléculas mais próximas, que seguem para as seguintes e assim por diante (GUIMARÃES; FONTE BOA, 2004).

As ondas mecânicas longitudinais, como as ondas transversais, se propagam em uma certa velocidade. Essa velocidade depende de propriedades como a inércia, que

realiza o armazenamento de energia cinética, e as propriedades elásticas, que armazenam energia potencial (HALLIDAY, 2000). As ondas possuem velocidades constantes, no caso de um meio sólido a variação desta velocidade de propagação está relacionada com a densidade do material, ou seja, depende da relação entre o volume e a massa do material referido. Quando se trata de meios gasosos, a velocidade de propagação do som depende do tipo de gás no qual ele se propaga. Dependendo também do peso molecular e da temperatura absoluta na qual o gás se encontra. Com isso, se a temperatura do ar, por exemplo, for variada no ar a 0° C a velocidade de propagação do som é 331 m/s e a velocidade do som no ar a 20° C é 343 m/s (LAZZARINI, 1998). A Figura 16 expõe a Tabela de Velocidade do som (m/s) em alguns meios materiais.

Figura 16 - Velocidade do som (m/s) em alguns meios materiais.

Velocidade de propagação do som em diferentes meios à pressão $1,0 \cdot 10^5$ Pa			
Meio	Velocidade (m/s)	Meio	Velocidade (m/s)
Gases		Sólidos	
Ar	331	Borracha	54
Ar (20 °C)	343	Polietileno	920
Hélio	972	Chumbo	1300
Hidrogênio	1280	Prata	2700
Líquidos		Ouro	3240
Álcool metílico (25 °C)	1140	Cobre	3560
Água	1400	Alumínio	5000
Água (20 °C)	1480	Aço	5940
Água do mar (3,5% de salinidade)	1520	Granito	6000
Mercúrio (20 °C)	1450	Diamante	12000

Fonte: Gaspar (2000, p. 44).

Na Equação 3.1 demonstra-se meios para o cálculo da velocidade de propagação de uma onda mecânica longitudinal. Na qual ρ é a medida da densidade do meio no qual a onda estará se propagando, B é referente a uma medida da tendência de material em manter o volume contra as forças externas. Este último, nos líquidos e nos gases é chamado de módulo de elasticidade volumétrico e nos meios sólidos é intitulado módulo

de Young. As duas denominações representam o módulo de elasticidade de volumétrico (BORGES; RODRIGUES, 2016).

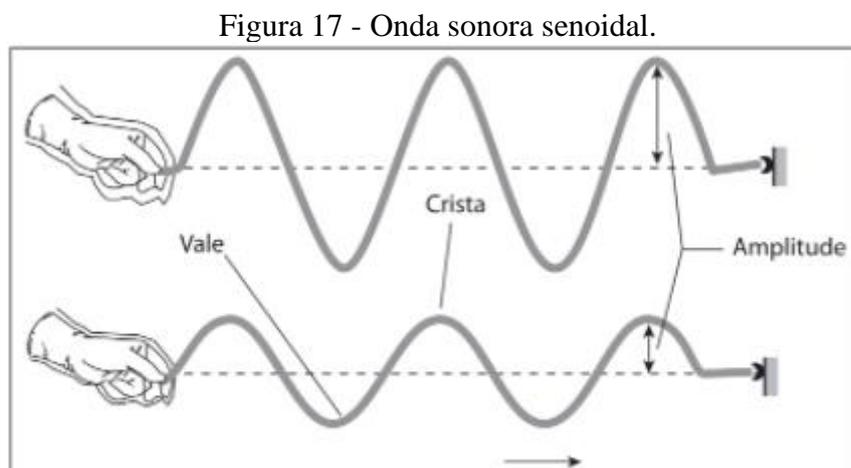
$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (3.1)$$

Através da Equação 3.1 pode-se inferir que como os sólidos possuem maior tendência em manter seu volume, ou seja, tem menor compressibilidade se comparado com líquidos ou gases, o som se propagará em velocidade maior nestes meios, mesmo sendo a densidade dos sólidos maior. Ressaltando ainda que os valores referentes a p e B dependem de temperatura e da pressão (BORGES, RODRIGUES, 2016).

A onda sonora pode ser descrita por função harmônica senoidal, que possui característica periódica, ou seja, que se repetem em intervalos pré-determinados de tempos que pode ser denominado por T (normalmente em segundos). A frequência de oscilação da onda sonora é dada pela Equação 3.2, que é inverso ao período de oscilação, pode ser entendida a frequência como sendo o número de eventos de oscilação em um período em segundo, geralmente dada em hertz (Hz) (LAZZARINI, 1998).

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.2)$$

A onda senoidal derivada do movimento circular, tem uma amplitude de deslocamento que varia de 0 (zero) a até um ponto máximo positivo ao qual chama-se de crista e de 0 até um ponto mínimo ao qual é chamado de vale. A Figura 17 ilustra a formação da onda sonora senoidal.



Fonte: Telles, Netto (2018, p. 68).

O comprimento de onda representado por λ é representado pela figura 17 como sendo a distância entre duas cristas de onda ou entre dois vales consecutivos, que pode ser relacionado com velocidade e o período de propagação através da Equação 3.3 logo a seguir (NUSSENZVEIG, 2018).

$$\lambda = v * T \quad (3.3)$$

A amplitude da onda sonora está relacionada com a intensidade com a qual o som é percebido. Sendo assim, quanto maior for a amplitude de oscilação mais intensos serão os sons, o que é resultado de um maior deslocamento das moléculas. A amplitude também pode ser relacionada com a frequência, e conseqüentemente com o período e comprimento de onda, através da percepção de altura do som, ou seja, está relacionado de forma ao som ser agudo ou grave (LAZZARINI, 1998).

A frequência sonora é determinada pela frequência geradora, as faixas de frequências na qual estão as frequências sonoras é chamado de espectro sonoro, o qual pode ser dividido nas seguintes faixas: faixa audível pelo ser humano e em faixas não audíveis pelo ser humano. Pode-se observar o espectro sonoro, exposto na Figura 18, na qual está representado a faixa de frequência audível pelos seres humanos a qual está compreendida entre 20 Hz e 20 000 Hz, as frequências fora dessa faixa não são audíveis pelos seres humanos. As frequências acima de 20 000 Hz são conhecidas como ultrassons, já frequências abaixo de 20 Hz são conhecidas como infrassons (GASPAR, 2013).

Figura 18 - Espectro Sonoro.



Fonte: Simões (2014, p. 11).

Na manutenção, a emissão acústica pode ser utilizada para detectar defeitos em estado inicial em engrenagens e rolamentos por exemplo, pois quando esses componentes tendem a apresenta defeitos eles apresentam um ruído que se misturam com ruídos de

funcionamento da máquina que são ruídos normais às máquinas, ruídos esses que são apresentados bem acima da faixa de frequência audível ao seres humanos, ou seja, acima de 20 000 Hz, com isso o método de emissão acústica se mostra eficaz na separação e identificação desses ruídos e por consequência de possíveis falhas. Outros tipos de falhas podem ser identificados através da emissão acústica, tais como atrito (eixo de uma máquina girando em contato com vedação por exemplo), cavitação (que é a presença de ar no interior de uma bomba que pode gerar outros problemas mais graves), etc. (SKF, 2013).

Os vazamentos nas indústrias constituem um outro tipo de defeito que pode ser observado e captado através da utilização de instrumentos ultrassônicos capazes de detectar ruídos em altas frequências, vazamentos esses que podem ser de ar comprimido em compressores industriais (KARDEC; NASCIF, 2017).

4. METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa é definida por Perez-Wilson (1999) como “um conjunto de ferramentas, técnicas, métodos, princípios e regras organizados de forma clara, lógica e sistemática, para uso como guia, e uma descrição passo a passo de como se alcançar alguma coisa”. Seu objetivo é “captar e analisar as características dos vários métodos indispensáveis, avaliar suas capacidades, potencialidades, limitações ou distorções e criticar os pressupostos ou as implicações de sua utilização” (CATIVO, 2017, p. 2).

Tendo em vista que neste estudo realiza-se uma pesquisa explanatória, faz-se necessário defini-la. Uma pesquisa explanatória é conceituada por Gil (2002) como um método esclarecedor, que pretende alcançar a compreensão e a construção de uma hipótese, visando o aperfeiçoamento da ideia.

Além disso, também se classifica este trabalho como um estudo de caso. De acordo com Yin (2010, p. 39), “o estudo de caso é uma investigação empírica que investiga um fenômeno contemporâneo em profundidade e em seu contexto de vida real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não são claramente evidentes”. Para tanto, investiga-se a implantação de melhores técnicas de análises de falhas, em pontos de medição, em um equipamento rotativo localizado em uma indústria de mineração situada na cidade de Araxá-MG.

Com esta pesquisa, objetiva-se desenvolver um estudo da viabilidade das técnicas preditivas aplicadas em um equipamento rotativo instaurado em uma indústria mineradora, afim de aprimorar a eficiência operacional do ativo. Para esse fim, neste capítulo, detalha-se as etapas por meio das quais esta pesquisa se estrutura, mencionando: a determinação das etapas de (4.1) estudo e arranjo físico do equipamento; (4.2) histórico e análise do equipamento; (4.3) parâmetros técnicos para aplicação das técnicas preditivas; e por fim, a (4.4) etapa de análise resumida.

4.1 Estudo e arranjo físico do equipamento

A primeira etapa de construção deste trabalho envolve a análise do equipamento rotativo, foco deste trabalho. Para tanto, neste momento são expostos os detalhes estruturais e físicos do equipamento, tanto quanto suas características, componentes e informações de projeto.

Neste contexto, realiza-se a apresentação do equipamento tendo em vista sua funcionalidade na planta em que atua. Assim sendo, destaca-se fatores como sua criticidade para com o processo produtivo. Além disso, aborda-se dados fundamentais para a implementação das técnicas de manutenção preditiva.

4.2 Histórico e Análise do Equipamento

Tendo em vista que o equipamento rotativo em questão possui um histórico de falhas funcionais emergenciais ao longo de sua vida útil, realizou-se o encontro do histórico de falhas do mesmo. Esta atividade teve o objetivo mensurar estas falhas, através do levantamento dos eventos emergenciais que o equipamento sofreu ao longo do tempo. Assim sendo, utilizou-se como referência uma amostragem em um período de um ano, buscando dados dentro do sistema de gerenciamento da manutenção. Tais dados circundam desde ordens e notas emergenciais abertas pela operação, até ordens abertas pela equipe da manutenção da área ao perceber desvios nos parâmetros de funcionamento de forma sensível.

Geralmente as ordens de manutenção são abertas de forma direta, quando são de emergência. Quando não há status de emergência são abertas notas de manutenção que passam por tratamento no setor de planejamento e geram as ordens para execução da atividade. As atividades somente serão executadas mediante a ordens de serviços.

Levando em conta que a indústria em questão padece com frequentes falhas nos mancais, evidencia-se que este projeto apresenta foco nestes componentes, haja vista que são responsáveis pelos maiores históricos de falha.

4.3 Parâmetros técnicos para aplicação das técnicas preditivas

Após a abordagem sobre os problemas quanto as falhas no equipamento rotativo, realizou-se os enfoques das ferramentas de técnicas preditivas instauradas. Nesta são apontadas as técnicas preditivas de análise de vibração e termografia. Para tal, descreve-se as atividades, respectivos equipamentos auxiliares, *softwares*, entre outros.

Inicialmente realizada, na análise de vibrações, a identificação das falhas é realizada mediante ao aparecimento de frequências específicas. Por meio desses dados e das instrumentações específicas, a intenção é identificar através de análises do espectro

de frequência, qual falha ocorre no equipamento, mapeando e propondo melhorias e intervenções a serem realizadas.

Posteriormente, na análise de dados de temperatura realiza-se por meio de um pirômetro com o intuito de levantar a distribuição da radiação em um corpo. Assim, analisa-se o gráfico de oscilação das temperaturas do equipamento, comparando-as aos registros de falhas dispostos nas ordens de serviço da manutenção.

4.4 Análise Resumida

Posteriormente ao levantamento do histórico de falhas e exposição dos dados das técnicas de vibração aliados aos dados de temperatura adquiridos dos mancais de rolamentos do equipamento rotativo, sucedeu-se a análise desses dados. Tal análise efetua-se a partir da concatenação das informações, ou seja, comparativo entre as datas ocorrentes falhas e as análises anteriores que possam evidenciar que a falha irá ocorrer. Tal fato, circundam da necessidade de prevenir por meio das análises de vibração e termográficas as falhas dos equipamentos.

Sequentemente, verifica-se e propõe-se melhorias a serem realizadas nas análises de falhas implantadas. Para a indústria, esta etapa oferece ganhos potenciais, tendo em vista que os resultados provenientes das melhorias, abrem margem para o alcance dos objetivos da instituição.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após estabelecimento do desenho teórico-metodológico deste estudo de caso, neste capítulo aborda-se, circunstanciadamente, os dados adquiridos nesta pesquisa, atentando que, conforme explícito anteriormente, o estudo foi realizado em um equipamento localizado em uma indústria de mineração situado na cidade de Araxá-MG. Com isso, observou-se a possibilidade de realizar aplicações de técnicas de manutenção preditiva, a fim de aperfeiçoar o funcionamento do mesmo, garantindo sua confiabilidade. Para tal, analisou-se as aplicações das técnicas executadas, tanto quanto a interpretação dos resultados obtidos e identificação das causas raízes das falhas mais prováveis de serem sofridas pelo equipamento.

5.1 ESTUDO E ARRANJO FÍSICO DO EQUIPAMENTO

Partindo deste pressuposto, o equipamento rotativo analisado apresenta a função de realizar em altas temperaturas a fusão do material final de uma planta química em uma indústria mineradora. A Figura 19 ilustra a representação da vista superior do equipamento citado e seus componentes. O equipamento supracitado é dotado de um motor elétrico conectado a um redutor por meio do acoplamento 01 (hidrodinâmico) que fornece torque ao acoplamento 02. Este último, por sua vez, aciona o conjunto de mancal da coroa e pinhão. Os demais conjuntos de mancais de rolamentos (mancal 1 e 2 do apoio 1, mancal 3 e 4 do apoio 2, mancal 5 e 6 do apoio 3 e mancal 7 e 8 do apoio 4) auxiliam no movimento de rotação do equipamento e no suporte de sustentação do mesmo.

No equipamento em questão o material entra pelo lado direito da Figura 19, é transportado no interior do mesmo até chegar à saída do equipamento e continua para o processo através do lado esquerdo.

Atualmente, no equipamento rotativo aplica-se como técnica de manutenção preditiva, somente a análise de vibrações de forma periódica em seus componentes rotativos, sendo eles motor, redutor e mancais (mancais de rolamento dos rolos de apoios e mancais de sustentação do conjunto coroa e pinhão). É realizado o acompanhamento periódico dos componentes (motor 01, redutor 01, mancal coroa pinhão, e todos os mancais de rolamentos dos conjuntos de apoio) pertinentes a esse equipamento como um todo. Fica evidente a constituição do mesmo através de um conjunto de acionamentos, sendo este, formado por:

- Motor Elétrico 01 trifásico do fabricante WEG de 6 polos, ou seja, com rotação de 1 200 rpm;
- Redutor de velocidade 01 do fabricante CESTARI, com relação de transmissão igual a 77,71, ou seja, com isso a rotação de entrada do redutor é de 1 200 rpm e rotação de saída é de 15,44 rpm.

A ilustração do redutor de velocidade é explícita na Figura 21.

Figura 21 - Redutor CESTARI.



Fonte: Manual CESTARI (2021, p. 1).

O redutor supracitado apresenta 4 eixos. Conforme evidencia a Tabela da Figura 22, redutores com 4 eixos, apresentam 6 engrenagens (somatório de $1 + 2 + 2 + 1$). O lubrificante utilizado nestas engrenagens equivale à um óleo sintético com viscosidade média à 40°C de 320 mm²/s, equivalente à classe de viscosidade grau ISO 320. Como um óleo lubrificante de alto desempenho apresenta densidade a 20/4°C de 0,8999 g/cm³, ponto de fulgor (VA) de 224°C mín., ponto de fluidez de -9°C e índice de viscosidade igual a 99. O óleo fornece aos componentes do redutor, rolamentos e engrenagens, uma excelente proteção contra o desgaste e corrosão à peça e possui aditivação em sua

composição que proporcionam característica de resistência à extrema pressão além de resistência à oxidação e à formação de espuma.

Figura 22 - Informações técnicas do redutor.

Eixos	1	2	3	4
Nº de Engrenagens	1	2	2	1
Dentes Engrenagens	15	67 e 14	62 e 14	55
Nº de Rolamentos	2	2	2	2
Especificação Rolamentos	22207 E (2X)	22309 E (2X)	22313 E (2x)	22220 E (2X)

Fonte: Software MHM Modificado (2021).

A interligação entre os componentes de acionamento (motor e redutor) é efetivada por intermédio de um acoplamento hidrodinâmico, exposto na Figura 23. O acoplamento hidrodinâmico é um dispositivo mecânico composto por materiais como aço, bronze ou cobre, que possui a capacidade de fornecer alta eficiência e baixo escorregamento. Além disso, dispõe de bom desempenho para transmissão de potência de uma operação, por meio de um sistema de bomba-turbina, no qual o motor bombeia fluidos hidráulicos contra o lado da turbina, gerando assim, energia cinética. Por intermédio deste fluido, no interior do acoplamento, transmite-se o torque para o cubo secundário e conseqüentemente, para a máquina acionada pelo acoplamento hidrodinâmico. Neste tipo de acoplamento, não há contato mecânico direto entre seus componentes, portanto o desgaste é praticamente nulo. Em casos especiais, como o deste equipamento, em que demanda alto grau de eficiência para geração de torque, utiliza-se esse tipo de acoplamento.

Figura 23 - Acoplamento Hidrodinâmico.



Fonte: Catálogo HENFEL (2021, p. 1).

Sequencialmente ao redutor de acionamento, encontra-se acoplado um conjunto de engrenagens, coroa e pinhão, que fornece ao equipamento seu movimento rotativo. O pinhão de acionamento apresenta 27 dentes e rotação de 15,44 rpm. Por sua vez, a coroa possui 172 dentes, o que fornece uma relação de transmissão de 6,37 e consequente, rotação de 2,42 rpm. Esse conjunto é suportado por um grupo de dois mancais de rolamentos. Os mancais de rolamentos são do fabricante SKF e referência 22226 E. Caracterizados como rolamentos autocompensadores de rolos, sua construção permite resistir a elevadas cargas e certos níveis de desalinhamento. A mesma especificação destes mancais é empregue nos demais 4 rolos de apoios que o equipamento possui. Estes serão foco desta pesquisa e posicionam-se abaixo do equipamento, sendo responsáveis pelo fornecimento e auxílio em sua flutuação.

Os dados expostos da tabela da Figura 24 são correspondentes ao rolamento 22226 E. Nesta figura, apresenta-se a tabela com informações sobre as limitações quanto a carga dinâmica e estática e quanto a velocidade de referência nas quais os rolamentos são projetados para serem aplicados, com maiores destaques para a carga que o rolamento pode suportar.

Figura 24 - Dados de Cálculo Rolamento 22226 E.

C	758 kN	Classificação de carga dinâmica básica
C ₀	930 kN	Classificação de carga estática básica
P _u	88 kN	Limite de carga de fadiga
	2600 r/min	Velocidade de Referência
	3600 r/min	Velocidade - limite

Fonte: Manual SKF Modificado (2021).

Projetado para trabalhar com carga de material de 2 200 toneladas horas de material ao longo de sua operação, o equipamento estudado trabalha podendo variar entre valores inferiores, de acordo projeto do equipamento.

Todos os componentes desde o motor, redutor e mancais e etc., estão propensos a sofrerem falhas e necessitarem de manutenções. Todavia, as aplicações técnicas preditivas presentes neste estudo serão focadas nos mancais do equipamento, haja vista que mesmo levando em conta que todos os outros componentes podem apresentar falhas, são os mancais, ilustrado na Figura 25, os responsáveis pelos maiores e mais pertinentes históricos de falhas. Tal evidência é demonstrada no decorrer deste trabalho. Em alguns

casos, estas falhas surgem de forma repentina sem previsibilidade por parte de manutenção, fato que as tornam muito onerosas para a empresa.

Figura 25 - Mancal de rolamento 22226 E.



Fonte: Do acervo do autor (2021).

Nos mancais de rolamentos especifica-se como um rolamento 22226 E do fabricante SKF, operando com rotação de 15,44 RPM e com lubrificante, no caso dos mancais em questão, graxa. As informações referentes a cargas que o rolamento suporta estão expostas na Figura 24, enquanto as dimensões estão presentes na Figura 26.

Figura 26 - Dimensões dos rolamentos 22226 E.

d	130 mm	Diâmetro do furo
D	230 mm	Diâmetro externo
B	64 mm	Largura
d_2	≈ 152 mm	Diâmetro do ressalto do anel interno
D_1	≈ 201 mm	Diâmetro do ressalto/rebaixo do anel externo
b	11.1 mm	Largura do canal para lubrificação circular no anel externo
K	6 mm	Diâmetro do furo para lubrificação (anel externo)
$r_{1,2}$	min. 3 mm	Dimensão de chanfro do anel externo

Fonte: Catálogo Digital SKF (2021).

5.2 HISTÓRICO E APLICAÇÕES TÉCNICAS EXECUTADAS

5.2.1 LEVANTAMENTO DE INTERVENÇÕES

O equipamento rotativo em questão possui um histórico de falhas funcionais emergenciais ao longo de sua vida útil com foco em seus mancais de rolamentos dos rolos de apoio. Tais falhas funcionais que podem ter ocorrido partindo de outros tipos de falhas mais simples de serem tratadas, apontadas pelas técnicas de manutenção preditiva como a análise de vibrações. Como exemplo dessas falhas funcionais destacam-se: rupturas e quebras dos rolamentos dos mancais de apoio do equipamento, ocorrentes entre intervalos de medições de vibrações, fato que impossibilita sua previsibilidade e que podem ser evolução de falhas como desalinhamento. Tais medições seguem o cronograma dos planos de manutenção, com execução mensal.

Visando a correção destas falhas, uma boa prática demonstra-se o levantamento dos eventos emergenciais que o equipamento sofreu ao longo do tempo. Para tal, foi utilizado como referência uma amostragem de três anos, buscando dados dentro do sistema de gerenciamento da manutenção. Tais dados circundam desde ordens e notas emergenciais abertas pela operação, até ordens abertas pela equipe da manutenção da área ao perceber desvios nos parâmetros de funcionamento do equipamento de forma sensitiva. A inspeção sensitiva, até mesmo quando utiliza de instrumentos mais simples, como um medidor de temperatura ou uma caneta que meça vibração de nível global, pode identificar e apontar falhas potenciais nos equipamentos. Nesse levantamento exclui-se informações e dados referentes a intervenções realizadas para atender a planos de manutenções, que são periódicos, sendo tipos de manutenção preventiva.

Com isso, levando em consideração o período mencionado, o número de manutenções incluindo todas as disciplinas (mecânicas, elétrica, instrumentação civil, lubrificação e etc.) e todas as vertentes de manutenção, como a manutenção corretiva, preventiva (incluindo planos de manutenções), preditiva e engenharia de manutenção (melhoria de manutenção e melhoria de segurança), com a presença de todos os tipos de prioridades (emergência, urgência, normal e etc.), encontra-se um total de 318 ordens de manutenção. Cada ordem representa uma manutenção efetuada.

Após filtrar as ordens de manutenção conforme disciplina de mecânica, incluindo manutenção de vertente preditiva e lubrificação, encontra-se 148 ordens, o que representa um percentual de 46,54 % do total das ordens. Dentro deste universo, 27,70 %

correspondem a 41 ordens de manutenções, que também serão desconsideradas do estudo realizado, restando um total 107 ordens as quais estão relacionadas à disciplina de manutenção mecânica, as quais estão diretamente ligadas ao estudo em questão, uma vez que o estudo está voltado para a identificação de falhas nas partes mecânicas do equipamento. Fazendo uma análise mais profunda nessas ordens, constatou-se que:

- 1 ordem é secundária a outra, ou seja, uma subordem;
- 1 ordem destina-se a realização da contratação de mão de obra;
- 1 ordem destina-se a programação pessoal para acompanhamento técnico;
- 1 ordem destina-se a compra de lubrificante;
- 5 ordens estão voltadas para a manutenção preditiva para realização de monitoramento de vibração.

Portanto, após somatório, das 107 ordens levantadas, 9 apresentam funcionalidades discrepantes das desejadas neste estudo, com isso, totaliza-se 98 ordens de manutenção. Ainda dentro desse total de 98 ordens de manutenção, sendo:

- 6 ordens são de melhoria de manutenção (ex: instalação de válvulas);
- 1 ordem de melhoria de manutenção referente a um teste de lubrificante em um dos pares de mancais.

Assim sendo, subtraindo as 7 ordens supracitadas, restam 91 ordens. Ainda se retira dessas ordens 21 ordens voltadas para:

- 8 ordens quanto a aberturas e fechamentos de janelas de visitas;
- 3 ordens para reparos em canhão de ar comprimido;
- 2 ordens para substituir válvulas;
- 2 ordens para substituir tubos;
- 1 ordem para montar guia;
- 1 ordem para verificação de transmissor;
- 1 ordem para vazamento de calha;
- 1 ordem para instalação de dispositivo;
- 1 ordem para reparo de solda no corpo do equipamento;
- 1 ordem para manutenção no duto de exaustão.

Estas 21 ordens são ordens que, após análise, foram intituladas indiferentes quanto as falhas que podem ser relacionadas com os mancais. Para tanto, chegou-se a um número final de 70 ordens. As ordens finais estão relacionadas e interferem diretamente aos mancais do equipamento. Em suma, incluem notas as quais foram necessárias fazer manutenções de caráter emergencial (devem ser executadas imediatamente) ou de urgência (devem ser executadas o mais rápido possível), aguardando a próxima parada ou atividades de rotina. O total de ordens encontra-se no demonstrativo da Tabela 1.

Tabela 1 - Relação de Ordens Seleccionadas.

Nº	Texto da Ordem	Equipe	Prioridade
1	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Aguardando Prox. Parada
2	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
3	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Aguardando Prox. Parada
4	Fazer Inspeção Rolo de Apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
5	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
6	Substituir Placas de Grafite Lubrificação Rolo de Apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
7	Retificar Alianças	Mecânica	Aguardando Prox. Parada
8	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência
9	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
10	Relubrificar Aliança	Mecânica	Caráter de Emergência
11	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
12	Relubrificar Mancal de Rolamento	Mecânica	Caráter de Emergência
13	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
14	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
15	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
16	Relubrificar Mancal de Rolamento	Mecânica	Caráter de Urgência
17	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Grade Semanal
18	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Aguardando Prox. Parada
19	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Aguardando Prox. Parada
20	Substituir Rolo de Encosto	Mecânica	Caráter de Emergência
21	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Grade Semanal
22	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
23	Substituir Rolo de Encosto	Mecânica	Caráter de Emergência
24	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência
25	Relubrificar Mancal de Rolamento	Lubrificação	Aguardando Prox. Parada
26	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência
27	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
28	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
29	Fazer a Intervenção na Aliança	Mecânica	Caráter de Emergência
30	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
31	Fazer a Intervenção na Aliança	Mecânica	Caráter de Emergência
32	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência
33	Fazer a Intervenção na Aliança	Mecânica	Caráter de Emergência
34	Relubrificar Aliança	Mecânica	Caráter de Emergência
35	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência
36	Substituir Placas de Grafite Lubrificação Rolo de Apoio	Mecânica	Grade Semanal
37	Relubrificar Aliança	Mecânica	Caráter de Emergência
38	Relubrificar Aliança	Mecânica	Caráter de Emergência
39	Retificar Alianças	Mecânica	Aguardando Prox. Parada
40	Relubrificar Aliança	Mecânica	Caráter de Emergência

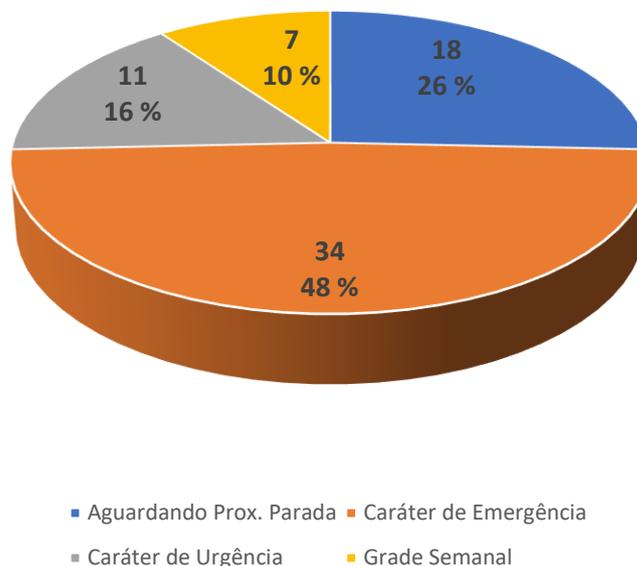
41	Realizar Alinhamento Coroa/Pinhão	Mecânica	Aguardando Prox. Parada
42	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência
43	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Aguardando Prox. Parada
44	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
45	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
46	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência
47	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência
48	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
49	Adequar Ponto de Ar Comprimido	Mecânica	Aguardando Prox. Parada
50	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência
51	Fazer a Intervenção na Aliança	Mecânica	Aguardando Prox. Parada
52	Adequar Ponto de Ar Comprimido	Mecânica	Caráter de Emergência
53	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
54	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
55	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
56	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência
57	Relubrificar Mancal de Rolamento	Lubrificação	Aguardando Prox. Parada
58	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
59	Substituir Rolo de Encosto	Mecânica	Aguardando Prox. Parada
60	Inspecionar Acoplamento de Acionamento	Mecânica	Aguardando Prox. Parada
61	Substituir Placas de Grafite Lubrificação Rolo de Apoio	Mecânica	Grade Semanal
62	Realizar Ensaio Nos Rolos de Apoio	Mecânica	Grade Semanal
63	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Grade Semanal
64	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência
65	Realizar Revisão do Acionamento	Mecânica	Grade Semanal
66	Desmontar/Montar Tra.	Mecânica	Aguardando Prox. Parada
67	Substituir Selo	Mecânica	Aguardando Prox. Parada
68	Substituir Vedação	Mecânica	Aguardando Prox. Parada
69	Substituir Rolo de Encosto	Mecânica	Caráter de Emergência
70	Substituir Parafuso do Anel	Mecânica	Aguardando Prox. Parada

Fonte: Acervo do autor (2021).

Levando em consideração essas ordens de manutenção e fazendo o levantamento dos percentuais de prioridade das ordens selecionadas, encontra-se dados a serem representados no gráfico da Figura 27, assinalando:

- Caráter de Emergência: 48 % (34 ordens).
- Caráter de Urgência: 16 % (11 ordens).
- Aguardando Prox. Parada: 26 % (18 ordens).
- Grade Semanal: 10 % (7 ordens).

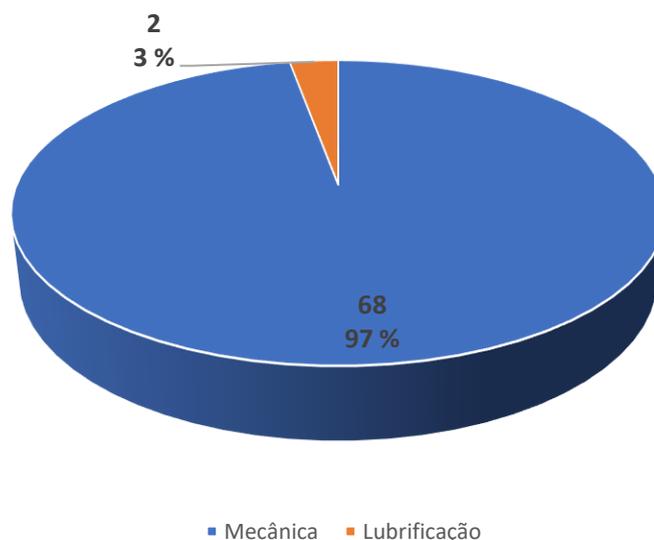
Figura 27 - Gráfico de Porcentagens das Ordens selecionadas.



Fonte: Acervo do autor (2021).

Dentro destas ordens de manutenção encontram-se ordens destinadas as disciplinas de mecânica e lubrificação, sendo que 3 % das ordens se vinculam à lubrificação e 97 % ordens são de responsabilidade da equipe de manutenção mecânica, conforme gráfico da Figura 28.

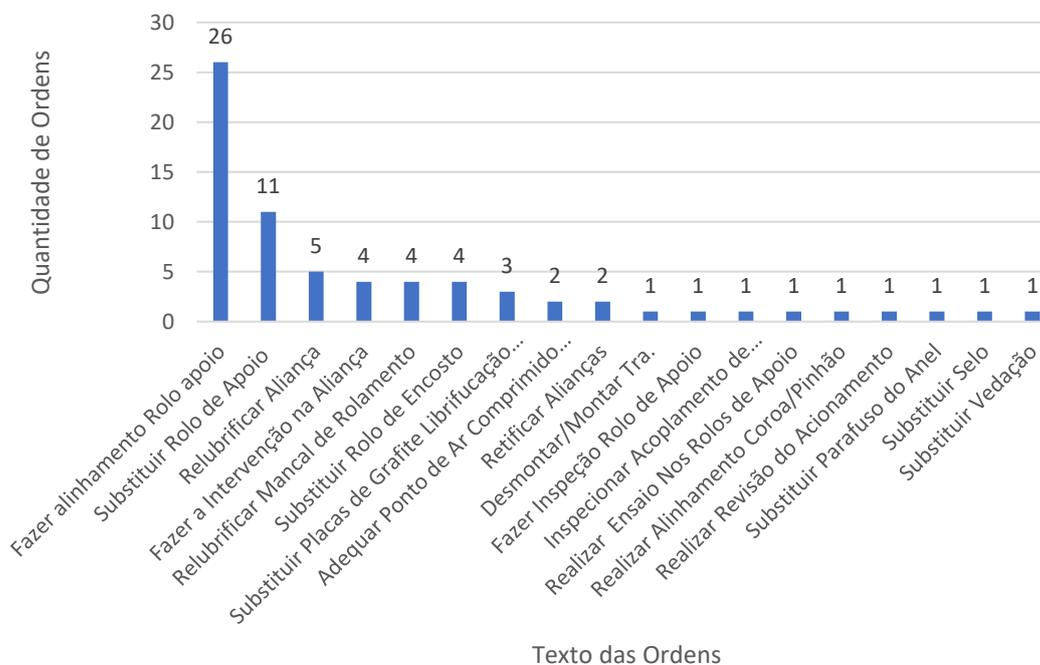
Figura 28 - Porcentagens de Ordens das Equipes Responsáveis.



Fonte: Acervo do autor (2021).

Dentro deste universo de 70 ordens de manutenção elaborou-se uma análise, a fim de entender qual das falhas são mais frequentes, sendo assim subdivididas conforme ilustrado no gráfico da Figura 29.

Figura 29 - Quantidade de ordens selecionadas.

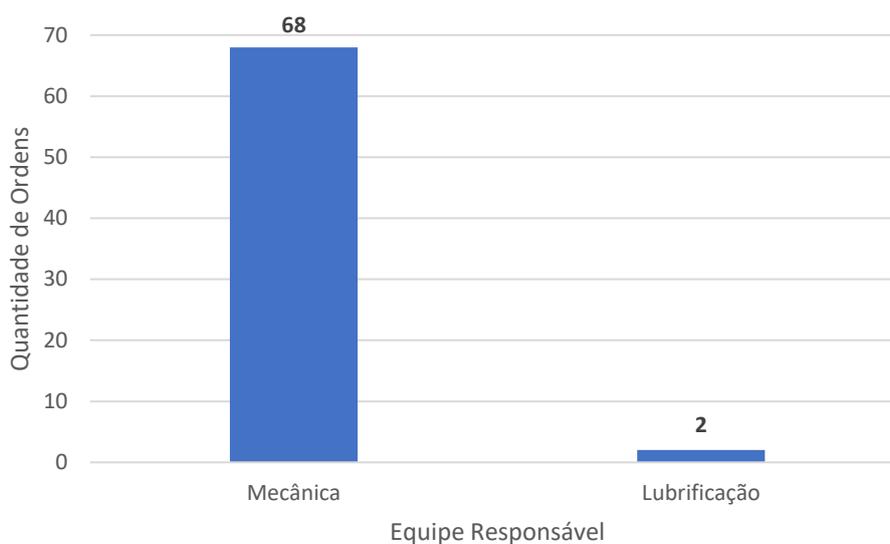


Fonte: Acervo do autor (2021).

Por meio dessas análises pode-se identificar que grande parte das ordens foram executadas de caráter emergencial, ainda caracterizando-as como manutenção corretiva não planejada ou manutenção corretiva planejada, todavia geraram parada de planta.

Outra passível análise a ser feita vincula-se a alta quantidade de mão de obra mecânica para cumprimento dessas atividades. Com os dados colhido foi fazer o paliativo entre as disciplinas com maior abrangência de ordens de manutenção. Dessa forma, por meio do gráfico da Figura 30, identificou-se a superioridade quantitativa das ordens mecânicas.

Figura 30: Quantidade de ordens por disciplina Mecânica e Lubrificação



Fonte: Acervo do autor (2021).

Dentro dessas ordens, a maior parte das falhas, comprovadas pelo gráfico da Figura 29, estão relacionadas aos mancais, tendo em vista que 26 ordens são destinadas a realizar alinhamento do equipamento para evitar uma quebra de rolamentos, enquanto 11 ordens visam realizar a substituição do rolamento dos rolos de apoio, somando 37 ordens referentes à mais de 50 % do total. Ainda assim, existem ordens que podem ser relacionadas com possíveis falhas futuras no equipamento. Mediante a necessidade de intervenções no equipamento, se faz importante realizar uma análise aliando dados coletados para determinação de possíveis causas raízes e propostas de melhorias. Esta constatação pode ocorrer com a aplicação do princípio de Pareto, que expõe a regra de 80/20, em que 80 % dos efeitos surgem a partir de somente 20 % das causas.

Dentro das 37 ordens voltadas para a realização de alinhamento e substituição do rolamento do rolo de apoio, somente as que não são de prioridade emergencial e nem urgência, 8 ordens são encontradas, correspondente a 21,62 %, conforme evidencia a Tabela 2. Estas conferem a ordens de manutenção programadas para realização em uma parada de manutenção ou em outra oportunidade de parada.

Tabela 2 - Relação de ordens de paradas e grade semanal.

Nº	Texto da Ordem	Equipe	Prioridade	Data entrada
1	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Aguardando Prox. Parada	26.04.2021
3	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Aguardando Prox. Parada	19.02.2021
17	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Grade Semanal	17.07.2020
18	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Aguardando Prox. Parada	15.07.2020

19	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Aguardando Prox. Parada	30.06.2020
21	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Grade Semanal	23.04.2020
43	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Aguardando Prox. Parada	05.09.2019
63	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Grade Semanal	14.01.2019

Fonte: Acervo do autor (2021).

As demais 29 ordens representam 78,38 % das ordens selecionadas. Estas são de caráter de emergência e de urgência e estão representadas na Tabela 3. Dentro dessas existe a possibilidade apresentar alguma ordem que foi identificada e solicitada pela manutenção preditiva por meio de análise de vibração. A maior parte dessas ordens têm potencial de terem gerado paradas de plantas sem previsão e de forma inesperada, que são 7 ordens, as quais solicitam substituição de rolamentos.

Tabela 3 - Relação de ordens de prioridade de emergência e de urgência.

Nº	Texto da Ordem	Equipe	Prioridade	Data entrada
2	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	23.04.2021
5	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	13.02.2021
8	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência	30.11.2020
9	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	28.11.2020
11	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	27.11.2020
13	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	26.11.2020
14	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	26.11.2020
15	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	05.11.2020
22	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	13.04.2020
24	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência	14.02.2020
26	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência	18.11.2019
27	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	06.11.2019
28	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	06.11.2019
30	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	29.10.2019
32	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência	28.10.2019
35	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência	10.10.2019
42	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência	10.09.2019
44	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	20.08.2019
45	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	12.08.2019
46	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência	12.08.2019
47	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência	26.06.2019
48	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	14.06.2019
50	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência	27.05.2019
53	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	09.05.2019
54	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	07.05.2019
55	Substituir Rolo de Apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	26.03.2019
56	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Urgência	25.03.2019
58	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	02.03.2019
64	Fazer alinhamento Rolo apoio	Mecânica	Caráter de Emergência	02.01.2019

Fonte: Acervo do autor (2021).

Portanto, evidencia-se aqui que grande parte das ordens urgentes selecionadas com os maiores percentuais de causa de falhas, incluem reparos e substituições a serem realizadas nos rolos de apoios. Assim, comprova-se a necessidade de instituir análises de falhas nos mancais a fim de que estas falhas não interrompam as atividades do equipamento rotativo com tamanha frequência.

5.3 ANÁLISE DE FALHAS

5.3.1 APLICAÇÃO DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES NO EQUIPAMENTO ROTATIVO

A manutenção preditiva com aplicação de análise de vibrações é realizada no equipamento de acordo com a política atual dos planos de manutenção seguindo uma periodicidade mensal, ou seja, o equipamento é monitorado uma vez por mês partindo do plano de monitoramento de vibração da área. O equipamento demanda um extenso tempo de coleta de vibração, cerca de 8 horas utilizando somente um coletor de dados. Para alcance deste tempo é realizado o somatório do tempo das coletas de vibração de cada componente do equipamento rotativo. Essas informações estão dispostas na tabela 4.

Tabela 4: Tempo gasto para coleta de vibrações do equipamento rotativo com um coletor de dados

Componentes	Tempo de Monitoramento (Minutos)
Motor	6
Redutor	25
Mancal Coroa /Pinhão	60
Mancal 1	39
Mancal 2	39
Mancal 3	39
Mancal 4	39
Mancal 5	39
Mancal 6	39
Mancal 7	39

Mancal 8	39
Tempo Total (Minutos)	403 Minutos
Tempo Total (Horas)	6,7167 Horas

Fonte: Acervo do autor (2021).

Uma vez que um equipamento possui rotações muito baixas, eles demandam maiores prazos de medição, quando comparados a equipamentos com rotações maiores. Essa diferença no tempo de coleta de vibração dos equipamentos, varia de acordo com a rotação do equipamento, que é no que se baseia a configuração referente ao equipamento. Haja vista que, o ideal é que no momento da coleta de vibração, o tempo desta seja compatível com 15 a 30 voltas do eixo ao qual o equipamento está acoplado.

Para aplicação da técnica de análise de vibrações no equipamento estudado, utilizou-se a plataforma do fabricante Emerson, através do *software* AMS Suite Machinery Health Manager. Por meio deste *software* é possível realizar cadastro, armazenamento e, posteriormente, análise dos dados de vibração coletados, permitindo a emissão de relatórios e laudos, juntamente com o coletor de dados CSI 2140. Em complemento, o *software* dispõe da capacidade de programar e calcular frequências de defeito de cada componente de uma máquina, a partir dos dados técnicos e características inseridos durante o cadastro (EMERSON, 2016).

Por sua vez, o coletor de dados, exposto na Figura 31, permite a realização da coleta de dados de forma rápida e fácil em diversos equipamentos rotativos durante a execução de rotas de inspeção de vibração. Além do coletor de dados, na inspeção de vibração também se faz uso de cabos de conexão e sensores acelerômetros.

Visando a realização do monitoramento de vibração, faz-se necessário a utilização de um sensor acelerômetro dotado de um cristal piezelétrico e de um cabo. O cristal apresenta a função de captar a vibração da máquina, enquanto o cabo é responsável por fazer a comunicação entre sensor e coletor de dados para o processamento dos dados de vibração coletados. O sensor usualmente empregue nesta tarefa apresenta sensibilidade de 100 mV/G (Milivolt por g – que é unidade de aceleração da gravidade), tendo em vista que esta atende a necessidade do equipamento.

O coletor analisador converte os sinais de vibração coletados em espectros no sinal no tempo (no qual estará presente toda vibração que o equipamento medido apresenta, seja ela proveniente do próprio equipamento ou do ambiente a volta dele), e espectros em

FFT (obtido através de um processamento do espectro do sinal do tempo, o qual passa por uma transformada de Fourier, convertendo o sinal no domínio do tempo em um sinal no domínio da frequência, passível para análise) (ALMEIDA; ALMEIDA, 2014).

Figura 31 - Coletor de dados CSI 2140.



Fonte: Manual EMERSON (2016, p. 3).

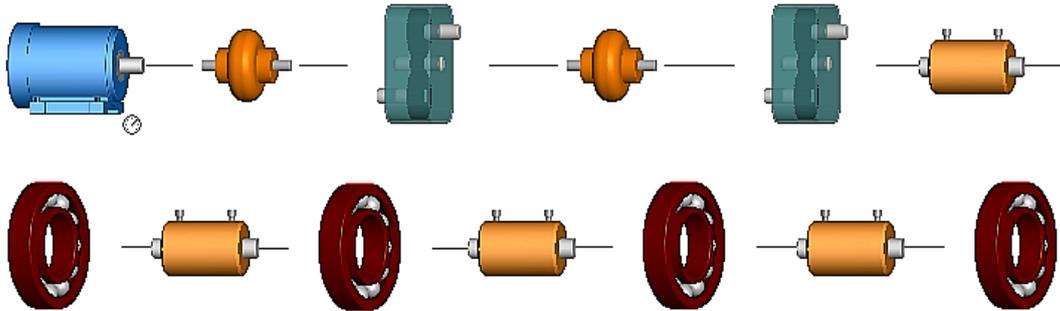
5.3.1.1 Cadastro e Armazenamento de dados

Para realização da aplicação de análise de vibrações no equipamento rotativo faz-se indispensável realizar o cadastro dos dados dos componentes, os quais serão acompanhados com essa técnica. Tais informações circundam desde a rotação, número de dentes das engrenagens, redução de rotação e até especificação de rolamentos. Estes itens são fundamentais para a identificação de possíveis falhas potenciais nos componentes.

O cadastro de dados do equipamento estudo foi realizado conforme a Figura 32. Por meio desta, identifica-se toda a constituição do equipamento. Após todo o cadastro,

inserção das informações necessárias e definição de pontos a serem monitorados, é possível efetuar a coleta de vibração em campo do equipamento.

Figura 32 - Representação do cadastro do equipamento no *Software AMS*



Fonte: Software AMS (2021).

Para cadastro dos mancais de rolamentos as informações necessárias são: a especificação do rolamento utilizado (22226 E do fabricante SKF), rotação com a qual o mesmo está operando (15,44 RPM) e o tipo de lubrificante (nos mancais utiliza-se a graxa), que é a Lubrax Clay 2.

No mancal de rolamento, o lubrificante padrão utilizado exibe características para aplicações em ambientes com temperaturas elevadas. Tal característica circunda na possibilidade deste material manter sua consistência entre temperaturas inferiores à 264°C. O objeto estudado neste projeto opera em ambientes com condições de elevadas temperaturas. O lubrificante supracitado é intitulado Lubrax Clay 2, elaborado com base em um espessante inorgânico, com formulação de óleos minerais parafínicos. Além disso, este lubrificante fornece ao rolamento propriedades vinculadas a operação em extremas pressões, adesividade, resistência a ataques de água e proteção contra corrosão. Outras características do lubrificante estão na Figura 33, na qual contém a temperatura do ponto de gota e a característica da viscosidade na qual o lubrificante se apresenta em determinadas temperaturas de trabalho dos mancais de rolamentos, que estão dentro das condições de operação do equipamento estudado.

Figura 33 - Características da Graxa Lubrax Clay 2.

GRAU NLGI		1	2
Penetração Trabalhada 60x	(0.1 mm)	335	274
Ponto de Gota	(°C)	330	330
Carga Timken	(lb)	>40	>40
Características do Óleo Básico			
Viscosidade a 40°C	(cSt)	88	88
Viscosidade a 100°C	(cSt)	10,2	10,2

Fonte: Catálogo Lubrax (2021, p.1).

O cadastro inicial, envolve a criação de rotas de manutenção dos equipamentos efetuado pela equipe responsável. Sequencialmente, inicia-se o carregamento da rota no analisador e coleta de dados pelos operadores durante a execução da rota. A coleta de dados de rota é efetuada através da conexão do sensor ao equipamento e ao analisador por intermédio de cabos. A Figura 34 evidencia a tela de coleta de dados em rota com o coletor de dados CSI 2140.

Figura 34 - Tela de coleta de dados em rota CSI 2140.

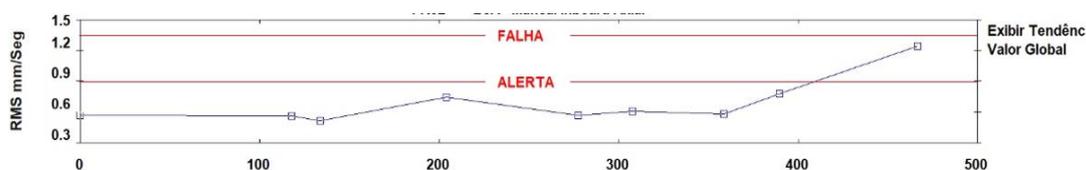


Fonte: Manual EMERSON (2017, p. 2).

O *software*, após a especificação da rota, possibilita a definição de gráficos a exibirem “dados em tempo real e coletados, parâmetros para coletar dados de rota e a quantidade de dados de rota a ser armazenada” (EMERSON, 2016, p.14). Assim, permite a criação de um banco de dados capaz de servir como um histórico capaz de suprir dúvidas quanto ao desempenho do equipamento. Determinado histórico, mostra-se essencialmente útil durante a análise, haja vista que institui informações para a construção de um gráfico de tendência dos pontos de vibrações coletados, conforme a Figura 35, o que facilita a determinação das condições do equipamento no momento de análise e permite a percepção das alterações nos níveis de vibração do equipamento analisado.

A Figura 35 e foi retirada do *software*, formada pelos dados de vibração do equipamento referentes as medições realizadas ao longo do tempo. As linhas de falha e alerta podem ser ajustadas durante o momento de análise de forma a ser adaptado para melhor se ajustar aos dados analisados.

Figura 35 - Gráfico de Tendência formado pelo Software AMS.



Fonte: Software AMS (2021).

5.3.1.2 Método de Identificação de Falhas

Nos rolamentos, as frequências de falhas nos componentes são representadas pelas siglas BPFO, BPFI, BSF e FTF, que são calculadas automaticamente pelo software após a inserção dos dados das especificações dos rolamentos. Entretanto, seu cálculo pode ser realizado e representado das seguintes formas:

- Frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da Pista Interna (indicado por BPFI do inglês *Ball Pass Frequency Inner Race*), associada a defeitos na pista interna, por meio da equação:

$$BPFI = N * 0.6 \quad (4.1)$$

- Frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da Pista Externa (indicado por BPFO do inglês *Ball Pass Frequency Outer Race*), associada a defeitos na pista externa, através da equação:

$$BPFO = N * 0.4 \quad (4.2)$$

- Frequência de giro dos elementos (indicado por BSF do inglês *Ball Spin Frequency*), associada a defeitos nos elementos rolantes (rolos ou esferas dependerá da aplicação do rolamento), pela equação:

$$BSF = 2.4 * Fo \quad (4.3)$$

- Frequência de giro da gaiola do rolamento (indicada por FTF do inglês *Fundamental Train Frequency*), associada a defeitos na gaiola, pela equação:

$$FTF = 0.4 * Fo \quad (4.4)$$

Para tanto, a análise de vibrações pode ser realizada mediante a utilização de três parâmetros de medição:

- Deslocamento: definido como a distância total percorrida no movimento vibratório (relacionada com a tensão);
- Velocidade: definido como a taxa de variação do deslocamento (relacionada com a energia) para detecção de falhas. Estas estão localizadas no espectro de vibração em baixas e médias frequências, entre 0 e 1 000 Hz, falhas de desalinhamento, desbalanceamento etc.;
- Aceleração: definido como a taxa de variação da velocidade (relacionada com a energia) para detectar falhas. Estas estão localizados no espectro de vibração nas médias e altas frequências, acima de 1 000 Hz, falhas de rolamentos (próximas a zona de ressonância do rolamento, entre 2 000 a 5 000 Hz) e as falhas de engrenamento.

A identificação das falhas através de análise de vibrações é realizada mediante ao aparecimento de frequências específicas. Portanto, no redutor, por exemplo, as falhas possíveis de serem apontadas são falhas de engrenamento. Esta é detectada por meio da presença da frequência de engrenamento. Por sua vez, os rolamentos têm sua frequência específica de falha, que também depende da rotação ao qual se encontra. Assim sendo, os rolamentos do redutor do equipamento rotativo estudado possuem suas frequências explicitas na tabela da Figura 36, na qual está apresentado os rolamentos e suas frequências de falhas por eixo do redutor (que possui 4 eixos de transmissão).

Figura 36 - Dados Rolamentos do Redutor.

EIXOS	ROLAMENTO	FTF	BSF	BPFO	BPFI
EIXO 1	22207 E (2X)	0.42	2.965	67.143	92.857
EIXO 2	22309 E (2X)	0.401	2.349	56.092	83.905
EIXO 3	22313 E (2x)	0.406	2.508	60.938	89.062
EIXO 4	22220 E (2X)	0.425	3.221	80.766	10.923

Fonte: Software MHM Modificado (2021).

Enquanto isso, nos mancais de rolamentos do respectivo equipamento, o rolamento 22226 E, possui informações quanto suas frequências de falhas evidenciadas na Figura 37.

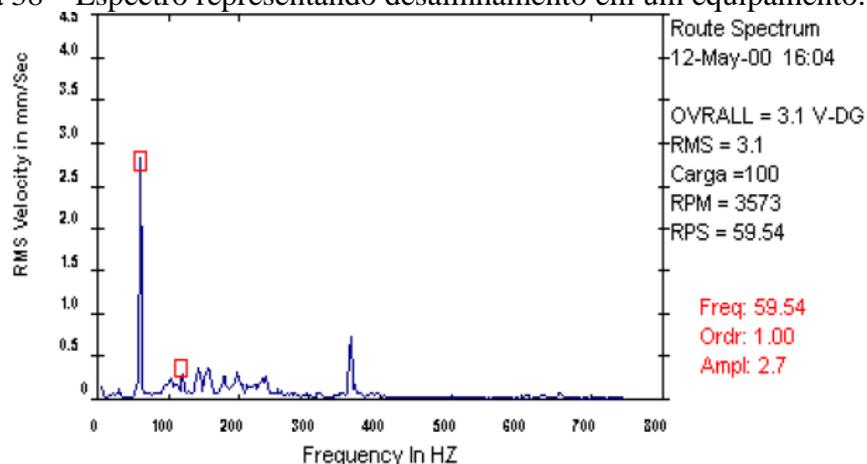
Figura 37- Frequências de falha de rolamento dos rolos de apoio.

BR...	Bearing Type	#B/R	FTF	BSF	BPFO	BPFI
SKF	22226 E	20.	0.428	3.351	8.5613	11.439

Fonte: Software MHM (2021).

Mediante a esses dados e utilização destas instrumentações, a intenção é identificar por meio de análises do espectro de frequência qual falha ocorre no equipamento. Com isso, realiza-se o mapeamento, a proposição de melhorias e intervenções a serem realizadas, evitando que o equipamento interrompa suas atividades de forma emergencial não planejada. Conforme exposto anteriormente, o espectro de vibração permite a detecção “em alguns casos que o desalinhamento é muito grande sua frequência também pode ser 1 X RPM” (SKF, 2004). A Figura 38 demonstra um espectro que apresentou um pico de frequência de 1XRPM da rotação, confirmando seu desalinhamento, neste caso no eixo Y.

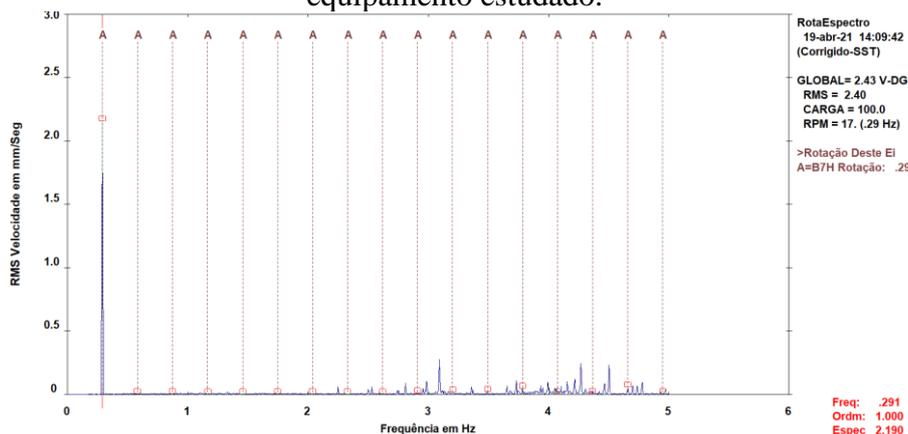
Figura 38 – Espectro representando desalinhamento em um equipamento.



Fonte: FUPAI (2021, p.25).

De forma semelhante, a Figura 39 ilustra o espectro de vibração do mancal 7 do conjunto de apoio 4 na posição radial ao eixo, do equipamento estudado. Essa falha foi identificada através da aplicação da análise de vibrações e foi uma das ordens de manutenção na qual foi solicitado a correção do desalinhamento do conjunto em questão, sendo correspondente a uma das ordens que serão levantadas nas análises a seguir.

Figura 39- Espectro de vibração do mancal 7 do conjunto de apoio 4 do equipamento estudado.



Fonte: Software AMS (2021).

O item supracitado representa um espectro de vibração no domínio da frequência retirado do *software* AMS, o qual corresponde ao mancal 7 do rolo de apoio 4, o mesmo está no parâmetro de velocidade. Com destaque para a frequência de 1XRPM (uma vez a rotação) do eixo do mancal especificado na posição radial, em amplitudes atingindo 2,19 mm/seg de vibração. Quando o espectro de vibração no domínio da frequência na posição axial possui característica semelhante ao espectro da Figura 39, a falha representada pode ser de desalinhamento. Neste caso, o rolo de apoio 4 apresenta desalinhamento, identificado através do mancal 7, conforme foi localizado na Figura 19. Com isso, é aconselhável realizar o alinhamento do rolo de apoio em questão atentando-se para não desalinhar os demais rolos de apoios, o que seria prejudicial da mesma forma para o funcionamento do equipamento.

5.3.1.3 Análise de Dados – Vibração

Ao revisar a análise dos relatórios de vibração durante o ano de 2021, emitidos pela manutenção preditiva, foram identificadas 10 falhas ao longo do ano no equipamento estudado. Dentre essas falhas estão inclusas avarias observadas tanto nos mancais de

rolamento dos rolos de apoio (9) quantos nos mancais de rolamento do conjunto coroa e pinhão (1), conforme a Tabela 5.

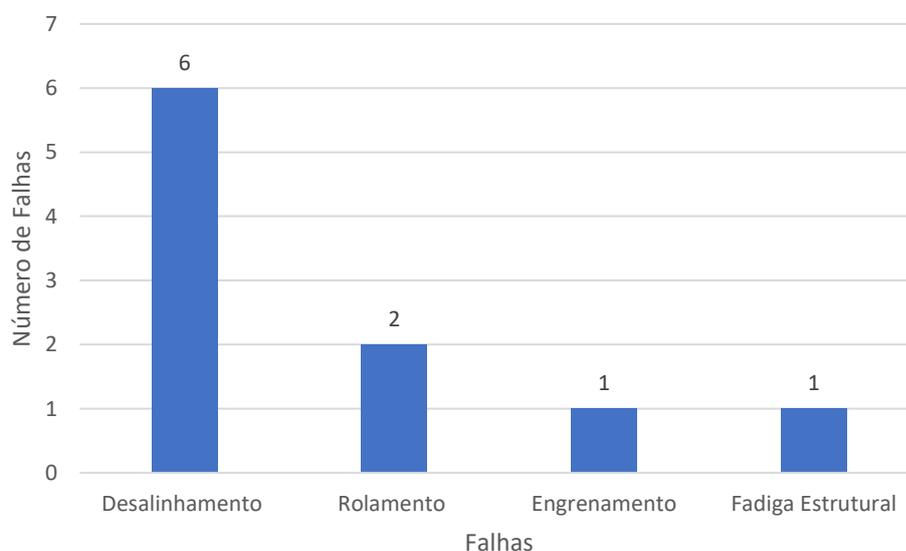
Tabela 5 – Falhas vigentes em 2021.

Falhas	Quantidade de falhas
Desalinhamento	6
Engrenamento	1
Rolamento	2
Fadiga Estrutural	1

Fonte: Acervo do Autor (2021).

Mediante ao fato, observa-se que a falha identificada com maior frequência é o desalinhamento. Tal evidência se destacou no equipamento em 6 oportunidades. A falha influencia na estrutura dos mancais. Por sua vez, a falha de engrenamento identificada, ocorreu no mancal de sustentação da coroa e pinhão, que estava relacionada ao desalinhamento das engrenagens. Para tanto, o restante das falhas restantes, circundam o rolamento e a fadiga estrutural, relacionadas como falhas de desalinhamento na parte estrutural do equipamento, expostas na Figura 40. Devido a excessiva presença de falhas de desalinhamento, mostra-se essencial a implantação de um procedimento de análise e tratamento de falhas. A tratativa dos 5 Porquês, vastamente utilizada em outras avaliações pode ser enquadrada na abordagem da investigação das causas raízes dessa falha.

Figura 40 - Gráfico Falhas ocorrentes em 2021.



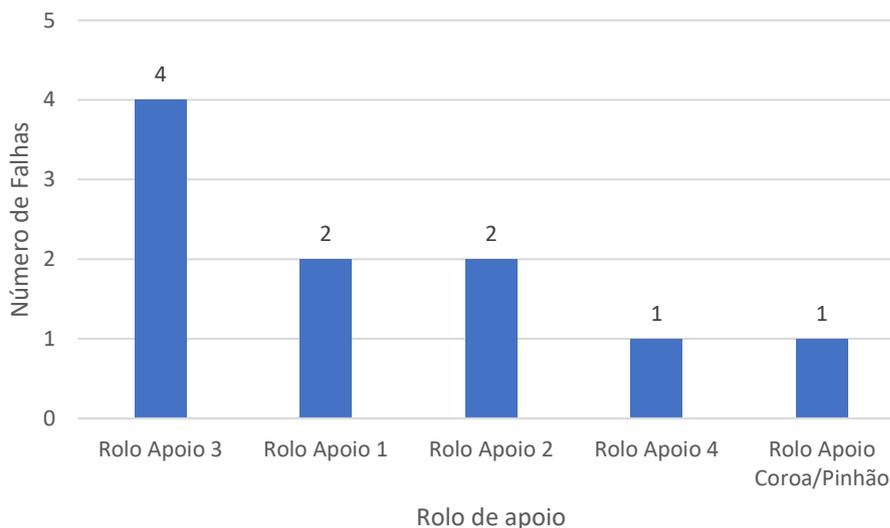
Fonte: Acervo do Autor (2021).

Dentre essas falhas, cada uma aparece distribuída entre os 5 conjuntos de mancais (4 rolos de apoio e 1 de coroa e pinhão).

- Rolo de apoio 1: 2 Vezes apresentou falha;
- Rolo de apoio 2: 2 Vezes apresentou falha;
- Rolo de apoio 3: 4 Vezes apresentou falha;
- Rolo de apoio 4: 1 Vez apresentou falha;
- Rolo coroa e pinhão: 1 Vez apresentou falha.

Mediante a essas informações, pode-se observar que o rolo de apoio conteve mais falhas manifestadas no rolo de apoio 3, conforme Figura 41.

Figura 41 - Gráfico Falhas ocorrentes em 2021 x Rolos de Apoio.



Fonte: Acervo do Autor (2021).

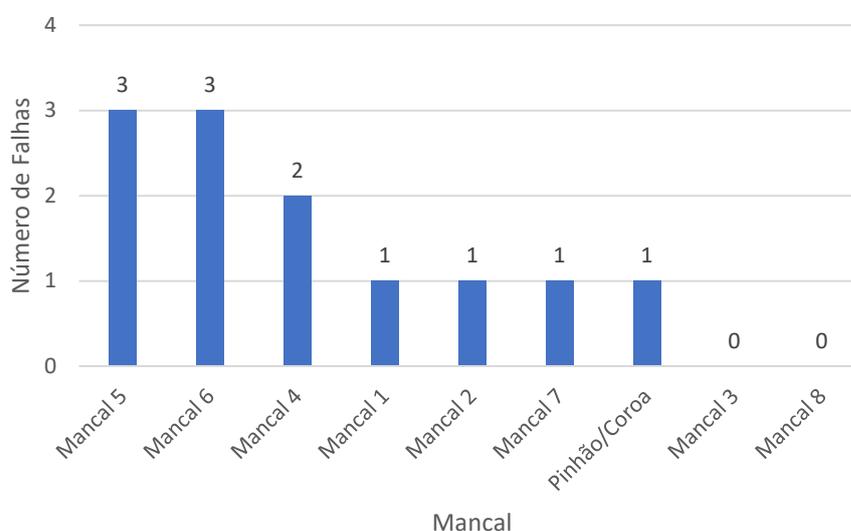
Outra análise a ser feita, está vinculada ao número de falhas apresentadas pelos mancais do equipamento rotativo:

- Mancal 1: 1 Vez apresentou falha;
- Mancal 2: 1 Vez apresentou falha;
- Mancal 3: 0;
- Mancal 4: 2 Vezes apresentou falha;
- Mancal 5: 3 Vezes apresentou falha;
- Mancal 6: 3 Vezes apresentou falha;
- Mancal 7: 1 Vez apresentou falha;

- Mancal 8: 0;
- Coroa e Pinhão: 1 Vez apresentou falha.

Com isso, conforme esperado, proveniente da excessiva quantidade de falhas no rolo de apoio 3, os mancais 5 e 6 deste rolo foram os que mais apresentaram falhas. Em um total de 3 falhas, por duas oportunidades, estes mancais falharam juntos e uma vez cada um deles falhou de forma isolada. O gráfico da Figura 42 ilustra tais fatos.

Figura 42 - Gráfico falhas ocorrentes Mancais x Rolos de Apoio.



Fonte: Acervo do Autor (2021).

Para tanto, vale ressaltar que esses mancais (5 e 6) do rolo de apoio 3 ficam ao lado da saída do material do equipamento rotativo, juntamente com o rolo de apoio 4. Interessante salientar que por meio dessa análise quase todos os mancais apresentaram falha, exceto os mancais 3 e 8. Primeiramente, o mancal 3 (do rolo de apoio 2) e 8 localizam-se próximo à entrada do material, enquanto o mancal 7, que completa o conjunto do rolo 4, apresentou falha e esse está do lado da saída do material. Com isso, pode-se perceber que o lado de saída do material está sendo o mais prejudicado.

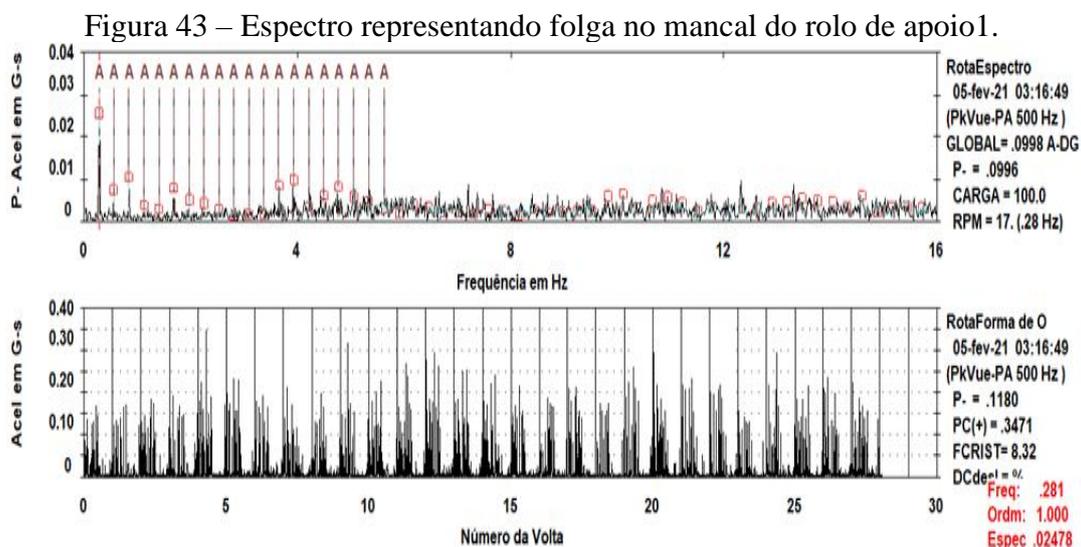
Relacionando as falhas encontradas com a ordens de substituição de rolamentos supracitadas, pode-se observar que relacionadas à substituição de rolamentos, 4 falhas foram constatadas. Dentre estas, duas estão vinculadas a substituições solicitadas pela manutenção preditiva (percentual de 50 %) e as outras duas não foram provenientes das

técnicas de análise de vibrações, ou seja, não foram solicitadas propriamente a substituição do rolamento. Estas últimas foram datadas:

- Ordem de Serviço no dia 13/02/2021, na qual foi substituído o rolo de apoio 3;
- Ordem de Serviço no dia 15/04/2021, na qual foi substituído o rolo de apoio 1.

Enquanto isso, as duas falhas de rolamentos identificadas foram:

- Ordem de Serviço no dia 05/02/2021, na qual foi identificado uma folga no mancal 2 do rolo de apoio 1, conforme espectro de vibração da Figura 43;

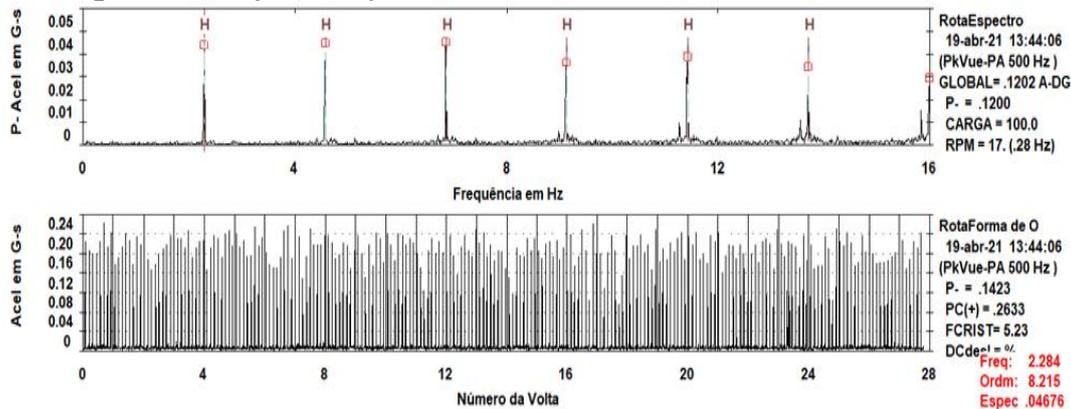


Fonte: Acervo do Autor (2021).

Nesta oportunidade foi percebido a presença de múltiplos harmônicos (múltiplos da rotação) do eixo do equipamento no espectro de frequência em valores consideráveis, pela baixa rotação do equipamento. Quando se identifica tal característica no espectro de vibração no domínio da frequência assegura-se a presença de folga nos componentes. Além disso, pôde ser observado que o espectro de forma de onda (espectro com toda a vibração presente no rolamento) apresentou características de impactos periódicos que reforçam a tese da presença de folga nos componentes do mancal 2 do rolo de apoio 1.

- Ordem de Serviço no dia 19/04/2021, na qual foi identificado falha no BPFO (pista externa do rolamento) no mancal de rolamento 4 do rolo de apoio 2, conforme Figura 44, que foi intervindo no dia 11/05/2021.

Figura 44 – Espectro representando falha no BPFO mancal e rolamento 4.



Fonte: Acervo do Autor (2021).

Nesta nova medição representada no espectro da Figura 44, a qual também estão os espectros no domínio de frequência e o espectro de forma de onda. Primeiramente, no espectro de frequência, mediante ao cadastro realizado do rolamento, fez-se possível identificar que os picos de frequências coincidem com a frequência relativa a BPFO, que é característica de falha de pista externa do rolamento do mancal 4 do rolo de apoio 2. Sequencialmente, no espectro de forma de onda, evidencia-se a confirmação desta falha, pois o mesmo apresenta vários picos periódicos que correspondem aos impactos periódicos sofridos pelo conjunto de rolamento que caracterizam que há um defeito nas pistas do rolamento em questão.

5.3.2 APLICAÇÃO DE ANÁLISES DA VARÁVEL TEMPERATURA NO EQUIPAMENTO ROTATIVO

Atualmente nos processos industriais e de manufaturas, a medição da variável temperatura é muito empregada. Uma vez que, diversos processos industriais envolvem esta variável. O equipamento rotativo estudado, exemplifica esta utilização na indústria, haja vista que a variável está diretamente ligada ao processo. Contudo, a temperatura em processos industriais pode ser gerada através da realização de movimento dos seus componentes mecânicos, dado que os mesmos sofrem atrito, como mancais de rolamento. A temperatura, em grande parte das vezes, é a primeira indicação da existência de possíveis problemas relacionados a conjuntos elétricos e mecânicos.

A medição da variável temperatura, em muitas situações, ocorre por meio de contato. Para tal, é necessário que o instrumento medidor esteja em contato com a fonte, a qual está gerando o calor. Com isso, a utilização de instrumentos que façam medições

de temperatura sem a necessidade de entrar em contato com objeto medido, é vastamente almejada. Em busca deste objetivo, a aplicação de pirômetros surge do âmbito de evitar o contato indesejado.

Visando a manutenção confiável do equipamento rotativo estudado, por meio do acompanhamento das condições de seus mancais e rolamentos, realizou-se a implementação da medição das temperaturas nos mancais de rolamentos de forma proativa com utilização de um pirômetro. Este equipamento classifica-se como um termômetro infravermelho portátil. Neste estudo, utilizou-se o pirômetro 62 MAX + do fabricante Fluke, ilustrado na Figura 45.

Figura 45 – Pirômetro 62 MAX+ do Fabricante FLUKE.



Fonte: Data Sheet FLUKE (2022, p.1).

Utilizado para aquisição e acompanhamento da temperatura dos mancais do equipamento estudado, o pirômetro possui características que proporcionam aplicabilidades para essa atividade. Resistente a água e à poeira, o item possui classificação IP54 e caso sofra queda de nível até 3 metros mantém-se resistente, além de ser prático para utilização, uma vez que é pequeno e leve (BERGMAN, T. et al., 2014).

Para fazer a medição infravermelha das temperaturas do alvo, o pirômetro 62 MAX + é dotado de dois lasers, que o auxiliam na identificação da área medida correspondente ao foco entre os dois pontos. Para tanto, é capaz de fazer medições de temperatura máxima, mínima, média e variação entre os dois pontos (BERGMAN, T. et al., 2014).

O pirômetro não disponibiliza a inserção de um dado importante, denominado emissividade. A emissividade é a propriedade radiante da superfície, definida pela taxa de radiação emitida por um corpo em uma determinada temperatura em um comprimento de onda que varia de 0 a 1. Demais características do pirômetro 62 MAX+ utilizado na aquisição dos dados de temperatura nesse presente estudo estão representadas na Figura 46, como faixas de temperaturas, precisão, resolução e etc.

Figura 46 - Especificações do pirômetro FLUKE 62 MAX+.

Especificações		
Faixa de medição [B>	Fluke 62 MAX	-30 °C a 500 °C (-22 °F a 932 °F)
	Fluke 62 MAX+	-30 °C a 650 °C (-22 °F a 1202 °F)
Precisão	Fluke 62 MAX	±1,5 °C ou ±1,5% de leitura, o que for maior -10 °C a 0 °C: ±2,0 -30 °C a -10 °C: ±3,0
	Fluke 62 MAX+	±1,0 °C ou ±1,0% de leitura, valendo o que for superior -10 °C a 0 °C: ±2,0 -30 °C a -10 °C: ±3,0
Tempo de resposta (95%)	Fluke 62 MAX	< 500 ms (95% de leitura)
	Fluke 62 MAX+	< 300 ms (95% de leitura)
Resposta espectral	7,5 a 14 microns	
Emissividade	0,10 a 1,00	
Resolução óptica	Fluke 62 MAX	10:1 (calculado a 90% de energia)
	Fluke 62 MAX+	12:1 (calculado a 90% de energia)
Resolução do Monitor	0,1 °C (0,2 °F)	
Repetitividade de leituras	Fluke 62 MAX	±0,8% da leitura ou
	Fluke 62 MAX+	±0,5% da leitura ou
Alimentação	Pilhas AA	
Vida útil da bateria	Fluke 62 MAX	10 horas com laser e luz de fundo ligados
	Fluke 62 MAX+	8 horas com laser e luz de fundo ligados

Fonte: Manual de dados técnicos do pirômetro 62 MAX+ (2022, p. 3).

De acordo com a utilização do pirômetro para aquisição das temperaturas dos mancais do equipamento, tendo como base as informações recolhidas e apresentadas a seguir nas tabelas de temperaturas, relata-se que apresentam históricos de trabalho dentro do range de temperatura que varia entre 55° a 60° C.

5.3.2.2 Análise de Dados - Temperatura

O acompanhamento da variável temperatura permite a constatação de alterações nas condições de um equipamento e de componentes. O crescimento na temperatura de mancais em máquinas rotativas pode indicar problemas relacionados a lubrificação, por exemplo. Assim sendo, tendo base no informado anteriormente, ao revisar os históricos de falhas durante o ano de 2021, emitidos pela manutenção preditiva, foram identificadas 10 falhas ao longo do ano no equipamento estudado. Dentre essas falhas estão inclusas avarias observadas tanto nos mancais de rolamento dos rolos de apoio (9) quanto nos mancais de rolamento do conjunto coroa e pinhão (1), conforme a Tabela 5 supracitada. Relacionando as falhas encontradas com as ordens de substituição de rolamentos supracitadas, pode-se observar que relacionadas à substituição de rolamentos, 4 falhas foram constatadas. Dentre estas, as duas que não foram diretamente provenientes da técnica preditiva de monitoramento de vibrações e foram datadas:

- Ordem de Serviço no dia 13/02/2021, na qual foi substituído o rolo de apoio 3;
- Ordem de Serviço no dia 15/04/2021, na qual foi substituído o rolo de apoio 1;
- Ordem de Serviço no dia 19/04/2021, falha de BPFO.

Para análise do mês de fevereiro de 2021, evidencia-se os dias anteriores a data 13/02/2021, em que se realizou a ordem de serviço para substituição do rolo de apoio 3. Por meio de Tabela 6, identifica-se as medições de temperaturas vigentes entre 09/02/2021 a 22/02/2021.

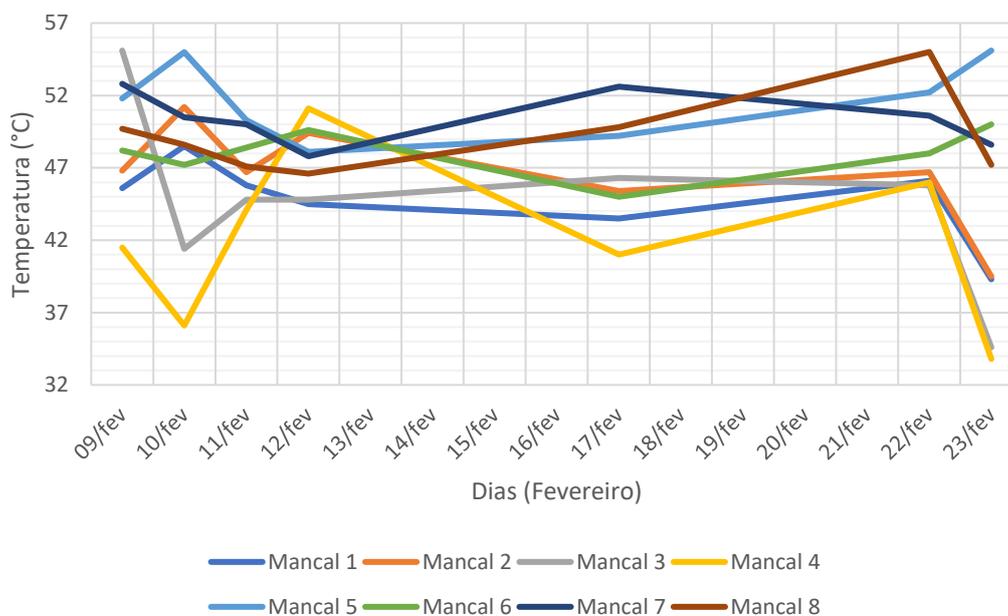
Tabela 6 – Medições de temperatura nos rolos de apoio em fevereiro de 2021.

Rolos de Apoio	09/fev	10/fev	11/fev	12/fev	17/fev	22/fev
1	45,6	48,5	45,8	44,5	43,5	46,1
2	46,8	51,2	46,7	49,4	45,4	46,7
3	55,1	41,4	44,8	44,8	46,3	45,8
4	41,5	36,1	44,1	51,1	41	46
5	51,8	55	50,3	48,1	49,2	52,2
6	48,2	47,2	48,4	49,6	45	48
7	52,8	50,5	50	47,8	52,6	50,6
8	49,7	48,6	47,1	46,6	49,8	55

Fonte: Acervo do Autor (2021).

Enquanto isso, a Figura 47 evidencia o gráfico de variação da temperatura nos rolos de apoio em fevereiro de 2021, é valido ressaltar que essa medição, como as outras medições de temperatura, foram realizadas com o equipamento em pleno funcionamento.

Figura 47 – Gráfico da variação de temperatura nos rolos de apoio em fevereiro de 2021.



Fonte: Acervo do Autor (2021).

Ainda centrado na substituição no rolo de apoio 3, ocorrida em 13/02/2021, por meio da Tabela 6 identifica-se no período de 09 a 12 de fevereiro de 2021, certa elevação brusca na temperatura (no dia 09/02/2021 de 55,1) e sequente baixa na temperatura nos dias subsequentes (entre 41,4 e 44,8). Este comportamento demonstra-se semelhante a intitulada curva da banheira. Neste comportamento, o equipamento ao entrar em um patamar de estabilidade, mostra-se propício a taxas de falhas constantes, com quebras ocorrentes de forma aleatória. Tais atividades ocorrem devido ao desgaste dos componentes. Portanto, avaliando a Tabela 6 em conjunto com o Gráfico da Figura 47, fica evidente a previsibilidade de falhas ocorrentes no dia 13/02/2021, conforme comportamento do rolo de apoio 3.

Sequencialmente, para análise do mês de abril de 2021, evidencia-se os dias anteriores a data 15/04/2021, em que se realizou a ordem de serviço para substituição do rolo de apoio 1. Por meio de Tabela 7, identifica-se as medições de temperaturas vigentes entre 12/04/2021 a 26/04/2021.

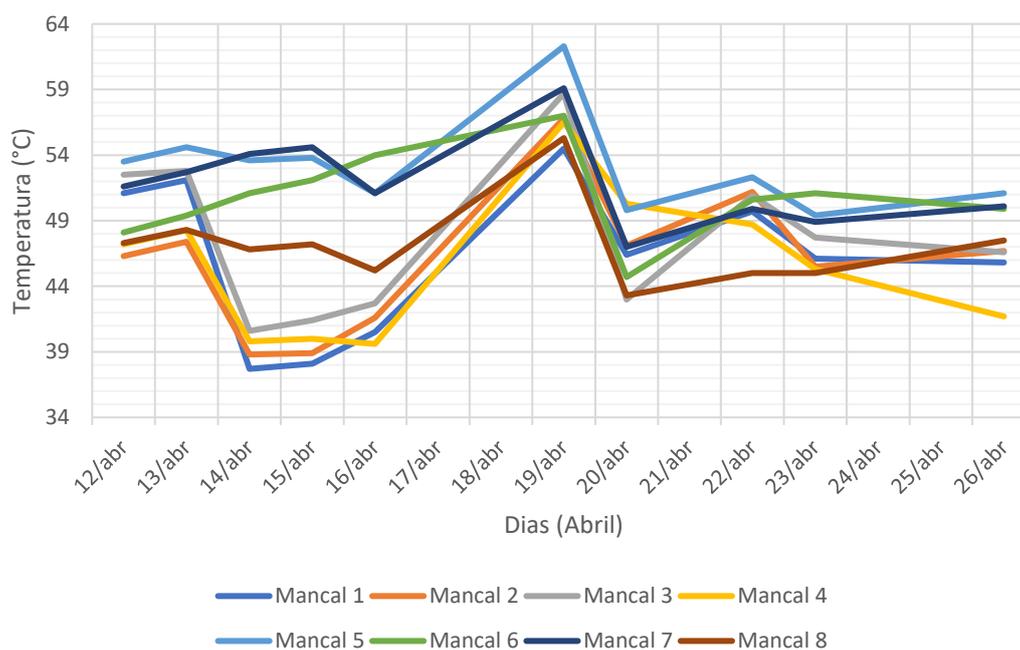
Tabela 7 – Medições de temperatura nos rolos de apoio em abril de 2021.

Rolos de Apoio	12/abr	13/abr	14/abr	15/abr	16/abr	19/abr	20/abr	22/abr	23/abr	26/abr
1	51,1	52,1	37,7	38,1	40,5	54,5	46,4	49,7	46,1	45,8
2	46,3	47,4	38,8	38,9	41,6	56,8	47,1	51,2	45,5	46,7
3	52,5	52,8	40,6	41,4	42,7	58,7	43	50,9	47,7	46,6
4	47,2	48,3	39,8	40	39,6	56,5	50,3	48,7	45,3	41,7
5	53,5	54,6	53,6	53,8	51,1	62,3	49,8	52,3	49,4	51,1
6	48,1	49,4	51,1	52,1	54	57	44,7	50,6	51,1	49,9
7	51,6	52,7	54,1	54,6	51,1	59,1	47	49,9	48,9	50,1
8	47,3	48,3	46,8	47,2	45,2	55,3	43,3	45	45	47,5

Fonte: Acervo do Autor (2021).

Enquanto isso, a Figura 48 evidencia o gráfico de variação da temperatura nos rolos de apoio em abril de 2021.

Figura 48 – Gráfico de variação de temperatura nos rolos de apoio em abril de 2021.



Centrado na substituição no rolo de apoio 1, ocorrida em 15/04/2021, por meio da Tabela 7 identifica-se no período de 12 a 15 de abril de 2021, certa elevação brusca na temperatura (nos dias 12/04/2021 e 13/04/2021 de 51,1 a 52,1) e sequente queda na temperatura nos dias subsequentes (nos dias 14/04/2021 e 15/04/2021 de 37,7 a 38,1). Este comportamento demonstra-se semelhante a intitulada curva da banheira. Neste

comportamento, o equipamento após subida brusca, entra em um patamar de estabilidade, mostrando-se propício a taxas de falhas constantes, com quebras ocorrentes de forma aleatória. Tais atividades ocorrem devido ao desgaste dos componentes. Portanto, avaliando a Tabela 7 em conjunto com o Gráfico da Figura 48, fica evidente a previsibilidade de falhas ocorrentes no dia 15/04/2021, conforme comportamento do rolo de apoio 1.

Como apresentado na Figura 44, o espectro de vibração no qual foi detectado falha de BPFO (falha na pista externa do rolamento), no dia 19/04/2021, após traçar um paralelo com a temperatura coletada no mês de abril com o pirômetro, identifica-se que a temperatura deste dia foi a maior do mês de abril de 2021, ilustra a Tabela 8. Tal informação pode representar e auxiliar na confirmação da falha encontrada na vibração, mediante a coleta de temperatura. Portanto, ao aliar e associar as duas variáveis passíveis de serem monitoradas a identificação de falhas torna-se mais previsível.

Tabela 8 – Medições de temperatura nos rolos de apoio em 12 a 19 de abril de 2021.

Mancal	12/abr	13/abr	14/abr	15/abr	16/abr	19/abr
1	51,1	52,1	37,7	38,1	40,5	54,5
2	46,3	47,4	38,8	38,9	41,6	56,8
3	52,5	52,8	40,6	41,4	42,7	58,7
4	47,2	48,3	39,8	40	39,6	56,5
5	53,5	54,6	53,6	53,8	51,1	62,3
6	48,1	49,4	51,1	52,1	54	57
7	51,6	52,7	54,1	54,6	51,1	59,1
8	47,3	48,3	46,8	47,2	45,2	55,3

Fonte: Acervo do Autor (2021).

5.4 SUGESTÕES DE MELHORIA

Centrado na necessidade de, além corrigir a falha, identificar a causa raiz dessas interrupções com o intuito de evitar que a mesma ocorra novamente, foram estudadas melhorias a serem implantadas a fim de aplicar melhorias nas análises de falhas (XENOS, 2014). Tais melhorias circundam nas análises de melhores técnicas de termografia, lubrificação e fixação dos mancais.

5.4.1 Proposta de Melhoria na Termografia

Conforme exposto anteriormente, para análise das temperaturas do equipamento rotativo foi utilizado como instrumento de medição, um equipamento intitulado pirômetro. O pirômetro não disponibiliza a inserção de um dado importante, denominado emissividade. A emissividade é a propriedade radiante da superfície, definida pela taxa de radiação emitida por um corpo em uma determinada temperatura em um comprimento de onda que varia de 0 a 1. Além dessa informação, o pirômetro indisponibiliza informações fundamentais para análise adequada da aquisição da temperatura.

Visando a manutenção confiável do equipamento rotativo estudado, por meio do acompanhamento das condições de seus mancais e rolamentos, uma sugestão, para o alcance destas informações é implementação da técnica de termografia.

Haja vista que foi possível estabelecer uma relação entre as variáveis de vibração com a temperatura coletada por meio de pirômetro, para identificação de falhas, sugere-se uma evolução de como proceder para coleta das temperaturas com utilização de câmeras termográficas, que fornecem maiores níveis de assertividade. Uma vez que, informações como emissividade podem ser imputadas para melhorias do processo de aquisição de dados de temperatura.

Conforme evidenciado anteriormente, esta técnica preditiva faz o uso de uma câmera termográfica, neste caso há disponível no complexo da empresa a câmera termográfica a T540, do fabricante FLIR. A Figura 49 ilustra a câmera supracitada.

Figura 49 - Câmera Termográfica T540.

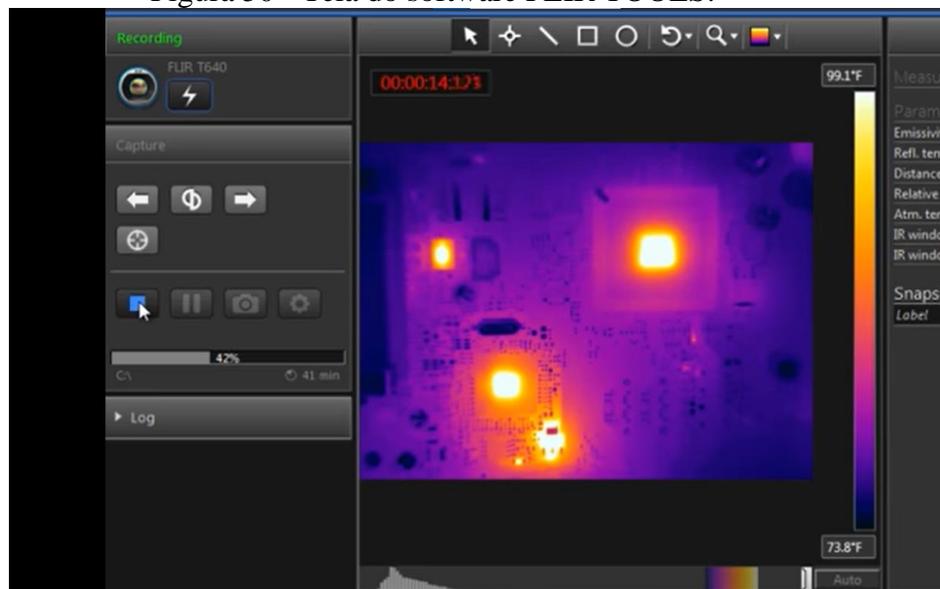


Fonte: Manual FLIR – Votex (2021).

A câmera termográfica é um instrumento capaz de realizar o levantamento da distribuição do calor irradiado por um corpo. Este equipamento fornece um termograma que é uma imagem no espectro infravermelho, definido como imagem termográfica do objeto de estudo. A análise nesse caso é efetuada no momento da inspeção, haja vista que esta é executada com o equipamento em operação sem a necessidade de parada do processo produtivo. Os termogramas somente registram dados quando identificam um desvio na temperatura, o que pode inferir uma provável ocorrência de defeito no equipamento analisado. Para seu funcionamento faz-se necessário efetuar um cadastro de dados.

Para a comunicação entre o termovisor e um computador para a análise dos termogramas, utiliza-se o *software Flir Tools* do fabricante FLIR o mesmo da câmera termográfica. O Flir Tools é um conjunto de *software* especificamente concebido para facilitar a atualização de câmeras termográficas e a criação de relatórios de inspeção. Além da emissão de relatórios, o aplicativo permite a transferência das imagens para dispositivos móveis via Wifi (VORTEX, 2021). A Figura 50 ilustra a utilização do *software* para a análise de termogramas de equipamentos.

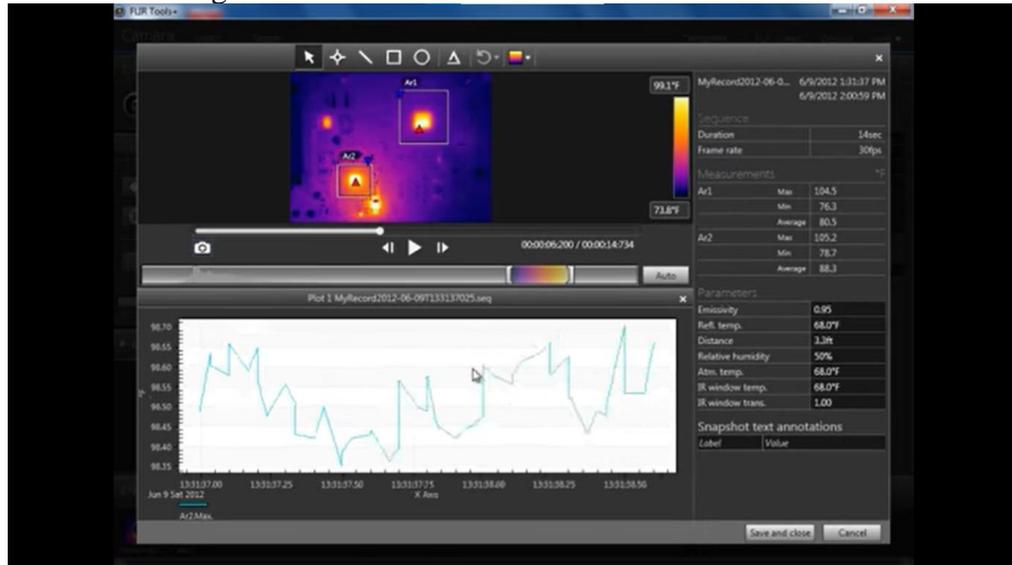
Figura 50 - Tela do software FLIR TOOLS.



Fonte: Manual FLIR – Vortex (2021).

Após a importação das imagens das câmeras termográficas, o *software* disponibiliza a criação de gráficos com as variações das temperaturas medidas ao decorrer do tempo. A Figura 51 exemplifica um dos gráficos dispostos pelo *software*.

Figura 51 - Tela do software FLIR TOOLS.



Fonte: Manual FLIR – Votex (2021).

A informação mais importante a ser inserida na câmera termográfica é a emissividade. A emissividade é a propriedade radiante da superfície, definida pela taxa de radiação emitida por um corpo em uma determinada temperatura em um comprimento de onda que varia de 0 a 1. Essa propriedade fornece uma medida da eficiência na qual uma superfície emite energia em relação ao corpo negro (BERGMAN, T. et al., 2014). Um corpo negro possui a emissividade de 1 ou 100 %, ou seja, emite toda sua energia por radiação da sua superfície.

A emissividade de um corpo depende diretamente da superfície do material e do acabamento dessas superfícies. Por exemplo, alguns materiais orgânicos, revestidos ou que possuem suas superfícies oxidadas podem ter valores de emissividade variando próximo de 0,95. A Tabela da Figura 52 expõe valores aproximados de emissividade de alguns materiais metálicos.

Figura 52 - Valores aproximados de emissividade de alguns materiais metálicos.

Material	Valores Emissividade		
	1,0 μm	1,6 μm	8-14 μm
Alumínio			
Não Oxidado	0.1-0.2	0.02-0.2	nr
Oxidado	0.4	0.4	0.2-0.4
Cobre			
Polido	nr	0.03	nr
Áspero	nr	0.05-0.2	nr
Oxidado	0.2-0.8	0.2-0.9	0.4-0.8
Ouro			
	0.3	0.01-0.1	nr
Inconel			
Oxidado	0.4-0.9	0.6-0.9	0.7-.95
Jateado	0.3-0.4	0.3-0.6	0.3-0.6
Eletropolido	0.2-0.5	0.25	0.15
Ferro			
Oxidado	0.4-0.8	0.5-0.9	0.5-0.9
Não Oxidado	0.35	0.1-0.3	nr
Enferrujado	nr	0.6-0.9	0.5-0.7
Fundido	0.35	0.4-0.6	nr
Ferro Fundido			
Oxidado	0.7-0.9	0.7-0.9	0.6-0.95
Não Oxidado	0.35	0.3	0.2
Fundido	0.035	0.3-0.4	0.2-0.3
Níquel			
Oxidado	0.8-0.9	0.4-0.7	0.2-0.5
Eletrolítico	0.2-0.04	0.1-0.3	nr
Aço			
Laminado a frio	0.8-0.9	0.8-0.9	0.7-0.9
Folha de solo	nr	nr	0.4-0.6
Folha Polida	0.35	0.25	0.1
Fundido	0.35	0.25-0.4	nr
Oxidado	0.8-0.9	0.8-0.9	0.7-0.9
Inoxidável	0.35	0.2-0.9	0.1-0.8
Zinco			
Oxidado	0.6	0.15	0.1
Polido	0.5	0.05	nr

Fonte: Site FLUKE (2021).

Com isso, para a execução de uma análise assertiva dos dados levantados com auxílio da câmera termográfica na verificação de mancais de rolamentos com superfície composta por ferro fundido, a sugestão é iniciar com a emissividade igual a 0,95.

5.4.2 Proposta de Melhoria na Lubrificação dos Mancais

Um dos lubrificantes testado no equipamento rotativo em um dos conjuntos dos mancais, é a graxa MATRIX® LM do fabricante Whitmore. Este é a base de espessante de complexos de sulfato de cálcio, encontrado em altas porcentagens, próximas de 30 a 35 %. Tal característica permite que a superfície em que está sendo aplicada seja mantida lubrificada mesmo na ausência de óleo por um tempo determinado.

Comparado ao lubrificante já utilizado nos mancais de rolamentos, a graxa pode trabalhar em temperaturas de até 260°C, em regime contínuo se for relubrificado o rolamento em períodos de 30 minutos com determinadas quantidades. Por isso, é

recomendado a utilização de lubrificação centralizada, mas podem suportar picos ocasionais de 315°C por pequenos períodos de 5 a 10 minutos, sem maiores prejuízos para o lubrificante. Em sua composição, contém aditivos que fornecem resistência à extrema pressão, além de suportarem presença de água, calor, ataques químicos. Além disso, apresenta um selo protetivo contra contaminação, uma excelente operação para altas cargas (*Four Ball* MAIOR que 800 kgf) e alta estabilidade ao cisalhamento. Todas essas características provocam um aumento na disponibilidade operacional. Outras características estão representadas na Figura 53 a seguir:

Figura 53 – Características do lubrificante *MATRIX® LM*.

ASTM#	CARACTERÍSTICAS		
	Grau NLGI	1	2
D-217	Penetração	315-345	285-315
D-2265	Ponto de Gota, °C	260	260
D-445	Viscosidade Cinemática (óleo básico com polímero)		
	cSt @ 40°C	500	500
	cSt @ 100°C	31	31
	Viscosidade Cinemática (óleo básico)		
	cSt @ 40°C	130	130
	cSt @ 100°C	12	12
D-2509	Carga Timken OK, lb	50	55
D-2596	Four Ball EP		
	Ponto de Solda, kgf	800+	800+
	Índice de Carga de Desgaste	70	70
D-2266	Four Ball EP - Diâmetro da Calota, mm	0,48	0,45
D-1264	Lavagem por Água, % Perda	-	1
	Concentração Espessante Sulfonato de Cálcio, %	30-35	30-35
D-1743	Teste de Ferrugem	Passa	Passa
Padrão OEM	Bombeabilidade em baixa temperatura, Lincoln Ventmeter @400 psi, °C	-11	1

Fonte: BOLETIM TÉCNICO WHITMORE (2018, p. 1)

5.4.3 Proposta de Melhoria na Fixação dos Mancais

Relacionados aos conjuntos de mancais do equipamento, os rolos os quais fazem a interligação dos dois mancais, sofrem desgaste natural de acordo com a tempo de trabalho. Uma vez que existe o contato deles com as alianças do equipamento. Com isso, é de suma importância que o material do rolo seja mais “macio” do que a da aliança. Uma vez que, uma possível substituição da aliança teria um valor mais elevado que a substituição do rolo. Entretanto, não deve ser tão “macio”, para que não faça com que o rolo seja danificado com alta frequência.

Faz necessário realizar a medição do nível de desgaste dos rolos e acompanhar os parâmetros afins de identificar possíveis desgastes no mesmo. Tal fato, pode ser gerado até mesmo pelo um possível desalinhamento do equipamento, ou até a agregação de partículas que podem gerar esses desgastes.

Uma possível verificação é aferimento do ângulo de inclinação do equipamento, que de projeto deve ser de 2 %. Este deve ter um ângulo suficientemente grande, que faça transportar o material no interior, desde a entrada até a saída do equipamento por gravidade e que o ângulo não seja tão grande que seja prejudicial ao equipamento e seus componentes através de uma sobrecarga que isso geraria.

O equipamento é para operação em temperaturas elevadas, o interior do mesmo deve ser revestido de material refratário para garantir a sua integridade estrutural. Existem parafusos de ajuste dos mancais em relação ao alinhamento dos mesmos. Geralmente as falhas encontradas são em relação ao desalinhamento dos mancais, devido ao deslocamento axial do equipamento, o que pode levar a falhas mais severas. Para tanto, pode ser relacionado ao carregamento do equipamento ou uma distribuição não homogênea de material ao longo de todo o equipamento. Portanto, como sugestão para a melhoria da fixação dos mancais e dos “sargentos” (auxiliador no momento do alinhamento), instituiu-se utilização das porcas autotravantes, exposta na Figura 54. Estas contêm um anel de elástico de nylon, encontrado na parte superior da rosca interna da porca. O anel de nylon no interior da porca faz o travamento da mesma juntamente a rosca do parafuso, provenientes da força de compressão radial. Com isso, a porca autotravante tem seu próprio sistema de travamento.

Figura 54 – Porca Autotravante Nylon.



Fonte: Metalbo (2017, p. 14)

No equipamento em questão, a porca pode ser usada conforme supracitado e levando em consideração que a variação de temperatura no local não ultrapasse seu range situado entre -70°C e $+120^{\circ}\text{C}$. Proveniente do anel de nylon, a porca não pode ser reutilizada, pois o anel pode se danificar. Fato que requer maior cuidado ao ser montada. Caso seja inspecionada sua reutilização, deve-se aplicar sobre a mesma um torque de aperto uniforme.

Outro fator importante, possibilitado pela porca, é a manutenção de duas peças unidas mesmo quando a montagem se encontra sujeita a pancadas e vibrações. O equipamento rolante em questão, sofre tais avarias que podem provocar a quebra de seus rolos e finalizar suas atividades de forma emergencial. Como característica, esta porca oferta métrica de tamanho de 1/8” até 4” polegadas.

Todas essas recomendações podem auxiliar no aumento da confiabilidade e disponibilidade do equipamento com mais ferramentas disponíveis para melhorias de tomadas de decisões, contudo é necessário verificar implicações relacionadas com mão de obra disponível da empresa de modo a não onerar o setor dedicado traçando um plano de manutenção adequado para cada realidade.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas preditivas de análises de falhas proveem inúmeras vantagens às empresas. Tais práticas, com o decorrer dos progressos tecnológicos carecem de melhorias. À vista disso, o presente trabalho objetiva desenvolver um estudo da viabilidade das técnicas preditivas aplicadas em um equipamento rotativo instaurado em uma indústria mineradora, a fim de aprimorar a eficiência operacional do ativo. O estudo concentrou-se em uma indústria mineradora na cidade de Araxá-MG, portadora de um equipamento rotativo com histórico de falhas, principalmente em seus mancais.

Caracterizada como um estudo de caso, nesta pesquisa foram aplicadas práticas de manutenção preditiva, a fim de aperfeiçoar o funcionamento do equipamento rotativo estudado e garantir sua confiabilidade. Levando em conta a criticidade do equipamento para planta, analisou-se as aplicações das técnicas preditivas: análise de vibrações e termográfica, visando a identificação das causas raízes das falhas encontradas. Para esse fim, atuou-se no estudo e arranjo físico do equipamento, delineamento do histórico e análise do equipamento. Somente assim, iniciou-se a abordagem dos parâmetros técnicos para aplicação das técnicas preditivas. Por fim, apresentou-se a análise resumida perante as informações colhidas e proposição de melhorias a serem implantadas.

Inicialmente, abordou-se descritivos relevantes sobre descritivos e arranjo físico do equipamento rotativo estudado. Desde a apresentação de características até sua atuação nos processos da instituição. Esta etapa fornece informações essenciais para o entendimento da pesquisa, haja vista que predispõe informações indispensáveis para a avaliação do equipamento estudado. Após esta abordagem, inicia-se o delineamento do histórico de falhas, a partir do levantamento, identificação e análise das falhas funcionais emergências ao longo da vida útil do ativo, por meio de uma amostragem recente. Levando em conta que a indústria em questão padece com frequentes falhas nos mancais, evidencia-se que este projeto apresentou foco nestes componentes. Em seguida, iniciou-se a abordagem dos parâmetros técnicos para aplicação das técnicas preditivas de análise de vibrações e de acompanhamento das temperaturas dos mancais. Primeiramente, na análise de vibrações a identificação das falhas ocorreu a partir da verificação de frequências específicas dos mancais. Por intermédio da análise do espectro de frequência e espectro no domínio do tempo identificou-se falhas em mancais do equipamento rotativo. Sequencialmente, na análise das temperaturas coletadas através de um pirômetro

levantou-se os dados de temperatura dos mancais do equipamento e oscilação das temperaturas do mesmo, predispondo as falhas conforme avarias encontradas. Finalmente, após o levantamento do histórico de falhas e exposição dos dados das técnicas de vibração e de acompanhamento da temperatura no equipamento rotativo, sucedeu-se a análise desses dados. Tal análise foi realizada a partir da concatenação das informações, ou seja, comparativo entre as datas ocorrentes falhas e as análises anteriores que possam evidenciar que a falha irá ocorrer. Por fim, propõe-se melhorias a serem realizadas nas análises de falhas implantadas.

Finalmente, a abordagem e instauração das técnicas preditivas avançadas evidenciam fundamentais benefícios à indústria. Destaca-se que o acompanhamento do ativo durante sua vida útil por meios das técnicas de manutenção preditiva, estabelece melhores garantias de confiabilidade. Na análise de vibrações, após identificação da falha no dia 19/04/2021, averiguou-se inadequação no espectro de frequência no mancal do equipamento. Tal atividade foi confirmada na análise das temperaturas coletadas após identificação da oscilação brusca da temperatura no mesmo. Sequencialmente, após identificação das falhas ocorrentes nos rolos de apoio do equipamento rotativo ao decorrer do ano de 2021 (13/02/2021, 15/04/2021 e 19/04/2021), verificou-se que nas três eventualidades a falha foi evidenciada pelas duas análises preditivas (análise de vibração e análise de temperaturas). As informações colhidas na análise das temperaturas podem representar e auxiliar na confirmação da falha encontrada na vibração. Portanto, ao aliar e associar as duas variáveis passíveis de serem monitoradas a identificação de falhas torna-se mais previsível. Consequentemente, caso realizadas nas devidas periodicidades, as análises oferecem resposta efetiva na identificação das falhas de forma prévia.

Em conclusão, ainda se validou a inclusão de melhorias a serem aplicadas nas técnicas preditivas empregadas. A instauração destas práticas garante vantagens reais à indústria em questão. Através desse estudo, constatou-se a necessidade de explorar técnicas preditivas na manutenção dos ativos, a fim de que falhas emergenciais não venham a ocorrer. A disponibilidade e confiabilidade do ativo garantem que as empresas se encontrem à frente em um mercado tão competitivo como o atual. O progresso das técnicas preditivas abre margens para que a indústria alcance seus objetivos. Haja vista que foi possível estabelecer uma relação entre as variáveis de vibração com a temperatura coletada por meio de pirômetro, para identificação de falhas no equipamento, é possível portanto sugerir para essa aplicação a utilização de câmeras termográficas que fornecem maiores níveis de assertividade, uma vez que informações como emissividade podem ser

imputadas para melhorias do processo de aquisição de dados de temperatura, além de que a câmera termográfica faz suas medições de forma a realizar uma varredura total do objeto medido e realizar uma medição da distribuição da radiação do objeto.

A primeira sugestão que pode ser aplicada, vem de uma boa prática de mercado, na qual equipamentos industriais são monitorados em diferentes períodos de tempo sendo que, quanto mais críticos, menores serão os períodos de tempo e quanto menor a criticidade maior serão os períodos de tempo de aplicação de técnicas preditivas. Em equipamentos de criticidade A, semelhante é o equipamento estudado neste trabalho, é sugerido que as diretrizes para aplicação do plano de manutenção preditiva com aplicação de análise de vibrações sejam feitas em períodos 15 dias. Para essa mesma criticidade a sugestão é que seja criado um plano para aplicação da técnica de termografia, uma vez que esse equipamento não há históricos de aplicação para suas partes mecânicas, os planos devem contemplar períodos que devem acompanhar a técnica de análise de vibrações. Seguindo para outra técnica de manutenção preditiva cabível de ser aplicada, seria a análise de lubrificante, que o ideal é que seja criado um plano para que a coleta de amostras de lubrificantes em períodos de 30 dias. Todas essas recomendações podem auxiliar no aumento da confiabilidade e disponibilidade do equipamento com mais ferramentas disponíveis para melhorias de tomadas de decisões. Contudo é necessário verificar implicações relacionadas com mão de obra disponível da empresa e custos relacionados de modo a não onerar o setor dedicado e conseqüentemente a empresa, traçando um plano de manutenção adequado para cada realidade.

Para trabalhos futuros pode-se sugerir a realização de estudos relacionados a aplicação das tecnologias que a indústria 4.0 disponibiliza. Estudos esses relacionados a utilização de sistemas de coleta de vibração de forma *online*, para comparar com resultados adquiridos por meio da aplicação de coleta de vibrações de forma *off-line*. Haja vista que fatores como tempo de coleta em equipamentos de baixa rotação que demandam alto tempo dedicado para uma inspeção completa podem ser diminuídos com essas aplicações, além de fatores relacionados à segurança do pessoal. Assim possibilitando uma economia de recursos destinados a esta atividade de coleta de dados de vibração. Em contra partida mesmo tendo muitos sistemas com essa característica de coletas de vibração de forma *online*, nos dias atuais o investimento inicial ainda são altos, porém se aplicados conforme necessidade e de forma assertiva os retornos também podem ser consideráveis.

Também para trabalhos futuros, pode ser sugerido a realização de forma a correlacionar dados de vibração com dados de temperatura coletados com uma câmera termográfica, uma vez que os dados adquiridos pela câmera termográfica são mais precisos que o levantados com o pirômetro, com isso, ao correlacionar essas duas variáveis os resultados podem ser satisfatórios.

Por fim pode-se sugerir que seja incentivado a realização de parcerias entre as empresas e as instituições de ensino como CEFET-MG de Araxá-MG Campus IV, a fim de se atingir melhorias nas estratégias de manutenções e sobretudo nas técnicas de manutenção preditiva.

REFERÊNCIAS

- ABRAMAN. **A Situação da Manutenção no Brasil**. Documento Nacional, 2013.
- ALMEIDA, M. T; ALMEIDA, F. R. V. (Professores). **Princípios de Diagnósticos de Defeito em Máquinas Rotativas**. Apostila do Curso de Análise de Vibração Módulo I da FUPAI, 2014.
- ALMEIDA, P. **Gestão da Manutenção Aplicada às Áreas Industrial, Predial e Elétrica**. 1 ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.
- BERGMAN, T. *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Tradução de Eduardo Queiroz; Fernando Pellegrini. 7 ed. Brasil. Editora gen LTC, 2014.
- BERTOLDO, L. **Princípios Da Teoria Térmica**. (2009). (n.p.): (n.p.).
- BISCEGLI, C. **Conceitos de Física – Embrapa**. São Carlos – SP, 2004.
- BISTAFA, S. R. (2018). **Acústica aplicada ao controle do ruído**. Brasil: Blucher. Física com aplicação tecnológica: Oscilações, ondas, fluidos e termodinâmica. (2018). Brasil: Editora Blucher.
- BOJORGE, N. **Unidade 3 Medição de Temperatura** – Departamento de Engenharia Química e de Petróleo – UFF. 2017
- BOLETIM TÉCNICO. **Matriz LM**. Disponível em https://www.unotech.com.br/arquivos/bt_matrix_lm_rev_03_julho_2018.pdf. Acesso em: 28 dez. 2021.
- BORGES, A; RODRIGUES, C. **Introdução à Física Acústica**. 2016.
- BORGES, P. **Apostila de Física do Colégio Politécnico UFSM**. Santa Maria, 2019.
- BRAIDOTTI, W. et al. **Entendendo a Gestão de Ativos (ISSO-55001) na Prática**. 1 ed. Rio de Janeiro: *Editora Ciência Moderna Ltda*, 2020.
- CATIVO, J. **COMO FAZER A METODOLOGIA EM UM PROJETO?** 12 abril 2017. Disponível em: <http://www.deinf.ufma.br/~portela/metodologia.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2021.
- Centro de Treinamento SKF, WE 302 – **Lubrificação Industrial Avançada**, Curso de Lubrificação Industrial Avançada. Cajamar-SP: SKF, 2019.
- COSTA, E. C. d. **Acústica técnica**. Brasil: Blucher . 2003.

COSTA, D. Técnicas Avançadas de Análise de Vibração no âmbito do Controlo de Condição. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Área de Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, p. 12. 2017.

DILLENBURG, J. et al. **CONSIDERAÇÕES SOBRE A CALIBRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PIRÔMETROS DE RADIAÇÃO QUE OPERAM EM UMA BANDA DO INFRAVERMELHO E PROPOSTA DE NORMA TÉCNICA.** Disponível em: <<https://abcm.org.br/anais/encit/2000/arquivos/s19/s19p02.pdf>>. Acesso em: 22 de jan. 2022.

DONOSO, J. **Som e Acústica.** Universidade de São Paulo – Instituto de Física de São Carlos.

DYNAMOX, Dynamox Exception Management. Solução Dynapredict. Disponível em: https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms%2Ffiles%2F36695%2F1611693070Brochura-PT_compressed.pdf. Acesso em: 09 set. 2021.

DYNAMOX. Curva P-F: Como o seu entendimento pode contribuir para a Manutenção. 2020. Disponível em: <https://dynamox.net/blog/curva-p-f-como-o-seu-entendimento-pode-contribuir-para-a-manuten%C3%A7%C3%A3o/>. Acesso em: 16 jan. 2021.

EMERSON. Manual CSI 2140 Machinery Health Analyzer. Guia de Início Rápido. 2016. Disponível em: <https://www.emerson.com/documents/automation/manuals-guides-guia-de-in%C3%A9cio-r%C3%A1pido-ams-pt-39748.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2021.

EMERSON. Manual CSI 2140 Machinery Health Analyzer. Product Data Sheet. 2017. Disponível em: <file:///C:/Users/lidia/Downloads/product-data-sheet-ams-2140-four-channel-vibration-analysis-en-39392.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2021.

EMERSON, Process Management. Análise de Vibrações Nível I. Apostila do Curso de Análise de Vibrações da CSI means Reliability. 2006.

FACULDADE ANHANGUERA JARAGUÁ DO SUL. ANUÁRIO DA PRODUÇÃO ACADÊMICA DOCENTE – ACELERÔMETROS. 2018.

FLUKE. Fluke Process Instruments. 2021. **Emissivity Values for Metals.** Disponível em: <https://www.flukeprocessinstruments.com/en-us/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/emissivity-metals>. Acesso em: 08 set. 2021.

FLUKE. Fluke Process Instruments. 2006. **Ferramentas de Infravermelho da Fluke.** Disponível em: <https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/2674264u-brpt-w.pdf?QhFBwZsN1kggLo45FaedWcTxC8wsOM.Y>. Acesso em: 22 jan. 2022.

FLUKE. Fluke Process Instruments. 2012. 62 MAX/62 MAX + Infrared Thermometer Manual do Usuário. Disponível em: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/62max__umpor0100.pdf. Acesso em: 22 jan. 2022.

FOGLIATTO, F.; RIBEIRO, J. **Confiabilidade e Manutenção Industrial.** 7. ed. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2009.

FROTA, A.; SCHIFFER, S. **Manual de conforto Térmico**. 7 ed. São Paulo: Editor Nobel, 2006.

GASPAR, Alberto. **Física - Ondas, Óptica e termodinâmica**. São Paulo: Editora Ática, 2000.

GASPAR, A. **Compreendendo a Física 2**. 2. ed. São Paulo: Editora Ática, 2013.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, I. et al. **Pirômetros**, 2015.

GUIMARÃES, L; FONTE BOA, M. **Física: Eletricidade e Ondas**. 2 ed. Niterói-RJ: Futura, 2004.

HALLIDAY, D. **Fundamentos de Física 2**. 4. ed. Editora LTC.

HELIMAX. **Redutores de Eixo Paralelos/Ortogonais e engrenagens Helicoidais Retificadas**. Disponível em: <http://www.wegcestari.com.br/index.php/pt/downloads/catalogos-tecnicos>. Acesso em: 16 jan. 2021.

HENFEL. Henfel Part of Ringfeder Power Transmission. 2021. **Acoplamento Hidrodinâmicos Segurança e alto desempenho**. Disponível em: <https://www.henfel.com.br/produtos/acoplamentos-hidrodinamicos>. Acesso em: 16 jan. 2021.

HENFEL. **Soluções para Sistemas de Acionamentos**. Disponível em: http://www.henfel.com.br/codeigniter/assets/downloads/catalogos/acoplamento-hidrodinamico/acoplamento_hidrodinamico_pt.pdf. Acesso em: 16 jan. 2021.

INFRARED TRAINIG CENTER, Termografia Nível 1. **Apostila Manual do Curso de Termografia Nível 1**. Sorocaba-SP: ITC, 2019.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção Função Estratégica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2017.

LABOROIL. **Ferramenta Indispensável na Manutenção**, Belo Horizonte- MG: 2012.

LABRE, P. **Sobre Análise de Vibrações e Termografia na Manutenção e Confiabilidade de Equipamentos em uma Usina de Beneficiamento de Sementes**. Trabalho Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, p. 24. 2019.

LAZZARINI, V. **Elementos de Acústica**. Londrina - PR. 1998.

LUBRAX CLAY. **Informações Técnicas**. Disponível em: <https://www.mecflux.com.br/wp-content/uploads/2018/03/LUBRAX-CLAY-%e2%80%a6.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2021.

LUBRIN. **Apostila de Ferrografia**. São Paulo-SP: 2012.

MANUAL DADOS TÉCNICOS FLUKE: TERMÔMETROS INFRAVERMELHO A LASER PORTÁTIL 62 MAX+, 2022.

MARTINS, M.; SARTO, E. **Aplicação da Preditiva on-line Como Ferramenta para o Aumento da Disponibilidade e Confiabilidade dos Equipamentos Rotativos em uma Empresa Ramo Petrolífero**. 29º Congresso Brasileiro de Manutenção – ABRAMAN. 2014.

MARÇAL, R.; SANTOS, R. **Sobre Medição, Análise e controle de vibração em máquinas industriais: Estudo de Caso em uma Empresa de Grande Porte do Setor Madeireiro**. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Automação Industrial), Universidade Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, p. 59. 2013.

METALBO. **Porcas e Parafusos**. Disponível em: http://metalbo.com.br/site/arquivos/LISTA_DE_PREcO_2017.pdf. Acesso em 28 dez. 2021.

MOBIUS INSTITUTE. **Princípios de Vibração ISO 18436-2. Categoria II**. 2017.

MORAIS, D.; RODRIGUES, D. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada: Ondas Ultrassônicas: teoria e aplicações industriais em ensaios não-destrutivos**. 2017.

NASCIF, J. **Manutenção Função Estratégica**, Apostila Tecnologia Empresarial, TECEM, 2020.

NASCIMENTO, E. **MANUTENÇÃO PREDITIVA: CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE FALHAS EM MÁQUINAS ROTATIVAS UTILIZANDO DEEP LEARNING**. 2019.

NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de manutenção preditiva**. São Paulo: Edgard Blucher, 2002.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica: Fluidos, oscilações e ondas, calor**. Brasil: Editora Blucher. 2018.

PARKER. **NORMAS E PADRÕES (ISO 4406 E NAS 1638) NO CONTROLE DA CONTAMINAÇÃO**. 2019.

PAVANI, S. **Instrumentação Básica** – Colégio Técnico Industrial de Santa Maria – Escola Técnica Aberta do Brasil – UFSM. Santa Maria – RS. 2011. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/11/07_instrumentacao_basica.pdf. Acesso em: 22 jan. 2022

PEREZ-WILSON, M. **Seis Sigma: Compreendendo o Conceito, as Implicações e os Desafios**. 1.ed. Rio de Janeiro. Qualitymark Editora Ltda, 1999. 283p

QUERINO, T. **Metodologia de Gestão de Ativos para Chave Seccionadora 15 kV**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Editora Pearson Prentice Hall, 2008.

REGAP. Refinaria Gabriel Passos, 2014. 34 slides

SHIGLEY, J. MISCHKE, C. BUDYNAS, R. Projeto de Engenharia Mecânica. Tradução de João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

SILVA, C.; SILVA, I.; et al. **Termodinâmica metalúrgica: balanços de energia, soluções e equilíbrio químico em sistemas metalúrgicos**. Editora Blucher. 2018.

SILVA, D. H. J. **Processamento de Sinais para Monitoramento de Vibrações em Unidades Geradoras Hidrelétricas**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, p. 136. 2013.

SIMÕES, S. **PROJETO INDIVIDUAL MESTRADO EM SEGURANÇA E HIGIENE NO TRABALHO**. 2014.

SKF. Reliability Systems. Tecnologia de Vibrações. 2004.

SOEIRO, M; OLIVIO, A; LUCATO, A. **Gestão da Manutenção**. 1. ed. Londrina: Editora Educacional S.A., 2017.

SONNTAG, R. E., BORGNACKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. 8 ed. Brasil: Editora Blucher, 2018.

TELES, J. **Planejamento e Controle de Manutenção Descomplicado: Uma Metodologia passo para Implantação do PCM**. 1. ed. Brasília: Engeteles Editora, 2019.

TELLES, D.; NETO, J. **Física com aplicação tecnológica: Oscilações, ondas, fluidos e termodinâmica**. 1 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2018.

VEDAN, A.; TRACTIAN: **Saiba tudo sobre matriz de criticidade**. 2021.

VIANA, H. R. G. **Planejamento e Controle da Manutenção**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark, 2008.

XENOS, H. G. **Gerenciando a manutenção produtiva: Melhores práticas para eliminar falhas nos equipamentos e maximizar a produtividade**. 2 ed. Nova Lima: Falconi Editora, 2014.

ZINETTI, T. **Gestão de Ativos como Ferramenta para Prevenção de Falhas**. Disponível em: <https://tractian.com/blog/gestao-de-ativos-para-prevencao-de-falhas>. Acesso em: 09 set. 2021.

ÇENGEL, Y.; GHAJAR, A. **Transferência de Calor e Massa Uma Abordagem Prática**. Tradução de Fátima A. M. Lino. 4 ed. Brasil: McGraw Hill Brasil. Editora AMGH, 2009.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. Porto Alegre, RS: Bookman, 2010.



Emitido em 08/02/2022

CÓPIA DO TRABALHO Nº 12/2022 - DELMAX (11.57.05)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 10/02/2022 13:49)

THIAGO FERREIRA QUERINO

PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO

DELMAX (11.57.05)

Matrícula: 3083319

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: **12**, ano: **2022**, tipo: **CÓPIA DO TRABALHO**, data de emissão: **10/02/2022** e o código de verificação: **f3aa2c6639**