



ASSOCIAÇÃO EDUCATIVA EVANGÉLICA
FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA – FACEG
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANA CAROLINE ANDRADE GOMES

**IMPLEMENTAÇÃO DA MANUTENÇÃO PREDITIVA PARA DETECÇÃO
DE FALHAS EM SISTEMAS MECÂNICOS POR MEIO DA
ANÁLISE DE VIBRAÇÃO**

GOIANÉSIA

2022



ANA CAROLINE ANDRADE GOMES

**IMPLEMENTAÇÃO DA MANUTENÇÃO PREDITIVA PARA DETECÇÃO
DE FALHAS EM SISTEMAS MECÂNICOS POR MEIO DA
ANÁLISE DE VIBRAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Graduação em Engenharia Mecânica.

GOIANÉSIA

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

G633i

GOMES, ANA CAROLINE ANDRADE.

Implementação da manutenção preditiva para detecção de falhas em sistemas mecânicos por meio de análise / Ana Caroline Andrade Gomes – Goianésia: Faculdade Evangélica de Goianésia, 2022 – Faceg, 2022.

47 p.; il. p&b.

Orientador: Profa. Dra. Lauriane Gomes Santin.

Monografia de Graduação – Faculdade Evangélica de Goianésia: FACEG, 2022.

1. Análise de vibração. 2. Manutenção preditiva 3. Manutenção Industrial

I. Gomes, Ana Caroline Andrade. II. Implementação da manutenção preditiva para detecção de falhas em sistemas mecânicos por meio da análise de vibração.

CDU 621

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GOMES, A.C.A. IMPLEMENTAÇÃO DA MANUTENÇÃO PREDITIVA PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM SISTEMAS MECÂNICOS POR MEIO DA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO.

Trabalho de conclusão Curso (Graduação em Engenharia mecânica) – Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia-GO, 2022.

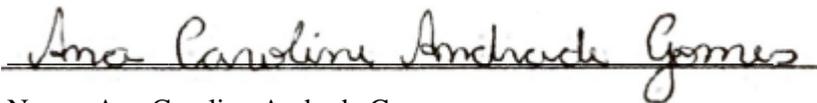
CESSÃO DE DIREITOS

NOME: Ana Caroline Andrade Gomes

GRAU: BACHAREL

ANO: 2022

É concedida à Faculdade Evangélica de Goianésia permissão para reproduzir cópias desta Monografia de Graduação, única e exclusivamente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais de publicação. Nenhuma parte desta Monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada a fonte.



Nome: Ana Caroline Andrade Gomes

Endereço: Goianésia/GO - Brasil

E-mail: acgomesgsia@gmail.com

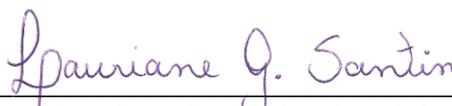
ANA CAROLINE ANDRADE GOMES

**IMPLEMENTAÇÃO DA MANUTENÇÃO PREDITIVA PARA DETECÇÃO
DE FALHAS EM SISTEMAS MECÂNICOS POR MEIO DA
ANÁLISE DE VIBRAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Graduação em Engenharia Mecânica.

Goianésia, 14 de Dezembro de 2022.

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Lauriane Gomes Santin - Orientadora
Faculdade Evangélica de Goianésia

Profa. Dra. Marinés Chiquinquirá Carvajal Bravo Gomes - Avaliador
Faculdade Evangélica de Goianésia



Prof. Dr. Ivandro Rocha - Avaliador
Faculdade Evangélica de Goianésia

*Aos meus pais por todo incentivo e ajuda para
que a execução desse trabalho se tornasse
possível.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, que me deu força e persistência para enfrentar as dificuldades que surgiram pelo caminho, e pelo seu amor e cuidado.

Aos meus pais por me encorajarem e me incentivaram nos momentos de fraqueza, e pelo carinho, atenção e preocupação no qual me levaram a chegar onde cheguei.

Aos docentes do curso de Engenharia mecânica, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional e em especial a minha prezada orientadora Profa. Dra. Lauriane Gomes Santin, pela dedicação, compreensão e pelo seu suporte.

RESUMO

A vibração em sistemas mecânicos pode ocorrer como resultado das operações da máquina, e nem sempre é considerada um problema sendo assim essencial para certas operações. Porém, quando não faz parte da operação normal desses sistemas, ela se torna um indicador de anormalidade que deve ser tratado. Se não for identificada e resolvida, pode causar riscos operacionais, financeiros e de segurança. Portanto, a vibração irá danificar seriamente o equipamento, causar desgaste e até mesmo levar a quebra, interromper o funcionamento do equipamento ocasionando maiores perdas econômicas. No entanto, se a vibração for medida e analisada corretamente, ela pode ser usada como um indicador do estado da máquina. Algumas das falhas que podem ocorrer em um sistema mecânico como, deficiência de lubrificante, acoplamento desalinhado e rolamento deteriorado é citado neste artigo, que teve como objetivo mostrar que a utilização da análise de vibração como ferramenta de controle do funcionamento dos ativos é uma maneira eficiente para se detectar e prevenir essas possíveis falhas. O monitoramento das condições de operação dos mecanismos se deu através da extração de dados obtidos por um coletor e analisador de vibração juntamente com um software de análise de vibração onde foi possível observar nas frequências de vibração os espectros característicos das falhas que ocorreram nesses mecanismos possibilitando uma ação de intervenção antes da perda total de seus componentes.

Palavras-chave: Manutenção preditiva. Vibração. Análise de falhas.

ABSTRACT

Vibration in mechanical systems can occur as a result of machine operations and is not always considered a problem and therefore essential for certain operations. However, when it is not part of the normal functioning of these systems, it becomes an indicator of an abnormality that must be treated. If not identified and addressed, it can cause operational, financial and security risks. Therefore, vibration will seriously damage the equipment, cause wear and even lead to breakage, interrupt the operation of the equipment causing greater economic losses. However, if vibration is measured and analyzed correctly, it can be used as an indicator of the state of the machine. Some of the failures that can occur in a mechanical system such as lubricant deficiency, misalignment and deteriorated bearing are mentioned in this article. The monitoring of the operating conditions of the mechanisms took place through the extraction of data obtained by a collector and vibration analyzer together with a vibration analysis software where it was possible to observe in the vibration frequencies the characteristic spectra of the failures that occurred in these mechanisms making possible an intervention action before the total loss of its components.

Key words: Predictive maintenance. Vibration. Failure analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modalidades de manutenção e suas características	4
Figura 2 - Movimento vibratório	6
Figura 3 - Senoide da vibração	6
Figura 4 - Frequência de vibração	8
Figura 5 - Procedimento de envelope de aceleração	10
Figura 6 - Lubrificação em uma superfície	12
Figura 7 - Tipos de desalinhamento	16
Figura 8 - Característica de desalinhamento em um espectro de vibração	13
Figura 9 - Britador Cônico	15
Figura 10 - Limites de vibração - ISO 10816	16
Figura 11 - Software Aptitude Analyst SKF	17
Figura 12 - Coletor de dados portátil/Analisador FFT	17
Figura 13 - Britador Cônico Modelo CH660	18
Figura 14 - Conjunto de acionamento de Correia Transportadora	19
Figura 15 - Conjunto de acionamento de Correia Transportadora	20
Figura 16 - Espectro de Cascata no domínio da Frequência de envelope de aceleração	21
Figura 17 - Curva de Tendência de envelope de aceleração	22
Figura 18 - Curva de Tendência	24
Figura 19 - Espectro de velocidade no domínio da frequência	25
Figura 20 - Espectro de velocidade no domínio da frequência	26
Figura 21 - Alinhamento a Laser do conjunto de acionamento de correia	26
Figura 22 - Alinhador de Eixos a Laser - SKF - TKSA 4126	
Figura 23 - Envelope de Aceleração	28
Figura 24 - Rolamento 23144 NSK – 31 rpm	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis de alarme para utilização geral²³

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BPI	Do inglês <i>Ball Frequency Inner Race</i>
BPO	Do inglês <i>Ball Pass Frequency Outer Race</i>
BSF	Do inglês <i>Ball Spin Frequency</i>
FTF	Do inglês <i>Frequency Train Frequency</i>
RMS	Valor Eficaz (Medida simples da energia da vibração)
RPM	Rotação por minuto
CPM	Ciclo por minuto
Hz	Hertz
A	Axial
V	Vertical
H	Horizontal
F	Frequência
T	Período

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	2
1.2	OBJETIVO	2
1.2.1	Objetivo Geral	2
1.2.2	Objetivo específico	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Manutenção Industrial	4
3	Manutenção preditiva	5
4	Conceito de vibração	5
5	Frequência	7
6	Amplitude de medição	8
7	Parâmetros de vibração	9
8	Envelope de aceleração	9
9	Análise de vibração	11
10	Falhas mecânicas por vibração	11
10.1	Deficiência de Lubrificante	11
10.2	Desalinhamento	12
10.3	Rolamentos deteriorados	14
11	Máquinas mecânicas	14
11.1	Britador cônico	14
11.2	Correia transportadora de minério	15
12	Critérios de avaliação das condições das máquinas	15
12.1	Curva de tendência	16
13	METODOLOGIA	16
14	RESULTADOS E DISCUSSÕES	20
14.1	Caso 1 Britador Cônico	20
14.2	Caso 2 Correia Transportadora de minério	23
14.3	Caso 3 Correia Transportadora de minério	27
15	CONCLUSÃO	29
16	REFERÊNCIAS	30

1. INTRODUÇÃO

A manutenção é uma área de grande importância por garantir um bom funcionamento de equipamentos e de seus componentes, aumentando assim a vida útil deles. Com a Revolução Industrial essa prática se consolidou dentro da indústria, devido a necessidade de novas tecnologias e por se tornarem ainda mais mecanizadas. Isso ocorreu por conta da alta demanda de produção logo após a 2ª Guerra Mundial (SOUZA; et al, 2022).

Visando o crescimento da produtividade, a manutenção corretiva – em que os reparos eram feitos apenas após as quebras- acabou por não atender todas as demandas das empresas, visto que geravam muitas perdas devido as paralizações. Isso fez com que a Manutenção preventiva ganhasse espaço e fosse inserida nas indústrias (ABREU; SOARES; SOUZA, 2011). Nesse tipo de manutenção são feitas paradas programadas, a fim de evitar falhas ligadas a vida útil do equipamento mantendo-o em condições de funcionamento que não acarretem paralizações imprevistas (ALMEIDA, P. S.2014, p.17). O tempo de reparo é baseado na vida útil do equipamento estabelecido pelo fabricante, o que acaba sendo um risco pois nem sempre o maquinário necessitará de manutenção, o que acarretará altos custos devido a uma intervenção desnecessária.

Isso levou as indústrias a repensarem um plano de manutenção onde se presasse pela diminuição de custo adicionando outros fatores imprescindíveis para a eficiência, como confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade. Foi a partir dessas demandas que a manutenção preditiva se tornou popular a partir da década de 70 (NAPUMUCENO, 1989).

Conforme FILHO (2010) a preditiva é uma manutenção centrada no desempenho de uma máquina, indicando suas condições reais de funcionamento com base em uma coleta de dados que informam antecipadamente o início de um desgaste ou degradação. Uma das técnicas utilizadas para a coleta de tais informações na manutenção preditiva é a análise de vibração, método que será abordado neste artigo.

A manutenção preditiva, utilizando o método da análise de vibração, visa otimização dos equipamentos na planta industrial. Por meio de aparelhos específicos pode-se detectar vibrações excessivas em máquinas de tal modo a identificar falhas ou defeitos com antecedência sendo assim possível entrar com um plano de ação onde os mesmos podem ser sanados,

evitando o aumento do dano e maiores custos para a planta devido a alguma paralização (OTANI; MACHADO, 2008).

No intuito de juntar forças aos estudos que já vêm sendo desenvolvidos sobre a manutenção industrial e a importância do acompanhamento dos equipamentos para evitar danos materiais e prejuízos financeiros, foi realizado um estudo de caso de uma empresa de mineração com o objetivo de mostrar como ocorre o monitoramento desses equipamentos na manutenção preditiva e a sua eficácia em detectar as avarias utilizando a análise de vibração como ferramenta.

1.1 Justificativa

A manutenção preditiva é uma das principais ferramentas utilizadas pela indústria na detecção de falhas mecânicas. Com o avanço das técnicas computacionais e das ferramentas de análise de vibração, esse tipo de acompanhamento dos dispositivos mecânicos tem se tornado mais acessível e eficiente. Como se sabe, a manutenção corretiva, quando não planejada, é uma das mais caras do mercado. Como alternativa para contornar esse problema, surge a manutenção preditiva, que visa reduzir custos e otimizar o funcionamento do dispositivo a partir do diagnóstico de pequenas falhas. Em função disso, a demanda por profissionais qualificados nesta área se torna cada vez maior. A pesquisa de campo em uma indústria da cidade de Barro Alto, que implementou a manutenção preditiva utilizando a análise de vibração como ferramenta de controle do funcionamento de máquinas, é uma maneira eficiente de demonstrar como esse tipo de manutenção se desenvolve. Além disso, a apresentação de técnicas que permitam o diagnóstico de falhas é um campo promissor na Engenharia Mecânica.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo mostrar a eficácia da Manutenção preditiva utilizando a análise de vibração como método de detecção de falhas em máquinas e componentes mecânicos.

1.2.2 Objetivo específico

- Realizar um estudo de caso em uma empresa de Barro Alto que implantou a manutenção preditiva por meio da análise de vibração em sistemas mecânicos.
- Realizar análise espectral para diagnóstico de avarias, abordando as variações de amplitude e frequência dos sinais vibratórios nas medições realizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manutenção Industrial

Com o intuito de manter a competitividade no mercado, as indústrias prezam por qualidade e a produtividade de seus equipamentos e maquinários. Para que seja possível garantir seu bom funcionamento e prevenir as falhas elas utilizam a manutenção como função estratégica (SOUSA, 2019).

Segundo XAVIER (2003) pode-se definir manutenção como um “conjunto de atividades que permite que a confiabilidade seja aumentada e a disponibilidade garantida”, tornando-a assim uma atividade de importância estratégica nas empresas, principalmente no sistema produtivo.

Com a inserção da indústria 4.0 novas tecnologias foram implementadas garantindo a extração de dados cada vez mais precisos sobre esses ativos em tempo real, além de possibilitar a previsão de uma possível quebra, intervindo com a manutenção antes que a mesma aconteça (ALMEIDA; FABRO, 2019).

Atualmente a manutenção não se aplica apenas a procedimentos práticos de montagem e desmontagem, substituição de peças ou reparos, mas também no “gerenciamento da manutenção” onde foram desenvolvidos alguns tipos fundamentais para que se pudesse atender problemas específicos nas indústrias. As principais são manutenção corretiva, preventiva e a Manutenção Preditiva, tema deste artigo, que será abordado adiante. Na Figura 1 pode-se observar as características fundamentais dos tipos de manutenção citados acima. (ALMEIDA, P. S.2014).

Figura 1 - Modalidades de manutenção e suas características

	Manutenção Corretiva	Manutenção Preventiva	Manutenção Preditiva
Estado de operação da máquina	Fora de serviço	Fora de serviço	Operando ou fora de serviço
Razão da interferência	Falha	Inspeção programada	Controle programado ou contínuo
Tarefas a serem executadas na máquina	Reposição de componentes	Desligamento da máquina para inspeção ou reposição de componentes	Monitoramento
Objetivo da intervenção	Retorno ao trabalho	Garantir o funcionamento por um tempo	Predizer ou detectar falhas

Fonte: MARÇAL; SUSIN (2004)

3 Manutenção preditiva

Em resposta à demanda por um processo de acompanhamento mais eficiente, surge a manutenção preditiva, que se refere ao processo no qual a intervenção em um equipamento ou sistema é realizada, quando este apresenta uma mudança na sua condição de operação ou em seu desempenho (BALDISSARELLI; FABRO, 2019).

Para White (2010) a manutenção preditiva só é aplicada quando os componentes de uma máquina começam a dar sinais de defeito e início de falha. Para que seja possível a detecção destes potenciais problemas, o programa de manutenção preditiva utiliza técnicas não destrutivas para determinar a condição da máquina, podendo obter informações precisas sobre a mesma a qualquer momento durante o acompanhamento.

Algumas das principais técnicas desenvolvidas para avaliação do estado desses componentes mecânicos são análise de vibração, análise de óleo, termografia e ultrassom, os quais podem identificar facilmente alguns fatores que levam a falha do equipamento, sendo eles alteração do nível de vibração, calor, alteração de espessura, trinca e desgaste (SCHEKIERA, 2011).

Dentre as técnicas de preditiva citadas pode-se destacar a análise de vibração como o meio mais utilizado por esse tipo de manutenção. Tendo em vista que esse tipo de análise fornece dados completos que podem ser coletados periodicamente, ele evita paradas inesperadas e maiores custos para a indústria, visto que se torna possível traçar um plano de ação para corrigir tais problemas (OTANI; MACHADO, 2008).

4 Conceito de vibração

Para que se possa compreender os fundamentos da análise de vibração é necessário saber do que se trata a mesma. Uma vibração mecânica é o movimento de um corpo que oscila em torno de uma posição de equilíbrio, e que se repete regular ou irregularmente dentro de um intervalo de tempo (KELLY, 2018).

O balançar de um pêndulo e o movimento de uma corda dedilhada são exemplos típicos de vibração. A teoria da vibração trata do estudo de movimentos oscilatórios de corpos e as forças associadas a eles (RAO, 2008).

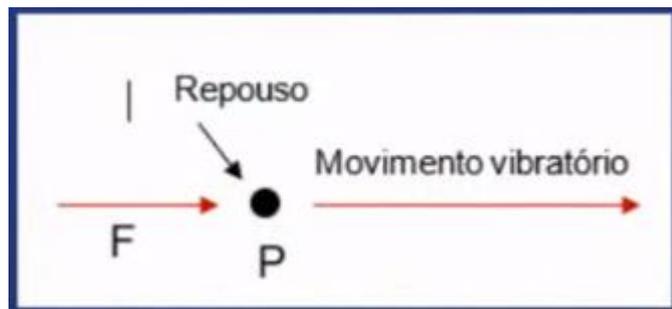
Para Newton (2008) as vibrações podem ser classificadas como:

- Vibrações Livres: ocorrem naturalmente por condição inicial de movimento;

- Vibrações Forçadas: causadas por uma força externa;

Aprofundando em como ocorre o processo da vibração, pode-se usar como exemplo a seguinte situação. Uma força F é aplicada a um ponto P de massa em repouso, demonstrada na figura 2 no qual acaba por sofrer um movimento oscilatório formando uma senoide (COSTA, 2017).

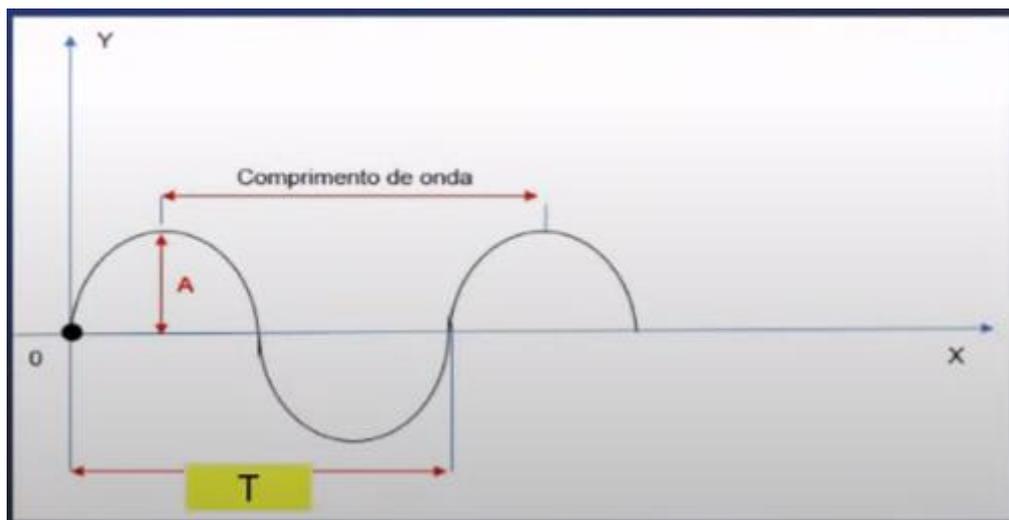
Figura 2 - Movimento vibratório



Fonte: Tractian (2022).

Essa senoide, figura 3, consiste em um comprimento de onda, uma amplitude e um período em T , que pode ser definido como o tempo necessário para que um ciclo conclua uma volta sendo mensurado em segundos(s) (PREDITEC, 2011).

Figura 3 - Senoide da vibração



Fonte: Tractian (2022).

Porém com a forma de onda em uma senoide distribuída no tempo as análises das vibrações transmitidas pela máquina se tornam complexas dificultando o diagnóstico de possíveis falhas.

Diante deste cenário o matemático Joseph Fourier descobriu por meio de cálculos uma forma de transformar essa senoide ou sinal distribuído no tempo em um espectro de frequência. Essa técnica é denominada hoje de Transformada Rápida de Fourier onde é inserida automaticamente nos aparelhos coletores de vibração transformando o sinal em frequências de vibração (SILVA, 2013)

5 Frequência

A frequência está relacionada ao período de vibração. De forma simples pode ser definida como números de ciclos, ou oscilações, por unidade de tempo (PREDITEC, 2011).

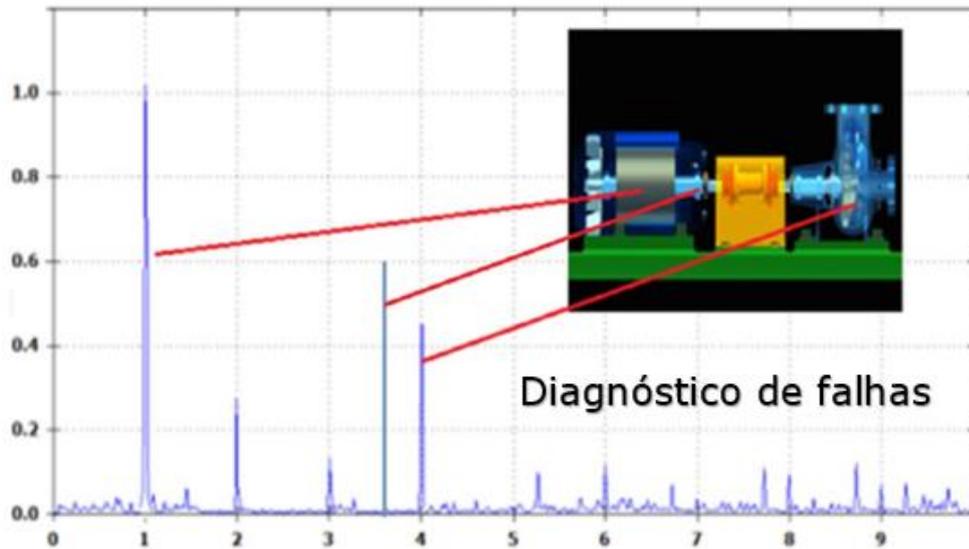
Segundo a SKF (2004), é possível medir o período para um ciclo e fazer o cálculo de sua frequência. Considerando que 60 ciclos ocorrem em um segundo, fazendo a divisão de um por 60 tem-se o período(t) para cada ciclo e o inverso se aplica para determinar frequência dividindo um pelo período de tempo.

Utilizando a equação $F= 1/T$ onde F é a frequência, 1 é o número de ciclos e T é o tempo ou período (segundos).

A frequência é usualmente identificada por “ciclos por segundo” ou Hertz (Hz)” (ANDRADE, 2004). Ela pode ser expressa também em ciclo por minuto (CPM), revoluções por minuto (RPM) e múltiplos de velocidade de rotação, que podem ser caracterizados como ordens ou harmônicos, linhas verticais azuis demonstrada na Figura 2, são os picos da frequência e podem ser referidas a 1X, 2X ou 3X a rotação (MARÇAL, 2000).

Marçal (2000) ainda diz que as frequências expressas em RPM ou CPM está relacionada com as vibrações geradas pela máquina quando o seu motor completa uma rotação ou ciclo por minuto. Essas vibrações determinam qual componente do equipamento está vibrando como indicado pela figura 4.

Figura 4 - Frequência de vibração



Fonte: Cyrino (2017).

6 Amplitude de medição

A Amplitude em um espectro se trata da distância que a vibração tem da sua posição de equilíbrio e é a característica que descreve a severidade da vibração mostrando no espectro a gravidade de um defeito.

Segundo o Manual da *SKF Reliability Systems* (2004) o nível de amplitude de uma medição pode ser expresso de 4 maneiras distintas: Pico-a-Pico, Pico, Valor Eficaz (RMS do inglês *Root Mean Square*) e Valor-Médio.

O Pico-a-Pico é a amplitude total de um componente mecânico até um ponto de referência. Mostra o nível de vibração do topo do pico positivo à base do pico negativo. Já a medição de Pico irá mostrar o nível de vibração do topo do pico positivo à linha de referência (zero) (SKF, 2004).

O Root Mean Square (RMS) raiz quadrada média, indica o nível de energia da vibração de um sistema mecânico. Essa energia de vibração se refere a sua capacidade destrutiva indicando as condições e deterioração do equipamento (HOLANDA, 2016).

7 Parâmetros de vibração

Para que a análise de vibração seja feita são utilizados alguns parâmetros de medição, com o intuito de obter informações mais precisas referente a condição em que uma máquina está trabalhando quando apresenta algum defeito. Segundo Costa (2017) a escolha do parâmetro a ser utilizado está relacionado matematicamente em função da frequência e tempo da vibração, assim como com a condição do equipamento.

Existem normas de avaliação de severidade das vibrações nas máquinas, como por exemplo a ISO 10816, que utiliza o deslocamento, velocidade e aceleração como parâmetro de medida (AROEIRA, 2019). Conforme Andrade (2004) o deslocamento mostra o quão longe o objeto se move em relação a uma referência e é mensurada pelo sistema métrico em micrómetros (μm), metros (m) ou milímetros (mm). Já a velocidade mede o quão rápido o objeto se move de zero a pico, sendo mensurada em milímetros por segundos (mm/s) ou em metros por segundo (m/s), pelo sistema métrico (ANDRADE, 2004).

A Aceleração é a razão de mudança da velocidade de zero a pico, a qual é normalmente medida em metros por segundo ao quadrado (m/s^2) podendo ser expressa também em unidade de força gravitacional ($\text{g}'\text{s}$), sendo que 1 g equivale a, aproximadamente, $9,8065 \text{ m/s}^2$ no sistema métrico, e é comumente a medida utilizada na vibração para mensurar aceleração (HOLANDA, 2016).

O deslocamento pode indicar desbalanceamento em máquinas rotativas, por outro lado a velocidade é um parâmetro que normalmente é escolhido para avaliar a severidade de vibração, visto que ela consegue um controle maior sobre problemas como desequilíbrios, desalinhamentos, folgas, desapertos, etc. Já a aceleração representa componentes de alta frequência como mencionado anteriormente, sendo recomendado para monitoração de rolamentos e problemas elétricos entre 1000 Hz e 10000 Hz de faixa de frequência (SKF, 2004).

8 Envelope de aceleração

O envelope de aceleração é um conjunto de técnicas de processamento de sinal que torna possível detectar falhas ainda em seu estado mais inicial. Para Jesus (2010) a técnica do envelope pode analisar os componentes de vibração de altas frequências em baixas frequências, diagnosticando impactos de curta duração que ocorrem devido a falhas em algumas peças de

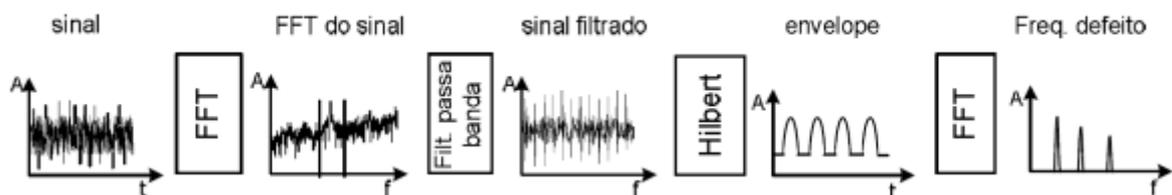
um maquinário. É aplicada na análise de fenômenos vibratórios repetitivos, tais como aqueles gerados em mancais de rolamentos e engrenagens.

Em rolamentos existem quatro partes principais: a pista externa, a pista interna, rolos e gaiolas. Uma falha pode ocorrer em uma dessas pistas e o sinal que é transmitido por meio da análise de vibração para a identificação do problema pode ser abafado devido aos gerados pela máquina, tornando-se necessário a utilização da técnica de envelope que tem a capacidade de filtrar, o ruído que aparece no espectro de forma que o sinal da falha é visto claramente (SIEMANN, 2021).

Conforme Shulkin (2016) com esse filtro consegue-se fazer a separação das vibrações características de falha dos componentes de um rolamento das outras vibrações que podem aparecer na máquina como os ruídos de impacto causado pela falha, desalinhamento.

Como mostra a figura 5, primeiramente o sinal de vibração coletado é transformado em um espectro de frequência para mostrar a elevação dos picos na mesma através da FFT (Transformada rápida de Fourier), ferramenta de cálculo já embutido no sistema de análise de vibração. Em segundo é aplicado o filtro passa banda ao sinal para eliminar baixas frequências com altas amplitudes que geralmente estão relacionados a desalinhamento, em seguida o sinal é envelopado por meio da transformada de Hilbert e por fim aplicado novamente a FFT ao envelope, no intuito de obter as frequências dos defeitos (ALEGRANZI; et al, 2014)

Figura 5 - Procedimento de envelope de aceleração



Fonte: NICHTERWITZ (2013)

A vibração em um sistema mecânico pode ocorrer apenas como uma consequência da operação de uma máquina, não acarretando necessariamente em um possível dano, mas na maioria dos casos a vibração se torna indesejável por promover desgaste ou ruptura prematuros de superfícies em contatos como nos mancais e em outros elementos girantes. Também podem

ocorrer falhas em componentes mecânicos, em decorrência da fadiga, diminuindo a vida útil dos mesmos (JUNIOR, 2006).

Para que se possa monitorar as condições operacionais dos sistemas mecânicos de forma a evitar tais problemas, é utilizado a análise de vibração dentro da manutenção preditiva.

9 Análise de vibração

A análise de vibração tem como uma de suas funções detectar o início de uma falha em desenvolvimento, por meio de um espectro de vibração, para que se possa intervir antes que se evolua para um problema mais sério, que cause tempo de inatividade não programada (ALSALAET, 2012).

Alsalaet (2012) ainda afirma que a análise de vibração também pode ser aplicada como um teste para verificar se um reparo feito em um determinado sistema mecânico foi executado de forma adequada, e se alinhamentos e balanceamentos foram feitos dentro das tolerâncias exigidas. Com o monitoramento periódico das máquinas por meio da análise e níveis de vibração, é possível obter informações adicionais que apontam alguma deterioração em seu estado inicial, permitindo que reparos sejam feitos durante o desligamento normal da máquina.

10 Falhas mecânicas por vibração

Segundo Junior (2018) as falhas mecânicas que geram a vibração fora dos padrões recomendados e que são identificadas por meio da análise de vibração são engrenagens defeituosas, rotores desbalanceados, vínculos desajustados, eixos deformados, folgas excessivas em buchas, falta de rigidez, problemas aerodinâmicos ou hidráulicos, cavitação, desbalanceamento de rotores de motores elétricos (apud Weber, 2009).

Dentre essas falhas mecânicas pode-se destacar três: rolamentos deteriorados, desalinhamento e lubrificação deficiente.

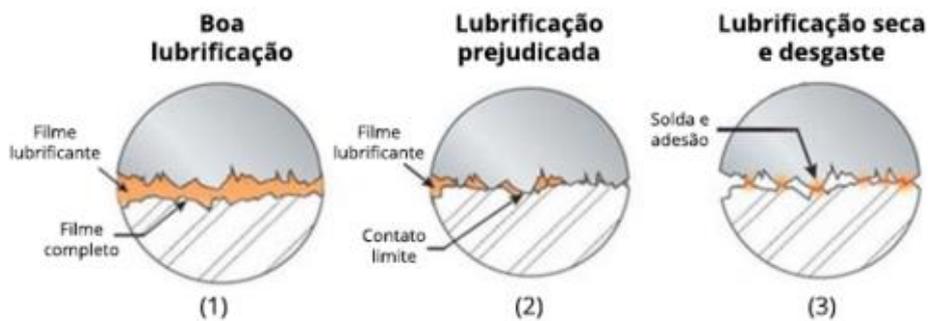
10.1 Deficiência de Lubrificante

Dentre as várias falhas citadas relacionadas a vibração de um sistema mecânico, podemos destacar a deficiência na lubrificação como um dos itens principais que é avaliado

pela análise de vibração. Através desse monitoramento se torna possível diagnosticar a contaminação, desgastes e mau funcionamento principalmente em elementos rolantes (ALBERTI, 2020).

O intuito da lubrificação é reduzir os efeitos do desgaste que os equipamentos sofrem ao longo do tempo devido ao atrito de suas superfícies podendo ser feito através de um filme compacto de óleo ou graxa que é introduzido entre essas superfícies sólidas, A Figura 6 ilustra bem a função do lubrificante (ZAMMAR et al., 2017).

Figura 6 - Lubrificação em uma superfície



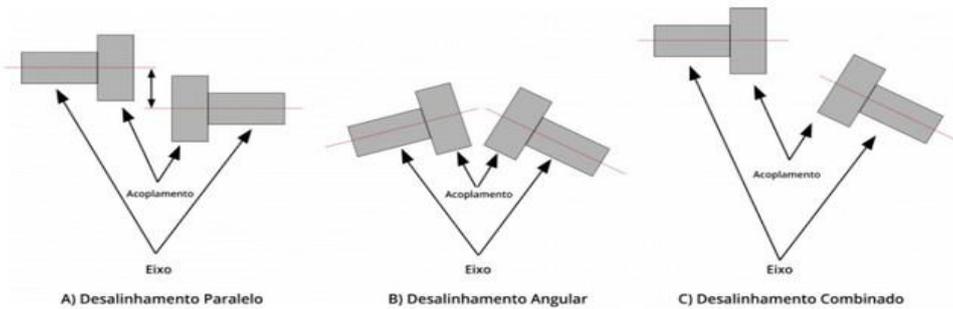
Fonte: Scholles (2018).

10.2 Desalinhamento

Ao longo do tempo de operação de uma máquina, a mesma pode apresentar tendência a desalinhar seu eixo, rolamentos e seus acoplamentos, o que significa que não estão devidamente alinhadas ao longo de suas linhas de centro (MAIS, 2002).

Os desalinhamentos podem ser classificados de três formas: paralelo, que ocorre quando as linhas de centro do eixo estão paralelamente afastadas, ou seja, deslocadas; os angulares ou axiais acontecem quando os eixos acoplados formam um ângulo induzindo a uma força de flexão; e por último tem-se o desalinhamento combinado que como o próprio nome diz, ocorre as duas situações de desvio paralelo e angular. Essas três formas são demonstradas na Figura 7 (BRAGA, 2020).

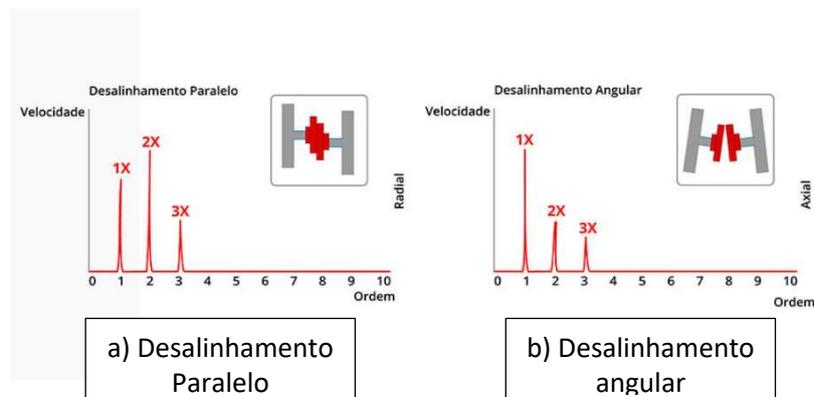
Figura 7 - Tipos de desalinhamento



Fonte: BRAGA (2020)

Para detectar o desalinhamento através da vibração utilizasse a análise espectral, que através de sua leitura é possível distinguir qual o tipo de desalinhamento e sua severidade. Segundo GALLY (2020) o desalinhamento angular é identificado no espectro de vibração quando há um pico 1X rpm (uma vez a rotação) elevado na direção axial onde foram medidos os sinais vibratórios e outro de 2X rpm sendo que esses dois picos dominarão o espectro podendo indicar problemas nos acoplamentos. Já na direção radial aparecerão picos elevados de 1X, 2X e 3X rpm caracterizando o desalinhamento como paralelo, de modo que dependendo do tipo de acoplamento, o pico 2X rpm se apresentará com maior amplitude do que 1X rpm e para casos mais severos 4X, 5X, 6X rpm e assim por diante quando há desalinhamento combinado. A Figura 8 representa os pontos abordados.

Figura 8 - Característica de desalinhamento em um espectro de vibração



Fonte: DYNAMOX (2020)

10.3 Rolamentos deteriorados

Os rolamentos na indústria têm um papel fundamental para que haja um bom desempenho de uma máquina, suportam cargas elevadas e condições naturais do ambiente como a umidade, e estão presentes em vários equipamentos e processos produtivos. Com isso tem-se a necessidade de que haja um monitoramento periódico dos mesmos e uma das técnicas para a detecção de uma possível avaria no rolamento é a através da medição de vibrações utilizando um analisador de vibração (BARILLI, 2013).

Santos (2017) diz que as falhas em rolamentos podem ser previstas na análise de vibração por meio das frequências características dos defeitos que são identificáveis na análise de espectro, e na análise do envelope permitindo identificar o estágio da degradação do rolamento.

Essas frequências são relacionadas com o comportamento dinâmico de seus componentes existindo quatro tipos básicos geradas por defeitos em rolamentos. São elas a frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da pista interna (BPFI do inglês *Ball Pass Frequency Inner Race*), frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da pista externa (BPFO do inglês *Ball Pass Frequency Outer Race*), frequência de giro dos elementos como rolos e esferas (BSF do inglês *Ball Spin Frequency*) e a frequência de giro da gaiola ou do conjunto de elementos rolantes (FTF do inglês *Frequency Train Frequency*). (BASTOS e JUNIOR, 2010).

Como já mencionado cada elemento do mancal possui uma frequência rotacional característica de falha no qual são obtidas por meio de equações que estimam esses valores. Distribuidores dos fabricantes de rolamentos e bancos de dados disponíveis comercialmente também podem fornecer tais informações (MENEZES, 2015).

11 Máquinas mecânicas

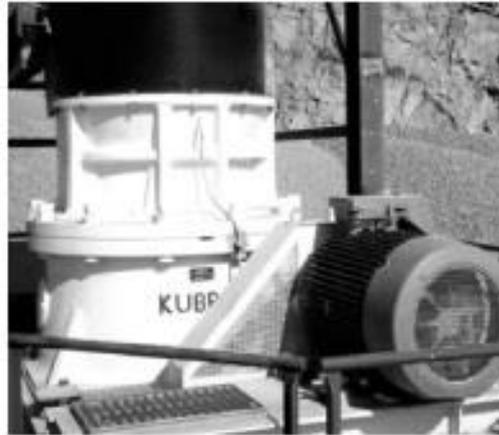
11.1 Britador cônico

De acordo com Varela (2011), os Britadores cônicos são máquinas amplamente utilizadas na indústria de mineração cujo objetivo é diminuir o material alimentado.

O britador Cônico mostrado na Figura 9 é utilizado em etapas de rebitagem onde a britagem ocorre em produtos com menor tamanho de partícula e ele é constituído por um cone

com movimento excêntrico e um manto fixo de britagem dentro de uma câmara no qual ocorre o processo de cominuição (VARELA, 2011).

Figura 9 - Britador Cônico



Fonte: Varela (2011).

Estes equipamentos possuem alta confiabilidade mecânica e alta eficiência quando comparado a outros equipamentos.

11.2 Correia transportadora de minério

Com base na descrição de Oliveira (2019), as correias transportadoras são colocadas em uma variedade de processos que exigem transporte eficiente. Grandes mineradoras utilizam as correias como uma boa alternativa para despachar materiais por longas distâncias de forma eficiente e produtiva, otimizando os processos. As correias transportadoras consistem principalmente de rolos, motores, acionamentos e correias a qual é estendida entre dois tambores (acionamento e de retorno). Os rolos são responsáveis pelo movimento das correias. O bom funcionamento desses componentes, em geral, é de extrema importância para o funcionamento do sistema.

O transporte de materiais com alto desempenho é essencial para a produção da planta por isso é necessário o uso de correias transportadoras (OLIVEIRA, 2019).

12 Critérios de avaliação das condições das máquinas

A ISO 10816-3 é a norma que determina os critérios de avaliação das condições das máquinas, condições que são baseadas nas especificações de um espectro, tornando possível

acompanhar sua evolução por meio dos níveis de vibração que devem estar dentro das faixas admissíveis (MENEZES, 2015). A Figura 7 mostra os limites de velocidade para cada tipo de máquina classificando quanto ao estado de funcionamento e severidade devido a vibração.

Figura 10 - Limites de vibração - ISO 10816

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816-1					
Machine		Class I	Class II	Class III	Class IV
in/s mm/s		Small Machines	Medium Machines	Large Rigid Foundation	Large Soft Foundation
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28			
	0.02	0.45			
	0.03	0.71		GOOD	
	0.04	1.12			
	0.07	1.80			
	0.11	2.80		SATISFACTORY	
	0.18	4.50			
	0.28	7.10		UNSATISFACTORY	
	0.44	11.20			
	0.70	18.00			
	1.10	28.00		UNACCEPTABLE	
1.77	45.90				

Fonte: OSTI (2017).

Para a coleta de dados, recomenda-se que os três eixos de dados sejam tomados para cada mancal (horizontal, vertical e axial), e que os dados sejam coletados considerando-se vários parâmetros (velocidade, aceleração, envelope de aceleração etc.), (SKF, 2021).

12.1 Curva de tendência

As medições coletadas ao longo do tempo fornecem um histórico da máquina, onde se pode verificar os comportamentos vibracionais de cada ponto coletado, essas medições geram um gráfico que se chama curva de tendência.

A curva de tendência registra os níveis globais onde é possível monitorar os dados e prever a ocorrência de falha a partir dos níveis de vibração, sendo possível programar as intervenções necessárias (ABREU; GIANELLI, 2020).

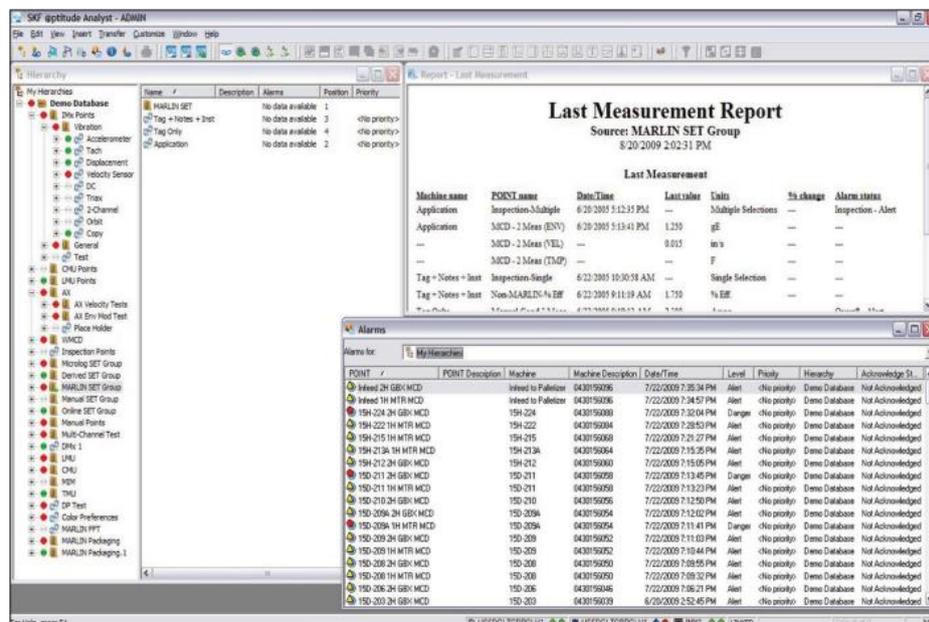
13 METODOLOGIA

O presente trabalho aborda, por meio de um estudo de caso, a identificação de defeitos em componentes internos de equipamentos mecânicos, como motores elétricos, mancais de rolamento e redutores de equipamentos rotativos, por meio da análise de vibração proposta em

uma implementação de um plano de manutenção preditiva na indústria de mineração Anglo American, situada em Barro Alto no estado de Goiás.

Os instrumentos utilizados na técnica de análise de vibrações basicamente se concentram em um coletor e analisador de vibração e um *software* de análise vibração. O *software* utilizado para armazenar e analisar as informações coletadas é o *Aptitude Analyst SKF*, cuja interface é mostrada na Figura 11, e o dispositivo utilizado para coletar as informações do padrão de vibração da máquina é o Analisador de espectro de vibração FFT (Transformada Rápida de Fourier, FFT do inglês *Fast Fourier transform* de velocidade), mostrado na Figura 12.

Figura 11 - Software Aptitude Analyst SKF



Fonte: SKF

Figura 12 - Coletor de dados portátil/Analisador FFT



Fonte: SKF.

Os equipamentos monitorados por análise de vibração, são ventiladores, correias transportadoras, britadores, bombas centrífugas, assim a particularidade entres esses

equipamentos sendo máquinas rotativas com mancais de rolamento e/ou casquilho. Todos esses equipamentos fazem parte de um processo produtivo da indústria de mineração.

Foram analisados os resultados obtidos com a análise de vibração em três equipamentos da indústria e os dados encontrados foram discutidos a fim de fazer recomendações quanto ao nível de comprometimento do dispositivo baseado no padrão de vibração encontrado e considerações das vantagens do uso da manutenção preditiva para uma empresa do setor.

A pesquisa de campo foi realizada em uma indústria de mineração na região do Vale do São Patrício, interior do estado de Goiás. Os casos analisados são referentes à análise de vibração de máquinas e componentes mecânicos, buscando o histórico e defeito que são identificados na análise de vibração. No caso 1 foi analisado o motor elétrico de um britador cônico, mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Britador Cônico Modelo CH660



Fonte: Autoria própria.

A seta de cor preta em destaque indica o ponto e a direção onde foi coletado as vibrações. Para o Britador Cônico a coleta foi feita no Lado acoplado do motor na direção horizontal representado pela letra H com o parâmetro de medição sendo o de Envelope, representado pela letra E.

No caso 2 foi avaliado um conjunto de acionamento (Motor/Redutor/Tambor) de uma correia transportadora de mineiro mostrado na Figura 14, que apresentavam níveis de vibração elevados.

Figura 14 - Conjunto de acionamento de Correia Transportadora



Fonte: Autoria própria.

O ponto de coleta dos sinais vibratórios do conjunto de acionamento dessa Correia transportadora se encontra no lado acoplado do motor na direção Axial utilizando como o parâmetro a velocidade. Esse ponto é indicado pela seta vermelha em destaque na figura acima.

No caso 3 é apresentada a falha de um rolamento 23144 NSK do tambor de uma correia transportadora de minério mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Conjunto de acionamento de Correia Transportadora



Fonte: Autoria própria.

A partir dos espectros de vibração dessas máquinas e componentes mecânicos, foram identificados e discutidos os defeitos referentes à deficiência de lubrificação, acoplamentos desalinhados e rolamentos deteriorados. Cada caso foi exposto fazendo referência a falha identificada e não ao dispositivo avaliado. Essa estratégia foi aplicada buscando dar ênfase ao objetivo e a eficiência da análise de vibração na detecção de problemas de funcionamento de dispositivos mecânicos. Nos casos expostos serão apresentados gráficos que orientam a discussão e facilitam os diagnósticos dos defeitos encontrados nos equipamentos citados.

14 RESULTADOS E DISCUSSÕES

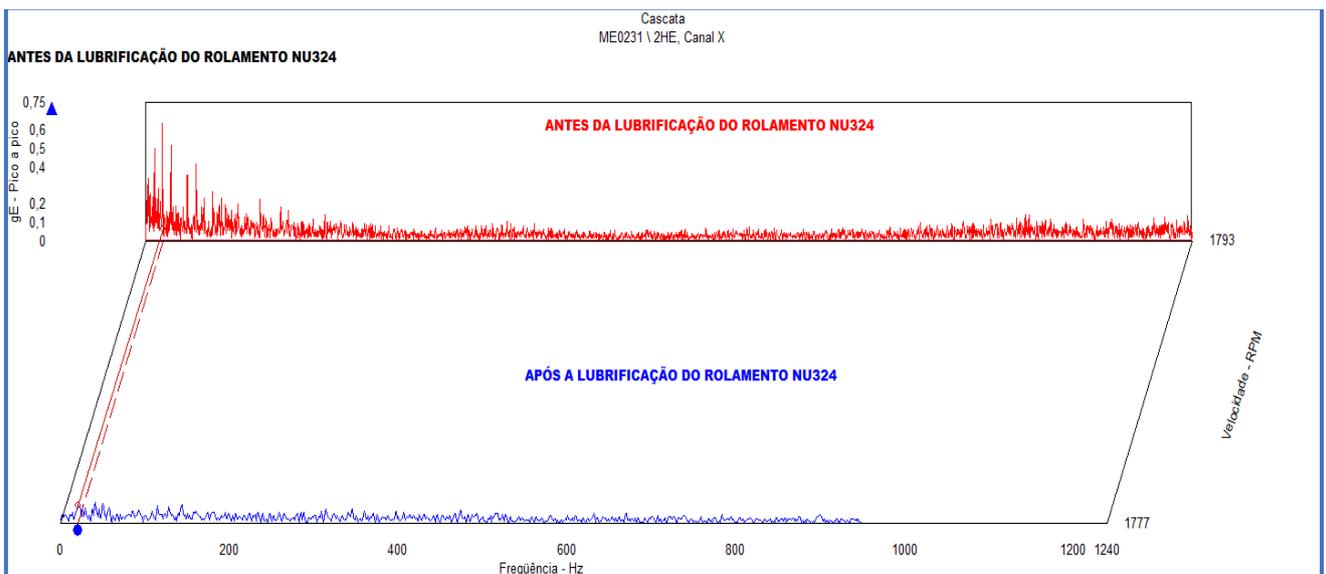
As falhas referentes à deficiência de lubrificação, acoplamentos desalinhados e rolamentos deteriorados podem ser identificadas por meio de análise de vibração dos dispositivos. Essas três falhas foram identificadas e são detalhadas por meio do estudo do relatório de análise das frequências de vibração.

14.1 Caso 1 Britador Cônico

A deficiência de lubrificação é uma das principais causas de avaria em máquinas mecânicas. O primeiro caso se trata de um britador cônico que foi acompanhado através da análise de vibração.

Pode-se observar na Figura 16 o espectro vermelho com uma amplitude elevada, caracterizando assim a deficiência de lubrificação no rolamento LA (lado do acionamento) do motor. Tal espectro é composto pelo valor em hertz (ciclo por segundo) no eixo horizontal e amplitude em gE no eixo vertical.

Figura 16 - Espectro de Cascata no domínio da Frequência de envelope de aceleração



Fonte: Autoria própria

A técnica de envelope de aceleração é uma técnica desenvolvida e difundida pela empresa SKF, que atua no mercado mundial de rolamentos. Como parâmetro de medição, com unidade de medida em gE onde g representa a aceleração da gravidade (g equivale a aproximadamente $9,801 \text{ mm/s}^2$) e E (significa a técnica de envelopamento do sinal) para detecção e diagnóstico de falhas em rolamentos. Esse sinal é demonstrado pelo espectro vermelho como já mencionado, onde pode-se observar que seus picos estão bem próximos um do outro, formando uma ressonância no qual começa a se desprender da linha de base (horizontal). Esse fenômeno é característico de deficiência de lubrificação, que consiste na perda do filme lubrificante, o que ocasiona atrito entre as peças e elevam os níveis do espectro mostrado ainda na Figura 16.

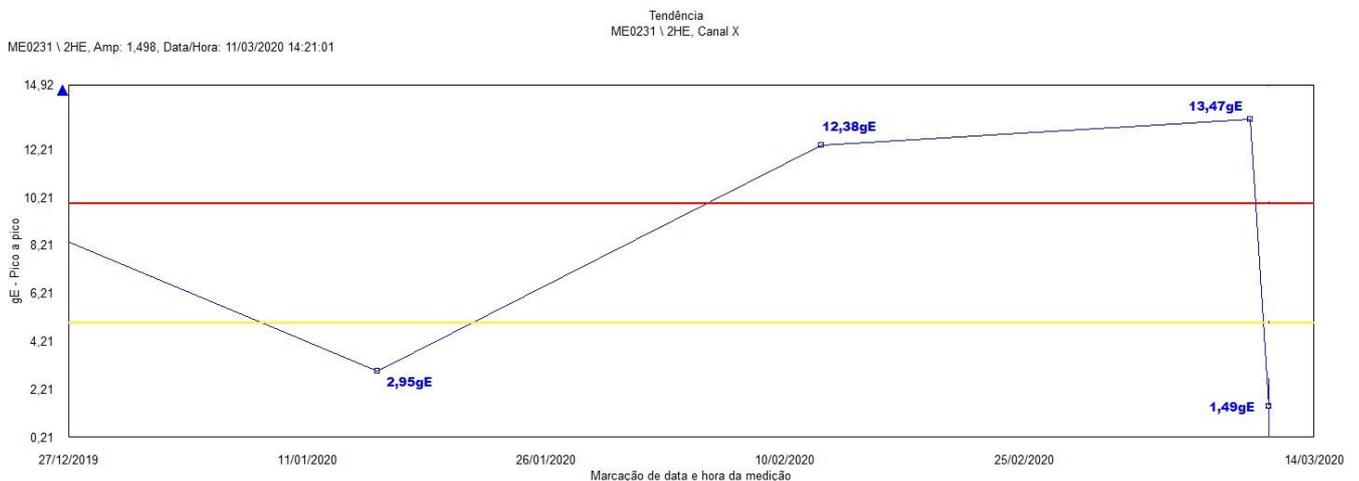
Zammar et al., (2017) diz que o atrito entre dois corpos causa o desgaste da superfície quando este não está devidamente lubrificado. Essa avaria aparece no espectro em altas

frequências e com elevados níveis vibracionais, como é abordado neste caso do trabalho, e por fim sua amplitude aumenta com a degradação.

A amplitude está associada aos sinais de altas frequências e torna-se mais nítida em medições de aceleração. A técnica de envelope de aceleração mostrou sua eficiência ao filtrar os sinais de altas frequências, geradas pelo atrito, devido à falta de lubrificante no ativo.

Na curva de tendência do envelope de aceleração da Figura 17, todos os valores abaixo da linha amarela são considerados normais. Valores entre as linhas amarela e vermelha indicam condição de alerta e os níveis acima da linha vermelha indicam nível crítico, sinalizando que o dispositivo precisa de intervenção. Observa-se a redução dos níveis vibracionais no espectro azul e a redução do valor de 13,47gE para 1,49gE logo após a relubrificação do rolamento NU324/C3. Isto ocorreu porquê após a intervenção no rolamento, realizada no dia 14 de Março de 2020, o atrito entre as suas partes rolantes foi retirado. Assim, o carpete antes elevado, abaixou, ficando mais próximo da linha de base, demonstrando a eficiência da intervenção no controle e prevenção de falha.

Figura 17 - Curva de Tendência de envelope de aceleração



Fonte: Autoria própria

De modo mais detalhado, a curva de tendência de aceleração vista na Figura 17 mostra que os sinais vinham apresentando elevados níveis de vibração. O motor antes operava em valor vibracional de 2.95 gE considerado normal para seu pleno funcionamento em janeiro de 2020. Acompanhando o monitoramento do motor percebe-se na curva o aumento da vibração ultrapassando o primeiro alarme, representado pela linha amarela, denominado A1 com valor

global de 5 gE e atingindo o seu limite crítico de 10,21 gE, A2, representada pela linha vermelha, em fevereiro de 2020. Após esse período ainda houve uma crescente nos valores globais de vibração com máxima de 13,47 gE no ponto 2HE (Horizontal), momento em que a intervenção foi feita. Após a lubrificação, verificou-se uma redução dos níveis globais da tendência de aceleração para níveis aceitáveis, alcançando o valor de 1,49 gE, bem abaixo do limite crítico.

Para referência de limite mínimo e máximo dos níveis de alarme estabelecidos para este estudo de caso a SKF (2004) indica os valores de alarme para utilização geral, conforme a Tabela 1, onde os limites adotados para esse caso foram de 5 gE para A1 e 10gE para A2. É importante ressaltar que o limite de alarme A1 serve de alerta e o de alarme A2 para indicar que os níveis estão críticos.

Tabela 1 - Níveis de alarme para utilização geral

RPM DO EIXO	LIMITES DE ALARME	
	A1	A2
0 a 50	0,03	0,07
25 A 500	0,3	0,7
250 A 5000	5	10
> 25000	20	70

Fonte: Adaptada de (SKF, 2004)

Então, com a análise de vibração, foi possível identificar a falha de deficiência de lubrificante no britador cônico, intervindo, assim com a relubrificação do mesmo para correção da avaria. Logo após a intervenção observou-se uma redução dos valores vibracionais para níveis normais nas novas medições de vibração, comprovando que a análise de vibração foi efetiva para diagnosticar a criticidade e a intervenção foi eficiente para corrigir o problema, evitando danos no equipamento.

14.2 Caso 2 Correia Transportadora de minério

No caso apresentado foi feito a análise de vibração do conjunto de acionamento de correia transportadora, utilizando como parâmetro de medição, a velocidade, medido em mm/s.

Devido a um dano no tambor de acionamento da máquina o equipamento começou a apresentar níveis elevados de vibração, pois após feita a substituição desse tambor, não houve o alinhamento do conjunto.

Conforme a Figura 18, a curva de tendência demonstra entre os períodos de novembro de 2018 à outubro de 2020, níveis elevados de vibração no ponto 2AV (ponto da máquina onde foi coletada a vibração, na direção Axial, parâmetro velocidade), devido ao desalinhamento do conjunto.

Figura 18 - Curva de Tendência



Fonte: Autoria própria

Foram estabelecidos alarmes com base na ISO 10816, representados pela linha amarela e vermelha com os valores de 6 mm/s e 12 mm/s, respectivamente, sendo este o nível de alerta já indicando a severidade do problema. Ultrapassando o nível de alerta de 12 mm/s, pode-se observar na curva de tendência que, o nível de vibração atingiu seu ponto máximo de 19,05 mm/s.

Após o alinhamento do conjunto, os níveis vibracionais foram significativamente reduzidos e permaneceram estáveis entre o período de outubro de 2020 a julho de 2021.

Para que fosse possível detectar o desalinhamento como o componente de falha no conjunto, foi necessário analisar o gráfico espectral da Transformada rápida de Fourier (FFT do inglês *Fast Fourier transform*) de velocidade [mm/s] para o ponto 2AV.

O parâmetro de medição de velocidade é a técnica específica para encontrar falhas em decorrência de desalinhamento, que é caracterizada como sendo de baixa frequência, pois ocorre próximo da velocidade de rotação da máquina.

Como dito na revisão bibliográfica, o desalinhamento geralmente é identificado em pontos de medição na direção radial e axial, e a frequência predominante que caracteriza o desalinhamento ocorre em $1 \times N$ (uma vez a frequência de rotação) $2 \times N$ (comumente) 3 e $4 \times N$ (raramente).

No caso apresentado, a máquina estava operando a 1797 rpm. Aplicando a fórmula para se obter a frequência de rotação em que ela deve operar, tem-se:

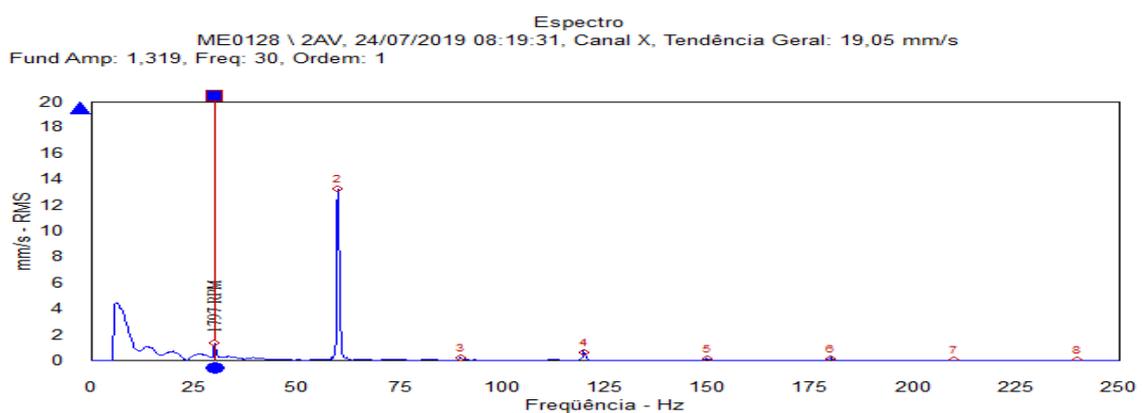
$$1797 \div 60 = 29,95$$

Dividindo a rotação da máquina em estudo por 60s, o resultado da frequência de rotação é de 29,95 Hz no qual foi arredondado para 30 Hz como mostra a Figura 20. Este cálculo para obter a frequência de rotação já é feito automaticamente pelo programa de análise de vibração *aptitude analyst SKF* e aparece acima do gráfico.

Se a frequência de rotação for próxima ou duas vezes a velocidade de rotação da máquina, tem-se desalinhamento.

Com base nessas informações pode-se observar no Espectro de velocidade no domínio da frequência, representado pela Figura 19, que há dois sinais vibracionais no qual o primeiro aparece em uma frequência próxima a de rotação e o segundo sinal ao dobro da frequência de rotação caracterizado como desalinhamento paralelo ou radial.

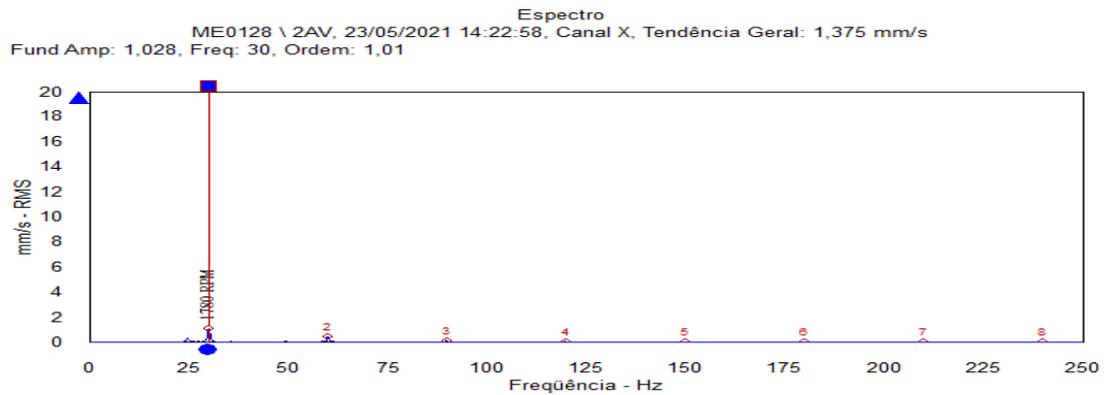
Figura 19 - Espectro de velocidade no domínio da frequência



Fonte: autoria própria

Após a intervenção com o alinhamento do conjunto, os sinais vibracionais que identificaram o desalinhamento não apareceram no espectro restando apenas os sinais em níveis normais como representado na Figura 20.

Figura 20 - Espectro de velocidade no domínio da frequência



Fonte: autoria própria

O alinhamento demonstrado na Figura 21 foi feito pela técnica a laser, utilizada por trazer mais precisão e deixar a máquina o mais próximo possível de seu projeto original. A ferramenta utilizada para tal foi o Alinhador de Eixos a Laser - SKF - TKSA 41 vista na Figura 22.

Figura 21 - Alinhamento a Laser do conjunto de acionamento de correia



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 22 - Alinhador de Eixos a Laser - SKF - TKSA 41



Fonte: Autoria própria.

Com os dados obtidos então pela análise dos sinais vibratórios pôde-se detectar altos níveis de vibração, característicos de um defeito por desalinhamento, durante um longo período com algumas variações na amplitude do espectro. Intervindo com o alinhamento a laser, os sinais de vibração antes elevados voltaram aos seus níveis normais, mostrando a efetividade do uso da análise vibracional como ferramenta de detecção desse tipo de falha.

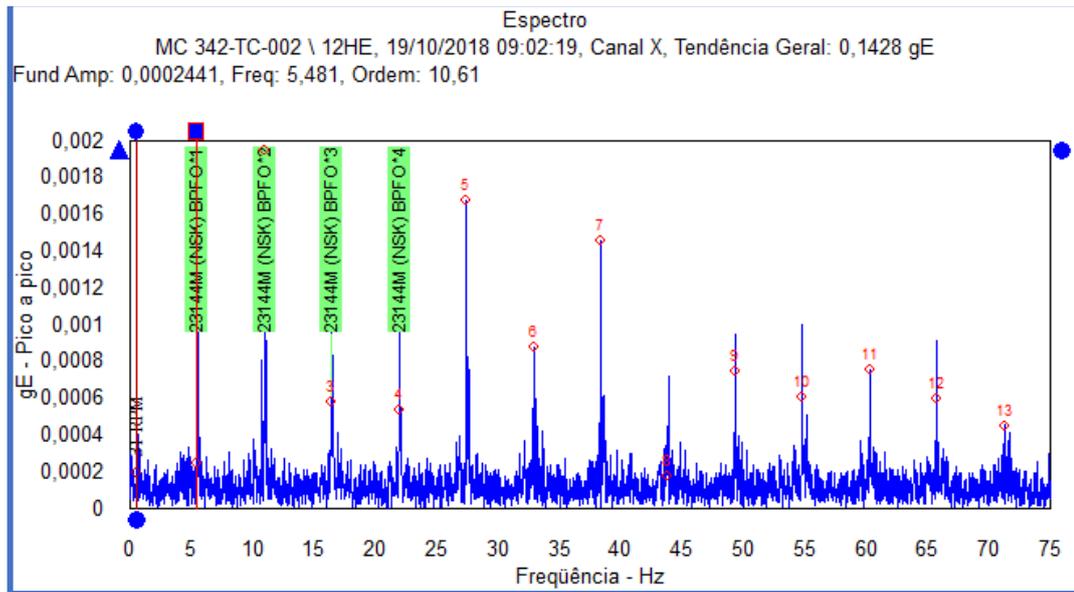
14.3 Caso 3 Correia Transportadora de minério

Neste caso são apresentados os resultados de uma análise de vibração em que foi encontrado um defeito na pista externa do rolamento 23144 NSK, que operava a 31 rpm. As linhas verticais azuis representam os harmônicos da frequência de falha de BPFO desse rolamento com 5,484 Hz, calculada pelo sistema *aptitude analyst SKF*.

Antes de ser feita a análise das vibrações do rolamento sob suspeita de falha foi necessário determinar as frequências características de defeito utilizando as fórmulas relacionadas a cada componente do rolamento sendo, pista interna, externa, os elementos rolantes como rolos ou esferas e a gaiola. Estes cálculos são baseados na geometria do rolamento, ou seja, de seus componentes. Esses dados são fornecidos pelo fabricante onde até mesmo as frequências características de defeito podem ser informadas.

No rolamento mencionado, a geometria dos seus componentes foi inserida no sistema *aptitude analyst* onde automaticamente se obteve os resultados das frequências, seriam frequências em que uma esfera colide no ponto da falha

Passados por esse processo e coletando as vibrações no rolamento foi iniciado a análise espectral podendo-se observar na Figura 23 a frequência onde aparece o pico da falha no primeiro harmônico, representado pela linha vertical azul, com valor de 5,481 Hz (frequência em que a esfera colide no ponto da falha), valor este que coincide com o da frequência característica de defeito de BPFO mencionado acima com o valor de 5,484 Hz calculado pelo sistema.

Figura 23 - Envelope de Aceleração

Fonte: Autoria própria.

Foi aplicada a técnica de Envelope de aceleração no espectro para identificar as frequências das séries de impacto que ocorrem quando há a passagem dos elementos rolantes pelo ponto da pista externa onde está a avaria.

Com essa técnica foi possível separar os sinais característicos de falhas de outros sinais de vibração que ocorrem naturalmente durante a rotação do equipamento, tornando possível observar essas frequências com maior clareza.

Com a abertura do mancal para realizar a inspeção do rolamento após as análises obtidas, verificou-se a avaria na pista externa, conforme a Figura 24.

Figura 24 - Rolamento 23144 NSK – 31 rpm

Fonte: Autoria própria.

Utilizando a ferramenta análise de vibrações juntamente com o software *aptitude analyst SKF*, foi possível diagnosticar de forma eficaz a falha em um estágio incipiente, fornecendo informações importantes para direcionar a estratégia de manutenção.

15 CONCLUSÃO

Este estudo teve intuito de mostrar a eficácia da manutenção preditiva, utilizando a análise de vibração como método de detecção de falhas mecânicas. Análises detalhadas puderam ser feitas para determinar a saúde do ativo e identificar as falhas que poderiam surgir ou que já estavam presentes.

Os padrões técnicos e indicadores de severidade de vibração apresentados neste estudo, como os apontados na norma ISO 10816, mostram sua eficácia na análise de ativos, pois com base na medição de vibração dos equipamentos estudados, puderam ser definidos limites de avaliação, como o de "alarme" e "crítico", e assim fazer o monitoramento dos equipamentos utilizando a curva de tendência.

No caso 1 foi analisado o motor elétrico de um britador cônico que apresentava deficiência de lubrificação no qual foi identificada por meio da análise do Espectro de Cascata no domínio da Frequência, utilizando a técnica de envelope de aceleração como parâmetro e da Tendência de Aceleração. A eficiência da intervenção por meio da relubrificação também ficou evidenciada nas duas análises mostrando que os níveis vibracionais voltaram a normalidade.

O conjunto de acionamento de uma correia transportadora foi analisada no caso 2 mostrando que a mesma vinha apresentando elevados níveis de vibração devido a um desalinhamento de seu conjunto. Esse diagnóstico só foi possível ser encontrado com a utilização da análise das vibrações obtidas no acompanhamento periódico da máquina demonstrada em um espectro. Feito a manutenção do equipamento novos sinais vibracionais puderam ser observados mostrando que houve uma redução dessas vibrações determinando que o ativo estava operando normalmente evitando assim que houvesse uma paralisação do equipamento que levaria a perdas de produção.

O caso 3 mostrou por meio de uma análise espectral a avaria de um rolamento em sua pista externa que apresentou desgaste devido os impactos dos elementos rolantes no local mostrando a eficiência da técnica de análise de vibração em detectar falhar ainda em um estágio incipiente de modo a prevenir contra quebras ou perda total do equipamento.

No setor industrial, onde se busca a qualidade e a produtividade, a manutenção passa a ser tratada como função estratégica, visto que é um ambiente de muita competitividade, sendo um fator imprescindível para o sucesso das organizações. Com a utilização da análise de vibração, a manutenção se torna ainda mais eficaz no ambiente industrial, pois a possibilidade de antecipar as quebras acarreta um melhor planejamento das intervenções de manutenção, além de obter uma maior economia de recursos financeiros e menos riscos aos funcionários envolvidos em tarefas de manutenção corretiva.

16 REFERÊNCIAS

ABREU, A. M; SOARES, I. M; SOUZA, S. T. O. Termografia em manutenção preditiva: Conceitos e aplicabilidades em máquinas e equipamentos industriais. **Bolsista de Valor: Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense**, Campos dos Goytacazes – RJ, v.2, n. 1, p. 89-94, maio, 2012.

ABREU, Guilherme; GIANELLI, Rafael; BANDEIRA, Guilherme. **Vibração e ruído em manutenção preditiva. 2010**. Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Júlio Mesquita Filho, Bauru - SP, 2010.

ALBERTI, Ana. Integração de técnicas de manutenção preditiva. 2020. Disponível em: <<https://www.alsglobal.com/pt-br/news/artigos/2020/12/integracao>>. Acesso em: 05 Out. 2021.

ALEGRANZI, S. B.; GONÇALVES, J. F.; GOMES, H. M. BALL bearing vibration monitoring for fault detection by the envelope technique. **Boucher Mechanical Engineering Proceedings**, Rio Grande do Sul, v. 01, n. 1, 2014.

ALMEIDA, P.S. D. **Manutenção Mecânica Industrial - Conceitos Básicos e Tecnologia Aplicada**, ed. 1, São Paulo: Editora Érica, 2015.

ALMEIDA, Bruno Guerra; FABRO, Elton. **Indústria 4.0 como ferramenta na engenharia de manutenção com base na metodologia TPM**. Caxias do Sul: Scientia Cum Indústria, v.07, n. 02, p. 23 – 39, 2019.

ALSALAET, Jaafar. **Vibration Analysis and Diagnostic Guide**. 2012. 65 f. University of Basrah, Basra, 2012.

ALVES, Sylvio. Análise de vibração de máquinas para manutenção preditiva. 2019. Disponível em: <<https://venturus.org.br/analise-de-vibracao-de-maquinas-para-manutencao-preditiva/>>. Acesso em: 24 Set. 2021.

ANDRADE, A. F. A. Técnicas de análise de vibrações 1. **SENAI CIMATEC**, Salvador, rev. 1, p. 125, 2004.

AROEIRA, Carlos. Medição de vibrações. 2019. Disponível em: <<https://www.dmc.pt/medicao-de-vibracoes/>>. Acesso em: 24 Set. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro, 1994. 37 p.

BALDISSARELLI, Luciano; FABRO, Elton. Manutenção Preditiva na Indústria 4.0. **Scientia Cum Industria**, v. 7, n. 2, p. 11 - 22, 2019.

BARILLI, R. J. C. **Análise de falhas em mancais de rolamento utilizando a técnica de envelope**. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

BASTOS, José Rodrigo; JUNIOR, Reinaldo Borges. Previsão de falhas em rolamentos utilizando a demodulação de sinais de vibração. **Anuário da produção de iniciação científica Discente**, São Paulo, v. 13, n. 17, p. 8 - 17, 2010.

BRAGA, Danilo. Como o desalinhamento de eixos ocorre e quais os perigos para o seu equipamento. 2020.

Disponível em: <<https://www.cimm.com.br/portal/artigos/19954-como-o-desalinhamento-de-eixos-ocorre-e-quais-os-perigos-para-o-seu-equipamento>>. Acesso em: 6 Dez. 2021.

COSTA, David Alexandre Germano. **Técnicas avançadas de análise de vibração no âmbito do controle de condição**. 2017.140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2017.

GALLI, Vinícius Barcos. **Manutenção preditiva por análise de vibração mecânica em máquinas rotativas: estudo de caso.** 2017. 96 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.

HOLANDA, Sandra Maria Santos. **Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto.** 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de materiais de fabricação) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

ISO 10816-3, **Mechanical Vibration - Evaluation of machine Vibration by measurements on non-rotating Part 3:** Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ, 2009.

JESUS, Keliene Maria Souza. **Implementação e análise de desempenho de técnicas de monitoramento através de medição de vibração e correlação com corrente estatórica.** 2010. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2010.

JUNIOR, JOE LUIZ ROSSDEUTSCHER. **Análise de vibração em rolamentos Industriais.** 2018. 74 f. Dissertação (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário UNIFACVEST, Lages, 2018.

KELLY, S. Graham. **Vibrações Mecânicas: Teorias e aplicações.** São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2018.

LUCIANO, É. L., GONÇALVES, I. J., CASSIANO, R. A., RIBEIRO, R. B., CONRADO, P. H. S. **Otimização Da Manutenção Produtiva Total (TPM) No Setor Administrativo De Uma Empresa De Manutenção Elétrica.** South American Development Society Journal. v. 6, n. 17, p. 21-39, 2020.

MAIS, Jason. **Spectrum Analysis: the key features of analyzing spectra.** SKF.USA. 2002. Disponível em: <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-univer/disenio-y-medicion-del-trabajo/0901d1968024-acef-cm5118-en-spectrum-analysis-tcm-12-113997/33744023>. Acesso em: 6 Dez. 2021.

MARÇAL, R. F. M; SUSIN, A. A. Detectando falhas incipientes em máquinas rotativas. **Revista Gestão Industrial**, Curitiba – Pr, v. 01, n 021, p.83-92, 2005.

MARÇAL, R. F. **Um método para detectar falhas incipientes em máquinas rotativas baseado em análise de vibrações e Lógica Fuzzy.** 2000, 124 f. Dissertação (Pós-graduação) - Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

MENEZES, Prisco Araújo. **Análise de Vibrações aplicadas a detecção de falhas em rolamentos de cubo de roda.** 2015. 92 f. Dissertação (Bacharel em Engenharia Automotiva) - Universidade de Brasília UnB, Brasília, 2015.

NEPOMUCENO, Lauro. X. **Técnicas de manutenção preditiva.** 1. ed. São Paulo: Blucher, 1982.

NEWTON, S. S. **Curso de fundamentos de vibrações e balanceamento de rotores.** 2008. 122 f. Curso - Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

NICHTERWITZ, M. P. **“Estudo comparativo entre os métodos do valor de pico (Peakvue) e da demodulação de sinais de vibração (envelope) na previsão de falhas em rolamentos.”** 2013. 25 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

OLIVEIRA, R. T. **Automação em inspeção de correias transportadoras aplicadas à mineração.** 2019. 47 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Curso de Engenharia - Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.

OSTI, Sti Vibration Monitoring Inc. An ISO 9001:2015 Certified Company. 2017. Disponível em: < [Resultados da KB \(stiweb.com\)](http://Resultados da KB (stiweb.com))>. Acesso em: 14 Dez. 2021.

OTANI, Mario; MACHADO, Waltair Vieira. **A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, v. 04, n. 02, p. 10 – 16, 2008.

PREDITEC. **Análise de vibrações Módulo 1: Introdução a análise de vibração.** 2011. Disponível em: < [Preditec Manutenção Preditiva \(prediteceng.blogspot.com\)](http://Preditec Manutenção Preditiva (prediteceng.blogspot.com))>. Acesso em: 10 Dez. 2021.

PROCEL, Acoplamento Motor Carga.: Guia básico. Brasília: Link Desing, 2009. 145 p.

RAO, Singiresu. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009. 449 p.

SANTOS, S. R. **Detecção de falhas em rolamentos de máquinas rotativas utilizando técnicas de processamentos de sinais**. 2017. f.137. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na linha de pesquisa de Gestão e Otimização) - Curso de Engenharia - Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2017.

SCHEKIERA, A. A. **Engenharia Manutenção Inspeção**. 1. ed. Itapetininga: Clube de Autores, 2011. 247 p.

SCHOLLES, Clara, R. Técnicas preditivas: Como análise de óleo e de vibração se complementam. 2018. Disponível em: <https://www.industria40.ind.br/artigo/17111-tecnicas-preditivas-como-a-analise-de-oleo-e-de-vibracao-se-complementam>

SHULKIN, Ilya. **Early bearing fault analysis using high frequency enveloping techniques**. 2016. 137 f. Dissertação (Mestrado em ciências) - Purdue University graduate school, Indiana, 2016.

SILVA, D. H. J. **Processamento de sinais para monitoramento de vibrações em unidades geradoras hidrelétricas**. 2013. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

SKF, Reliability Systems. Tecnologia de vibrações. 2004. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/139193419/Vibracoes-SKF>>. Acesso em: 06 Dez. 2021.

SOUZA, Valdir Cardoso; et al. Utilização das tecnologias da indústria 4.0 na manutenção preditiva através do monitoramento de equipamentos e instalações. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 1, p.7063 – 7083, 2022.

TRACTIAN. Desmistificando a análise de vibração em máquinas. 2020. Disponível em: <https://gear.tractian.com/d3c899743238>>. Acesso em: 9 Dez. 2021.

VARELA, J. **Critérios de seleção de britadores aplicados ao processamento mineral.** XXIV ENTMME, Salvador, 2011.

WHITE, Glenn. **Introducción al Analisis de vibraciones.** Woburn, MA: Ázima DLI, c2010. 148 p.

XAVIER. Manutenção - Tipos e tendências. 2003. Disponível em: <<http://claudemiralves.weebly.com/uploads/3/8/6/2/3862918/tendencia.pdf>>. Acesso em: 6 Jun. 2021.

ZAMMAR, Gilberto; WOYCIECHOWSKI NETO, Estevam; ZAMMAR Adriane G. G.; KOVALESKI, Fanny; KOVALESKI, João L. Práticas preditivas para análise do comportamento de equipamentos industriais e a transferência de tecnologia: o caso de um motor elétrico, **Espacios**, Ponta Grossa, v. 38, n. 29, p. 6 – 22, 2017