

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise Vibracional e Predição de Falhas em Motor de
Triturador Industrial.**

Alunos:

Lorenzo Barbosa Warrak
Guilherme Bhering Gonçalves
Lucio Cardoso Bassini

Orientador: Fernando Ribeiro da Silva

**Rio de Janeiro
Outubro de 2021**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise Vibracional e Predição de Falhas em Motor de
Triturador Industrial.**

Projeto apresentado em cumprimento às normas da disciplina de Projeto Final 1 do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para conclusão da mesma.

Alunos:

Lorenzo Barbosa Warrak
Guilherme Bhering Gonçalves
Lucio Cardoso Bassini

Orientador: Fernando Ribeiro da Silva

**Rio de Janeiro
Outubro de 2021**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

W286 Warrak, Lorenzo Barbosa
Análise vibracional e predição de falhas em motor de triturador industrial / Lorenzo Barbosa Warrak, Guilherme Bhering Gonçalves [e] Lucio Cardoso Bassini – 2021.
66f. : il. color., enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2021.
Bibliografia: f. 64-66
Orientador: Fernando Ribeiro da Silva

1. Engenharia mecânica. 2. Localização de falhas (Engenharia). 3. Controle de qualidade. 4. Vibração.
I. Silva, Fernando Ribeiro da (Orient.). II. Gonçalves, Guilherme Bhering. III. Lucio Cardoso Bassini. IV. Título.

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes – CRB/7 nº 5281

AGRADECIMENTOS

O agradecimento principal vai para as famílias dos membros do grupo para realização de trabalho de conclusão de curso, que os ajudaram e os apoiaram sempre que foi preciso, inclusive quando não precisaram.

Da parte de Lorenzo Barbosa Warrak, agradece-se principalmente o auxílio indispensável de Abdalla Assad Warrak e Maria Lúcia Barbosa Warrak, pais, Raíssa Barbosa Warrak, irmã, e Ana Beatriz Gomes Vargas, namorada.

O agradecimento de Lucio Cardoso Bassini vai principalmente para os pais, Lucio Bassini e Roselene Moulin Breda Bassini, e a irmã Valentina Breda Bassini, por todo suporte desde o início, além de agradecer à Paulo Sérgio Bassini, tio que, por mais que não tenha conseguido acompanhar esta etapa de vida do participante, o influenciou de diversas formas.

E em nome de Guilherme Bhering Gonçalves, reconhecer a ajuda a todo o momento de Fernando Freitas Gonçalves e Josélia Maria de Souza Bhering, pais, e seu irmão André Bhering Gonçalves.

Em nome de todos os membros, é preciso agradecer a Edvey da Silva Pontes, por sempre estar disposto a ajudar na construção desse trabalho, além de Wilson Carlos Faria, pelo incentivo inicial para a realização desse tema.

Por fim, deve-se agradecer ao orientador responsável por esse projeto, professor Fernando Ribeiro, por ser a pessoa que orientou os membros do grupo a sempre melhorar nos pontos que necessitavam e guiá-los para um melhor resultado.

RESUMO

Este artigo tem como objetivo realizar um estudo de caso sobre o impacto da análise vibracional como ferramenta de previsão de falhas, especificamente se tratando de um motor elétrico de um triturador industrial. Por meio da leitura das medições das vibrações mecânicas do equipamento e gráficos de espectros de frequência obtidos pelos sensores, coletor de dados, e software de tratamento de dados da empresa BentleyNevada, foi possível identificar, prever a ocorrência de falhas e tratar diversas condições que poderiam evoluir para uma falha catastrófica no triturador, como a falha no rolamento, o desbalanceamento e o desalinhamento do rotor. Sabe-se da importância da estratégia de manutenção bem definida, visto que é responsável por evitar defeitos e avarias durante a operação e a possibilidade da máquina ter que ser substituída por não funcionar mais. Isso tudo gera impacto financeiro em indústrias, além de poder comprometer a segurança de seus colaboradores.

Palavras-chave: Motor elétrico, análise vibracional, envelope, falha de rolamento, triturador, desbalanceamento, desalinhamento.

ABSTRACT

This article aims to develop a case study on the impact of vibrational analysis as a failure prediction tool, specifically dealing with an electric motor of an industrial crusher. By analyzing the vibration measurements and frequency spectrums obtained by the sensors, data collector, and data processing software of the company BentleyNevada, it was possible to identify, predict failures appearances, monitor and deal with various conditions that could have evolved to a catastrophic failure in the crusher, such as a failure in the bearing, misalignment and imbalance of the rotor. The importance of a well-defined maintenance strategy is known, as it is responsible for avoiding defects and damage during operation and the possibility of the machine having to be replaced because it no longer works. This all generates a financial impact on industries, in addition to compromising the safety of their employees.

Keywords: Electric motor, vibrational analysis, envelope, bearing failure, crusher, imbalance, misalignment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistemas com 1 e 2 graus de liberdade.[17].....	21
Figura 2: Viga com infinitos graus de liberdade.[17]	22
Figura 3: Sistema massa-mola.....	22
Figura 4: Fenômeno de ressonância[17]	24
Figura 5: Fenômeno de batimentos[17].....	24
Figura 6: Sinal captado no domínio do tempo [29].....	25
Figura 7: Valores de amplitude de pico-a-pico, 0 a pico e RMS [29].....	26
Figura 8: Sinais senoidal, aleatório e transiente [29]	27
Figura 9: Transformação de um sinal no domínio do tempo em sinal no domínio da frequência [29].....	28
Figura 10: Sinal portador antes da utilização da técnica de envelope [29].....	29
Figura 11: Sinal modulado isolado [29]	30
Figura 12: Eixo com desbalanceamento estático.[16].....	32
Figura 13: Eixo com desbalanceamento acoplado[16].....	33
Figura 14: Eixo com desbalanceamento dinâmico[16].....	33
Figura 15: Espectometria de rotor desbalanceado.[18]....	34
Figura 16: Tipos de desalinhamento de eixos[30].....	34
Figura 17: Espectometria de ventilador com eixo desalinhado angularmente. [18].....	35
Figura 18: Espectometria de moinho com eixo desalinhado linearmente.[18]	35
Figura 19: Análises no domínio de frequência de folgas mecânicas, por tipo.[7].....	36
Figura 20: Espectometria de exaustor em ressonância.[18]	

.....	37
Figura 21: Componentes internos de um rolamento.....	38
Figura 22: Características de cada estágio de falha de um rolamento. [7].....	40
Figura 23: Espectrometria de engrenagens de uma extrusora.[18].....	41
Figura 24: Foto aérea de um Triturador operacional.....	41
Figura 25: Principais componentes do alimentador de sapata.[5].....	43
Figura 26: Rolo compactador.....	43
Figura 27: Rotor.....	44
Figura 28: Esquema do conjunto Rotor + Martelos.Adaptado de [19].....	44
Figura 29: Martelo Novo.....	45
Figura 30: Martelo Usado.....	45
Figura 31: Esquemática do Triturador Housing.....	46
Figura 32: End Cap.....	46
Figura 33: Cap.....	47
Figura 34: Motor TOSHIBA abrigado.....	47
Figura 35: Especificações técnicas do motor TOSHIBA[31].....	47
Figura 36: Sistema de despoejamento.....	48
Figura 37: Tambores eletromagnéticos.....	49
Figura 38: Transportadores de correia paralelos.....	49
Figura 39: Empilhadeira Radial.....	50
Figura 40: Vista superior da planta de um triturador industrial.....	50

Figura 41: Vista frontal da planta de um triturador industrial	51
Figura 42: Acelerômetro utilizado.....	52
Figura 43: Ficha técnica dos acelerômetros[32]	52
Figura 44: Sensores conectados ao lado acoplado do motor	53
Figura 45: Sensores conectados ao lado livre do motor ..	53
Figura 46: Esquema de montagem dos sensores para coleta.....	53
Figura 47: Esquema de aquisição de dados.....	54
Figura 48: Coletor de dados vbOnline Pro Condition Monitoring System[33]	54
Figura 49: Espectrografia de rotor do moinho desbalanceado.	55
Figura 50: Peça Não Conforme.....	55
Figura 51: Moinho agarrado	56
Figura 52: Pedaco de martelo quebrado	56
Figura 53: Caps Quebrados.....	57
Figura 54: Eixo Cardan	57
Figura 55: Espectrometria de desalinhamento do motor..	58
Figura 56: Esquema de Corrente Parasita[25].....	58
Figura 57: Desenho esquemático do ensaio de correntes parasitas.[27]	59
Figura 58: Espectro sem falha da pista externa do rolamento do lado livre.....	60
Figura 59: Surgimento de falha na pista externa do rolamento do lado livre.....	61
Figura 60: Espectro de agravamento de falha na pista	

externa do rolamento do lado livre.	61
Figura 61: Tendência de falha na pista externa do rolamento do lado livre.....	62
Figura 62: Usinagem por descarga elétrica na pista de um rolamento.[28].....	62
Figura 63: Corrosão Elétrica na pista externa do rolamento do lado livre	63
Figura 64: Especificações técnicas do motor WEG	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre os parâmetros dos três tipos de sinais [29].....	27
---	----

SUMÁRIO

1.	Introdução	15
1.1.	Manutenção preditiva e preventiva em equipamentos industriais	15
1.2.	A Análise Vibracional	15
1.3.	Processamento de Sucata	16
1.4.	Objetivo.....	16
1.5.	Metodologia	17
2.	Revisão Bibliográfica	18
2.1.	Tipos de manutenção.....	18
2.1.1.	Manutenção Corretiva.....	18
2.1.2.	Manutenção preventiva	18
2.1.3.	Manutenção preditiva.....	19
2.2.	Fundamentação Teórica	20
2.2.1.	Conceitos básicos.....	20
2.2.1.1.	Vibração mecânica.....	20
2.2.1.2.	Amplitude, período e frequência.....	21
2.2.1.3.	Graus de liberdade.....	21
2.2.2.	Vibração livre	22
2.2.3.	Vibração Forçada.....	23
2.2.4.	Desbalanceamento de massas rotativas.....	25
2.2.5.	Processamento de sinais de análise vibracional...	25
2.2.5.1.	Sinais no domínio da frequência.....	27
2.2.5.2.	Transformada rápida de Fourier (FFT)	28
2.2.5.3.	Método de envelope.....	29

2.3. Análise de Vibrações aplicada na manutenção preditiva.....	30
3. Metodologia.....	31
3.1. Equipamento de medição.....	31
3.1.1. Sensores.....	31
3.1.2. Analisadores de frequência de vibrações.....	31
3.2. Problemas mais comuns em máquinas.....	32
3.2.1. Desbalanceamento.....	32
3.2.2. Desalinhamento.....	34
3.2.3. Folgas.....	36
3.2.4. Excentricidade.....	36
3.2.5. Ressonância.....	37
3.2.6. Rolamentos.....	37
3.2.7. Engrenagens.....	40
3.3. Descrição do Equipamento.....	41
3.3.1. Alimentador de Sapatas ou APRON.....	42
3.3.2. Rolos Compactadores.....	43
3.3.3. Moinho.....	43
3.3.4. Despoeiramento.....	48
3.3.5. Alimentador Vibratório.....	48
3.3.6. Sistema de Separação Magnética.....	48
3.3.7. Sistema de Separação Manual.....	49
3.3.8. Empilhadeira Radial.....	49
3.4. Equipamentos utilizados na medição.....	51
4. Resultados e discussões.....	55

4.1. Desbalanceamento	55
4.2. Desalinhamento	57
4.3. Falha no rolamento	58
4.3.1. Conceito de Corrente Parasita	58
4.3.2. Análise de Falha no Rolamento.....	60
5. Conclusão.....	64
6. Bibliografia.....	65

1. Introdução

A gestão dos ativos em uma indústria é de fundamental importância, pois visa não somente manter a saúde e integridade de seus equipamentos, como também sempre garantir os melhores resultados de sua produção. Para garantir uma gestão eficiente, é fundamental possuir um bom plano de manutenção, que deve garantir sempre o bom funcionamento dos equipamentos bem como procurar estender a sua vida útil.

1.1. Manutenção preditiva e preventiva em equipamentos industriais

A ideia de predição é a capacidade de prever antecipadamente o que pode ocorrer num momento futuro, sendo deduzido a partir de evidências apresentadas e entendidas anteriormente.

Uma importante introdução é o conceito de manutenção preditiva. Ela consiste no acompanhamento, como uma rotina, dos equipamentos de uma empresa, através de informações coletadas por algum processo técnico. A análise vibracional, assim como inspeções visuais, análise de óleo e termografia são métodos muito comuns de coleta de informações para que seja feita esse tipo de manutenção.

Essa técnica pode trazer muitos benefícios para a empresa que decidir adotar como prática. Alguns deles são a capacidade de antecipar necessidade de manutenção, diminuir o tempo que os equipamentos ficam parados, ser possível aumentar a vida útil dos mesmos e sua confiabilidade.

Já a manutenção preventiva, se trata da verificação periódica de algum equipamento ou processo produtivo para identificar se existe a possibilidade de uma falha e evitar que ela ocorra. Quando se fala em plano de manutenção, é pensado na formulação de um plano preventivo, visto que existirão parâmetros para a análise, como periodicidade e como serão feitas as intervenções.

Os conceitos entre as duas manutenções são semelhantes, porém são complementares. Com as análises e diagnósticos adquiridos pela manutenção preditiva, se torna possível a criação de um plano preventivo, logo a primeira é necessária para que a segunda exista.

1.2. A Análise Vibracional

Com o crescimento de novas tecnologias na área computacional, surgem novas técnicas de avaliação de equipamentos industriais para otimizar os planos de manutenção. Uma dessas novas técnicas é a análise vibracional, que é feita usando sensores elétricos que são conectados à máquina e a um computador que irá registrar esses dados e gerar um gráfico a partir de um software. Esses dados serão analisados por um técnico treinado que será capaz de prever a falha dos componentes da máquina e, a partir dessa previsão, criar um plano de manutenção que agende a parada para reparo no momento mais oportuno, garantindo o uso desses componentes ao seu máximo e reduzindo desperdícios.

A análise vibracional consiste em acompanhar em dado período de tempo ou em tempo real a vibração de um equipamento para verificar seu estado de funcionamento e prever com satisfatória precisão quando seus componentes irão falhar por um processo de fadiga, abrasão, superaquecimento etc. Este acompanhamento é de fundamental importância para a indústria, visto que muitas falhas ocasionadas por vibrações podem ser catastróficas para os equipamentos industriais, além de permitir a criação e administração dos planos de manutenção preventiva.

1.3. Processamento de Sucata

Como regra em qualquer parte do mundo, o crescimento populacional e econômico assegura a demanda por produtos de aço, e a geração de sucata consequentemente aumenta com o decorrer dos anos.

Nas plantas siderúrgicas integradas, a matéria-prima básica é o minério de ferro, que é reduzido à forma metálica nos altos fornos, mas também utilizam a sucata como elemento regulador nos processos dos convertedores, acirrando ainda mais a competição pela sua compra no concorrido mercado.

A sucata, desde sua compra, processamento e preparação para o consumo, é a matéria-prima básica no processo de fabricação do aço em plantas siderúrgicas denominadas semi-integradas, contribuindo com a metade do custo de produção do aço.

O maior equipamento em todas as dimensões, produtividade, custo de investimento e custo de manutenção é o triturador. Este equipamento fragmenta a sucata em pedaços compactados e amassados em pequenas dimensões com níveis extremamente baixos de impurezas, proporcionando um desempenho na operação dos fornos elétricos a arco muito superior ao dos fornos que não possuem essa sucata em seu mix de consumo. O produto do triturador é a sucata ferrosa fragmentada, sendo o primeiro commodity no mercado de aço reciclado em todo o mundo, justamente por sua influência positiva no desempenho das aciarias elétricas.

1.4. Objetivo

A situação problema que motivou este projeto final ocorreu devido à falta de acompanhamento das vibrações e da temperatura do rolamento do motor do triturador. Em determinado dia houve um entupimento na esteira que abastece o processador, fazendo com que o equipamento rodasse livremente, sem a resistência que as sucatas oferecem. Esse movimento livre de resistência mecânica, provocou um aumento da velocidade de rotação do triturador e, consequentemente, da vibração mecânica do equipamento. Essa elevação expressiva nas vibrações ocasionou uma subida da temperatura do rolamento do motor elétrico, resultando em um princípio de incêndio que poderia ter oferecido sérios riscos para a segurança e para os ativos da empresa. Após o acidente, foi descoberto que o rolamento em questão possuía um defeito pré-existente: a sílica responsável pela lubrificação dos elementos rolantes havia secado. Caso esse defeito fosse descoberto anteriormente, a falha no motor não ocorreria.

Tendo em vista a importância do triturador para a produção de sucata na indústria siderúrgica e a eficiência que a análise vibracional e outras ferramentas proporcionam na elaboração do plano de manutenção e no acompanhamento e tomada de decisão dentro do processo produtivo, é definido como escopo desse projeto uma introdução à conceitos teóricos de vibrações mecânicas e às definições dos conceitos de manutenção preventiva e preditiva, com o objetivo de embasar a realização de um acompanhamento de análise vibracional em um motor de um moinho do triturador de uma indústria siderúrgica e, por fim, a exposição de resultados de medições e comparação com o encontrado na literatura.

1.5. Organização do Trabalho

Neste projeto será apresentada a questão problema, que motivou a realização deste estudo. Posteriormente no capítulo 2, será realizada uma revisão bibliográfica, apresentando os diferentes tipos de manutenção, uma breve descrição da teoria de vibrações mecânicas, com as respectivas equações que regem o movimento dos corpos em movimento oscilatório, a teoria de processamento de sinais de análise vibracional e uma relação entre a técnica de análise vibracional e a manutenção preditiva.

No capítulo 3 haverá uma descrição do triturador e de seus subcomponentes, além de uma descrição dos equipamentos de medição mais comuns e das técnicas e métodos de processamento de sinais em análise vibracional. Adiante, serão mostrados os equipamentos utilizados para aquisição dos dados para este projeto, haverá uma exposição dos problemas mais comuns em máquinas industriais relacionados a vibrações e uma descrição detalhada de cada um dos subcomponentes que compõem o triturador.

No quarto capítulo serão expostos os resultados obtidos nas medições realizadas e estes serão comparados aos problemas relacionados a vibrações mecânicas previamente mostrados. Finalmente, no capítulo 5, será realizada uma conclusão, comentando acerca da eficiência da análise vibracional para predição de falhas no triturador industrial.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Tipos de manutenção

A manutenção pode ser definida como todas as atividades necessárias para a garantia da vida útil a curto, médio e longo prazo dos ativos em uma empresa. Esta pode ser subdividida em três tipos: corretiva, preventiva e preditiva.

2.1.1. Manutenção Corretiva

Como o próprio nome pressupõe, a manutenção corretiva é aquela que tem como finalidade corrigir, restaurar ou reestabelecer um equipamento que se encontra defeituoso. Também chamado de reativa, este tipo de manutenção é acionado somente quando um problema ocorre e é identificado, geralmente necessitando de uma parada de máquina para ser realizada, ocasionando por consequência, interrupções e perdas de produção.

É o método mais caro e menos eficiente de manutenção pois exige um estoque de peças de reposição mais elevado, maior custo de mão de obra e, principalmente, custos muito elevados com perdas de produção. Apesar disso, ainda é praticamente impossível agir de forma totalmente preventiva, sendo possível apenas tentar reduzir ao máximo a necessidade de intervenções corretivas.

Mara (2004) argumenta que em setores que usam muitas máquinas de custo baixo e têm processos de fabricação críticos, geralmente as mesmas funcionam até falhar. A perda de produção não é grande e a máquina sobressalente pode continuar a produção imediatamente.

As empresas que não possuem uma programação e uma boa administração em relação a manutenção vivem comumente com problemas. Monteiro (2010), argumenta que nunca haverá pessoal de manutenção suficiente para atender todas as solicitações necessárias. Por isso, além de um bom número de funcionários no setor de manutenção, deve-se organizar bem as equipes, pois não se sabe quando serão solicitadas. Mesmo que tenha colaboradores de manutenção em quantidade suficiente, não saberão o que cobrar dos mesmos em épocas em que não tiverem solicitações por parte de manutenção de máquinas.

2.1.2. Manutenção preventiva

A manutenção preventiva é aquela que é realizada de maneira programada antes que um problema ocorra. Deve sempre seguir uma programação padronizada de intervenções bem definida. Essa programação especifica a periodicidade das paradas para manutenção e quais componentes deverão ser substituídos.

Segundo Pinto e Xavier (2006), a manutenção preventiva é caracterizada pela intervenção nos equipamentos, prevenindo antecipadamente as potenciais causas de avarias através de ações a intervalos regulares. O plano de manutenção é formulado levando-se em consideração os manuais do fabricante, histórico de manutenção e falha do equipamento, etc.

Segundo Gomes (2009), os pontos positivos a serem enfatizados na manutenção preventiva podem ser:

- Maior qualidade do produto: Além de custo, é possível se destacar no mercado com um produto de melhor qualidade. Para ser provida uma boa qualidade de

produto, a manutenção preventiva deverá ser aplicada com maior rigor, para que assim, esteja garantido que as máquinas estão operando no padrão desejado.

- Reduzir custos: a maioria das empresas busca reduzir o custo de seus produtos manufaturados. A manutenção preventiva pode desempenhar um papel importante em peças sobressalentes e paradas de emergência.
- Aumento de produção: Um aumento na produção da fábrica pode ser definido como o atendimento à demanda do mercado. É necessário manter a fidelidade dos clientes existentes da empresa e conquistar novos clientes para manter o prazo de entrega do produto em dia.
- Efeitos no meio ambiente: Em diversos ramos industriais, o ponto mais crítico é a poluição causada pelos processos de fabricação. Se a empresa tiver como meta a diminuição ou eliminação da poluição, a manutenção preventiva deverá ser capaz de direcionar corretamente os resíduos resultantes da manutenção.
- Aumento da vida útil dos equipamentos: O aumento da vida útil do equipamento geralmente não é causado por um fator, mas por vários. Como é impossível prever o modo de falha de cada máquina, a manutenção preventiva baseada no tempo não pode ser aplicada de forma eficaz. Portanto, existe a necessidade de um método que personalize cada máquina. Esta é uma tendência moderna aplicada à manutenção de máquinas, chamada de manutenção preditiva.

2.1.3. Manutenção preditiva

O significado desse tipo de manutenção, segundo a IAEA (International Atomic Energy Agency) (2007 apud MARAN, 2011), é a inspeção e medição dos parâmetros de operação da máquina por meio de equipamentos especialmente desenvolvidos para tais funções. Com o conhecimento a priori de que todos os componentes irão se degradar com o uso, ao usar esses dispositivos, é possível monitorar as falhas ao longo do tempo, avaliar possíveis tendências de aumento e escolher um melhor momento para aplicar as correções e agir antes das falhas.

A manutenção preditiva é feita a partir do conhecimento das condições que envolvem todos os componentes, processos e equipamento envolvidos no processo que se deseja realizar essa manutenção. A capacidade de se obter os dados necessários para a manutenção é feita através de acompanhamento do desgaste das máquinas, entre outros métodos, com testes frequentes para que se determine quando os reparos ou trocas de peças devem ser feitos.

Com o avanço da tecnologia nas áreas de estudo, ensaios novos foram descobertos, como as análises térmicas e análises de vibração. Estes ensaios são fundamentais para uma boa gerência de manutenção preditiva. Além disso, outros tiveram avanços capazes de otimizar fatores importantes, como custo e tempo. A grande vantagem do método é a capacidade de monitorar possíveis falhas, antes de serem defeitos de fato.

Segundo Tavares (1999), manutenção preditiva é definida como o monitoramento da degradação dos componentes do equipamento por meio da verificação de sintomas ou estimativas realizadas por meio cálculos estatísticos, a fim de inferir o comportamento desses componentes ou componentes e determinar o ponto exato de troca ou reparo.

Segundo Pinto (et al., 2002), a manutenção, através da predição, não é única. Os dispositivos devem ser tratados diferentemente, pois todos possuem suas

peculiaridades. Cada máquina exige um conhecimento específico sobre o mesmo. Dessa forma, ela não pode ser considerada como um todo, mas precisa ser considerada específica para cada caso.

Segundo Mobley (1990), em uma pesquisa realizada, em 1988, com 500 empresas dos Estados Unidos, Canadá, Reino Unido e outros países, que implementaram métodos de manutenção preditiva, os principais resultados obtidos são os seguintes:

- Foi capaz de diminuir as despesas envolvendo manutenção em até 50%;
- Crescimento de 30% na produção;
- Crescimento de 30% na durabilidade das máquinas;
- Tornar o tempo de reparo até 60% menor;
- Melhora na segurança dos operadores.

Alguns pontos negativos, segundo Maran (2011), são:

- Exige a necessidade de que seja feito um bom treinamento e certificação para os técnicos;
- Dificuldade de aplicar esse tipo de manutenção em ativos com características pouco conhecidas;
- Exige uma boa administração de materiais e bom planejamento de serviços.

Existem diversas técnicas diferentes de manutenção preditiva, cada uma com seu objetivo e aplicação específicos. Podem-se citar alguns exemplos, como controle de pressão em sistemas de fluidos, que é feito através de manômetros ligados à linha por onde os fluidos passam; Controle de temperatura, feito com o uso de termômetros ou termopares; ensaios de líquidos penetrantes, onde um líquido de baixa densidade penetra no material expondo suas imperfeições e trincas; ensaios por partículas magnéticas, onde partículas ferromagnéticas muito pequenas são aplicadas sobre a superfície do material e na presença de um eletroímã expõe as falhas e trincas do material; análise de óleos lubrificantes, onde se analisam as principais características do óleo que está sendo utilizado no equipamento como coloração, densidade, viscosidade etc. para determinar a vida útil desse lubrificante e detectar possíveis falhas no equipamento; análise de vibrações, onde transdutores captam e registram a vibração da máquina, permitindo antecipar problemas e falhas no equipamento.

2.2. Fundamentação Teórica

2.2.1. Conceitos básicos

2.2.1.1. Vibração mecânica

Uma vibração ou oscilação é qualquer movimento de uma partícula ou um corpo que se repete após um determinado intervalo de tempo e oscila em torno de uma posição. Geralmente quando um sistema é movido de sua posição de equilíbrio estável, um movimento vibratório é gerado e se repete até que o equilíbrio seja novamente estabelecido através das denominadas forças restauradoras que podem ser elásticas no caso de uma mola, gravitacionais no caso de um pêndulo, entre outras.

Um sistema vibratório é geralmente composto de três meios: um para armazenar energia potencial, como uma mola, um para armazenar energia cinética,

como uma massa, e um de perda gradual de energia, como um amortecedor. O fenômeno da vibração mecânica consiste basicamente na transferência alternada de energia entre os meios de armazenagem de energia cinética e potencial, com dissipação gradual de energia pelo amortecimento, caso este esteja presente no sistema vibratório.

2.2.1.2. Amplitude, período e frequência

O intervalo de tempo que um sistema leva para completar um ciclo vibratório é denominado período da vibração (T). O número de ciclos completados dentro de uma unidade de tempo, ou seja, o inverso do período, é denominado frequência da vibração (f). Já a distância máxima entre dois pontos do movimento oscilatório é denominada amplitude de vibração (A).

2.2.1.3. Graus de liberdade

O número de graus de liberdade de um sistema vibratório nada mais é que o número mínimo de coordenadas independentes necessárias para determinar completamente o movimento vibratório. Na Figura 1, tem-se um pêndulo simples, que é um exemplo de sistema com um grau de liberdade, enquanto o esquema a direita apresentado possui dois graus de liberdade. Já uma viga mono-engastada é um sistema com infinitos graus de liberdade, como mostrado na Figura 2.

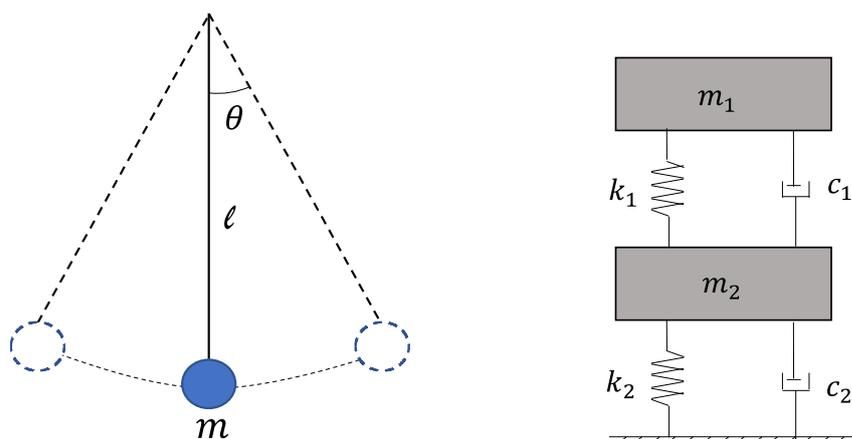


Figura 1: Sistemas com 1 e 2 graus de liberdade.[17]

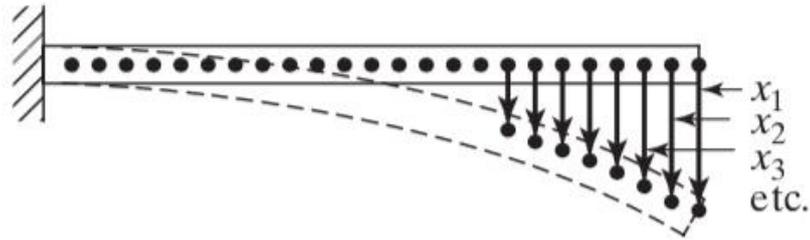


Figura 2: Viga com infinitos graus de liberdade.[17]

Os sistemas que possuem um número finito de graus de liberdade são denominados sistemas discretos, enquanto sistemas com número infinito de graus de liberdade são denominados sistemas contínuos.

2.2.2. Vibração livre

Considere o sistema massa-mola simples ilustrado na Figura 3. Segundo Rao, quando a massa for liberada após um deslocamento, ela oscilará em torno da posição de equilíbrio estático.

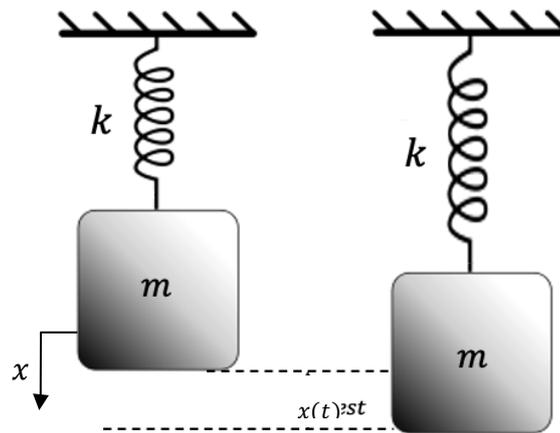


Figura 3: Sistema massa-mola.

Fazendo o equilíbrio de forças,

$$F_{\text{massa}}(t) = F_{\text{mola}}(t) \quad (1)$$

$$m\ddot{x} = -kx \quad (2)$$

Ou

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (3)$$

Ainda segundo Rao, a solução para a equação acima é:

$$x(t) = A \cos(\omega_n t - \phi) \quad (4)$$

Onde ω_n é a frequência natural do sistema, que é a frequência com que um sistema vibratório oscila por si próprio, sem a ação de forças externas, após uma perturbação inicial e vale

$$\omega_n = \left(\frac{k}{m}\right)^{1/2} \quad (5)$$

A e ϕ representam respectivamente a amplitude e o ângulo de fase do movimento e valem

$$A = \left[x_0^2 + \left(\frac{\dot{x}_0}{\omega_n}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

E

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\dot{x}_0}{x_0 \omega_n} \right) \quad (7)$$

Se for um sistema amortecido, o equilíbrio de forças, segundo Rao, é:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (8)$$

Onde c é a constante de amortecimento.

2.2.3. Vibração Forçada

Se uma força externa ao sistema vibratório atua sobre ele com uma frequência ω , essa vibração é denominada forçada ou excitada harmonicamente. Segundo Rao, para um sistema com um grau de liberdade, o equilíbrio de forças é

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (9)$$

Sendo $F(t) = F_0 \cos(\omega t + \phi)$ ou $F(t) = F_0 \sin(\omega t + \phi)$

A solução para a equação (6) quando $c\dot{x} = 0$ é, segundo Rao:

$$x(t) = \left(x_0 - \frac{F_0}{k - m\omega^2} \right) \cos \omega_n t + \left(\frac{\dot{x}_0}{\omega_n} \right) \sin \omega_n t + \left(\frac{F_0}{k - m\omega^2} \right) \cos \omega t \quad (10)$$

E a amplitude é

$$\frac{X}{\delta_{\text{est}}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (11)$$

Onde X e δ_{est} são, respectivamente, a amplitude dinâmica e a amplitude estática e a razão entre elas é chamada de fator de ampliação ou razão de amplitudes.

Quando $0 < \omega/\omega_n < 1$, a resposta harmônica está em fase com a força oscilatória. Quando $\omega/\omega_n > 1$, diz-se que a resposta está defasada de 180° em relação a força externa. Por fim, quando $\omega/\omega_n = 1$, diz-se que o sistema está em ressonância, ilustrado na Figura 4. Nessa condição, a amplitude aumenta indefinidamente, tendendo ao infinito. Por conta disso é muito importante evitar a proximidade das frequências natural e da força harmônica, pois essa condição poderá causar falhas catastróficas em máquinas e equipamentos mecânicos.

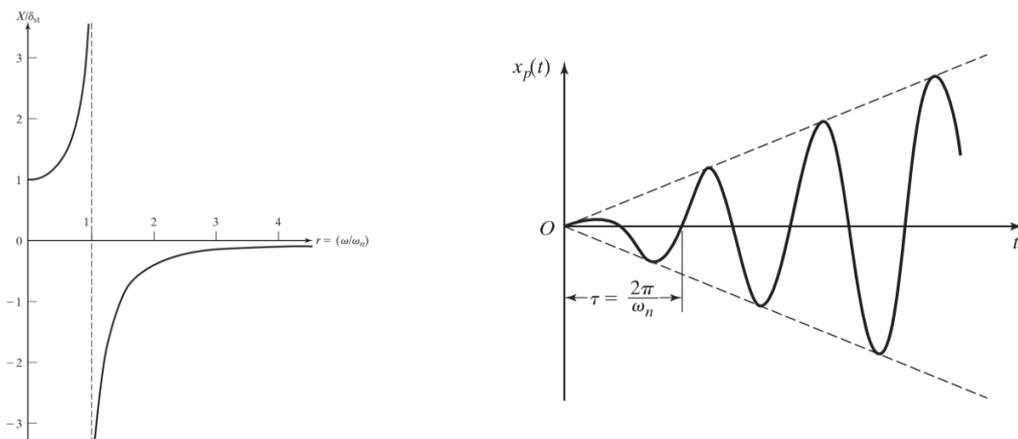


Figura 4: Fenômeno de ressonância[17]

Outro fenômeno digno de nota, pois também pode causar falhas e desgaste (fadiga) em equipamentos sujeitos a vibrações harmonicamente excitadas, é o fenômeno de batimentos, que ocorre quando as frequências natural e da força externa são próximas, mas não exatamente iguais. Nessa condição, a amplitude aumenta e diminui periodicamente, seguindo um padrão regular, como mostra a Figura 5.

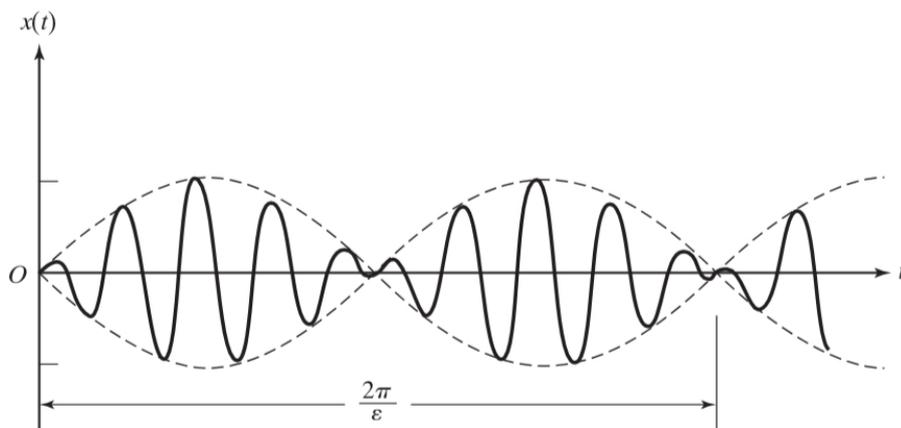


Figura 5: Fenômeno de batimentos[17]

2.2.4. Desbalanceamento de massas rotativas

O desbalanceamento de massa em sistemas rotativos é um dos grandes causadores de vibrações nesses sistemas. Em modelos teóricos considera-se uma massa de desbalanceamento m' concentrada em um único ponto de excentricidade e , girando a uma velocidade angular ω . A força de excitação harmônica gerada por essa massa é dada, segundo Rao, por:

$$F(t) = m'e\omega^2 \sin \omega t \quad (12)$$

2.2.5. Processamento de sinais de análise vibracional

A maioria dos transdutores de análise vibracional coletam dados no domínio do tempo, ou seja, captam informações vinculadas a um determinado intervalo de tempo, como ilustra a figura 6.

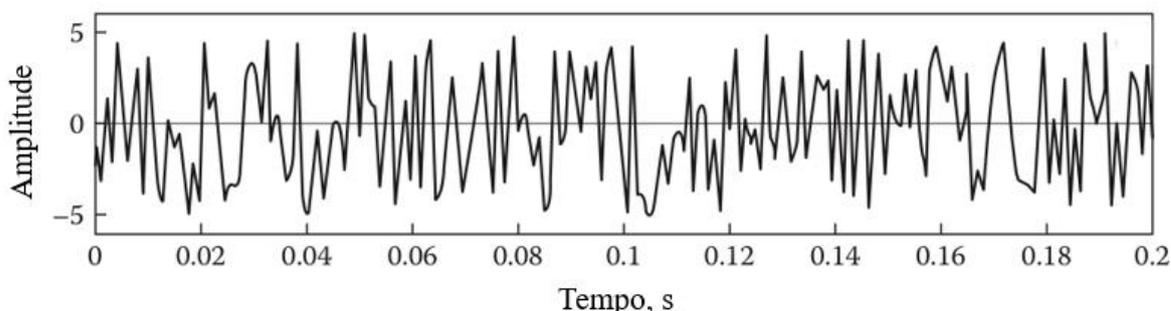


Figura 6: sinal captado no domínio do tempo, adaptado de [29]

É importante notar que a taxa de amostragem, ou seja, a quantidade de medições por um intervalo de tempo é de suma importância e é o que define a frequência máxima que pode ser analisada pelo sistema de captação de dados. De acordo com o teorema da frequência de Nyquist, a taxa de amostragem deve ser pelo menos o dobro da frequência que se pretende medir, para que o sinal possa ser corretamente identificado e captado.

A amplitude geral de qualquer sinal pode ser determinada por três diferentes formas: pico-a-pico, 0 a pico e raiz quadrática média, ou RMS (Root Mean Square). A amplitude de pico a pico mede a distância entre o pico mais baixo e o mais alto, enquanto a amplitude de 0 a pico mede a distância entre o pico mais elevado e o eixo de origem. Já o valor de RMS é definido como

$$y_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\int_0^T y^2(t) dt}{T}} \quad (13)$$

Onde T é o período do sinal $y(t)$. Todos os conceitos estão demonstrados graficamente na Figura 7.

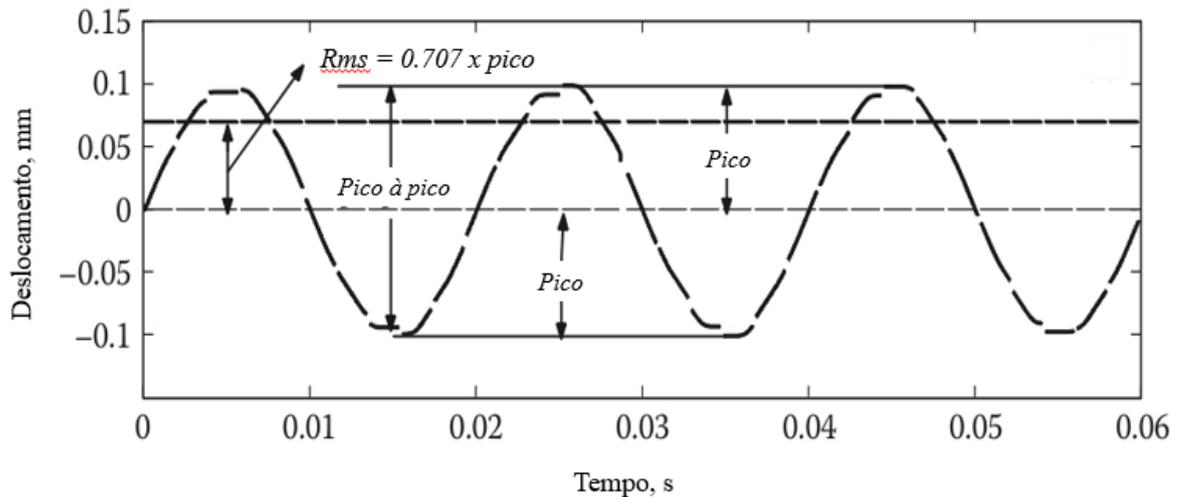


Figura 7: valores de amplitude de pico-a-pico, 0 a pico e RMS, adaptado de [29]

Para um sinal de forma senoidal, o valor de RMS será sempre 0,707 (ou $1/\sqrt{2}$) do valor de pico. Para sinais de forma mais aleatória, o valor de RMS deverá ser calculado de maneira numérica.

Outros dois parâmetros importantes são o fator de Crest (CF) e o fator de Kurtosis. O fator de Crest é definido como a razão entre o valor de pico e o valor de RMS, como mostra a equação

$$CF = \frac{y_{pico}}{y_{rms}} \quad (14)$$

Já o fator de Kurtosis é definido em estatística como o momento normalizado de quarta ordem do sinal no domínio do tempo. A definição do momento de k-ésima ordem de um sinal no domínio do tempo é dada por

$$M_k = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p (y_i - \bar{y})^k \quad (15)$$

Onde $y_i = y(t_i)$ e \bar{y} é o valor médio do conjunto de dados. Com isso, o momento normalizado de quarta ordem (fator de Kurtosis) é fornecido por

$$ku = \frac{M_4}{(M_2)^2} \quad (16)$$

Um comparativo entre os valores dos parâmetros previamente mostrados é dado na tabela, que compara os valores obtidos para cada um dos três tipos de sinais mostrados na Figura 8: senoidal, aleatório e pulsativo (transiente).

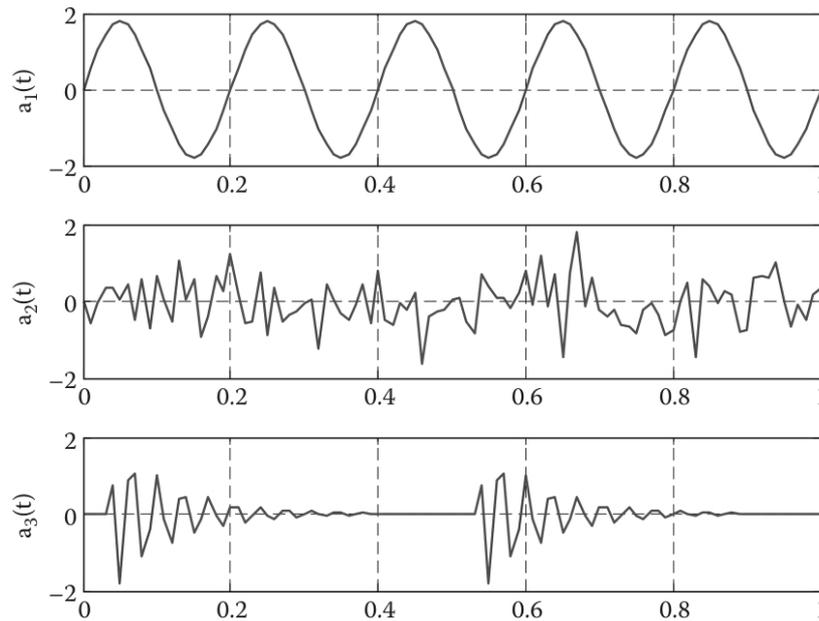


Figura 8: sinais senoidal, aleatório e transiente [29]

Pela tabela 1 vê-se que, enquanto o valor de pico se mantém inalterado, os valores de Crest e, principalmente, de Kurtosis apresentam um aumento considerável para as duas últimas formas de sinal, ao mesmo tempo que o valor de RMS diminui. Isso demonstra que o fator de Kurtosis é um eficiente parâmetro para detectar sinais de natureza impulsiva.

Sinal	Pico	RMS	CF	Ku
Senoidal	1,80	1,2728	1,4142	1,515
Aleatório	1,80	0,6180	2,9469	3,2563
Transiente	1,80	0,4400	4,0905	8,4486

Tabela 1: Comparativo entre os parâmetros dos três tipos de sinais [29]

2.2.5.1. Sinais no domínio da frequência

Como dito anteriormente, a maioria dos transdutores capta os sinais no domínio do tempo. Logo, para se alterar o domínio de um sinal para o domínio da frequência, deve-se utilizar uma série de Fourier que, segundo Rao (2008), tem como coeficientes

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} y(t) dt, \quad a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} y(t) \cos \frac{2\pi k}{T} t dt \quad \text{e} \quad b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} y(t) \sin \frac{2\pi k}{T} t dt \quad (17)$$

E é dada por

$$y(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos \frac{2\pi k}{T} t + \phi_k \quad (18)$$

Onde $1/T$ é a frequência fundamental do sinal, que também é representada por f ,

$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ é a amplitude e $\phi_k = \arctg \frac{b_k}{a_k}$ é o ângulo de fase a uma frequência de $kf = \frac{k}{T} = f_k$. Com isso, a série que representa um sinal no domínio do tempo $y(t)$ no domínio da frequência é, segundo Kumar Sinha (2015), dada por

$$Y \frac{k}{T} = Y(kf) = A_k e^{i\phi_k} \quad (19)$$

Onde $Y(kf) = Y(f_k)$ é um valor complexo que representa a amplitude e a fase a uma frequência f_k e $i = \sqrt{-1}$.

O gráfico de amplitude x frequência é chamado de espectro de frequências e tem a forma mostrada na Figura 9.

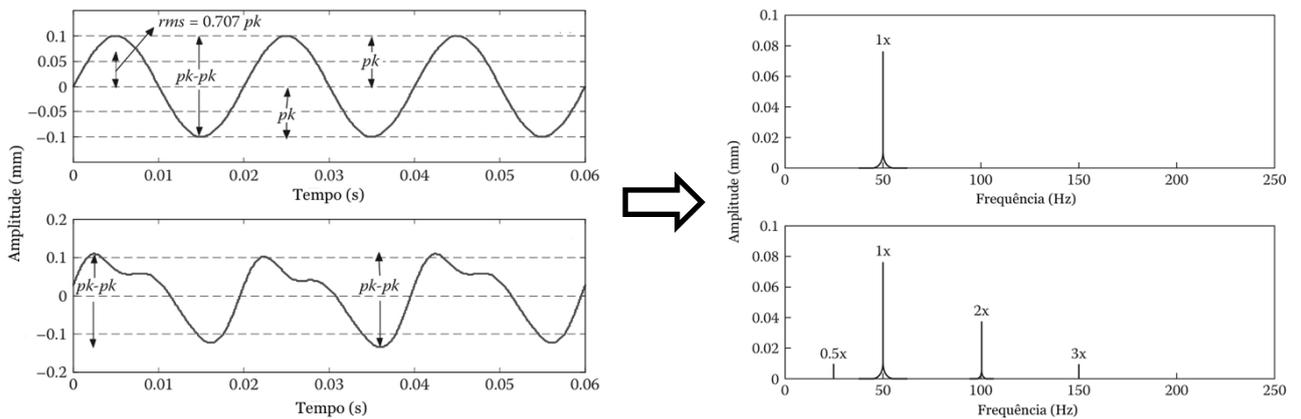


Figura 9: Transformação de um sinal no domínio do tempo em sinal no domínio da frequência [29]

2.2.5.2. Transformada rápida de Fourier (FFT)

Em análises computacionais de dados reais, muitas vezes é difícil ou até impossível de definir uma expressão para $y(t)$ e, conseqüentemente, a frequência fundamental do sinal. Por isso, são feitas as seguintes considerações:

- Período T definido artificialmente
- $df = 1/T$
- Frequência máxima igual à frequência de Nyquist $f_q = f_s/2$, onde f_s é a taxa de aquisição de sinal do sistema de medição

Com isso, a fórmula utilizada em métodos computacionais para a transformada de Fourier, segundo Kumar Sinha (2015), é dada por

$$Y(kdf) = \frac{2}{N} \sum_{p=1}^N y(t_p) e^{-i \frac{2\pi(p-1)k}{N}} \quad (20)$$

Onde $Y(kdf) = Y(f_k)$ é a transformada de Fourier à frequência $f_k = kdf$ do sinal no domínio do tempo $y(t)$, $y(t_p) = y_p$ é a amplitude do sinal $y(t)$ usado na transformada

e as variáveis $k = 1, 2, \dots, (N/2 - 1)$ e $p = 1, 2, \dots, N$. A frequência $df = 1/T$ é determinada a partir do período T arbitrado para a transformada de Fourier, que é definido como $T = Ndt$, onde dt é o tempo entre dois sinais consecutivos.

O número de pontos de dados N deve ser um valor igual a 2^r , onde r é um número inteiro positivo. A escolha desse valor vai de acordo com a opção do usuário e da capacidade do equipamento utilizado, onde valores mais elevados de N apresentam melhor definição e precisão das informações, enquanto valores mais baixos geram arquivos mais leves, com processamento mais rápido. Em geral utilizam-se valores de N a partir de $2^{10} = 1024$ pontos de dados.

Esse método de cálculo é denominado Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transformation, FFT) e é o método mais utilizado em análises vibracionais, pois permite a transformação do sinal no domínio do tempo que sai dos transdutores em um espectro de frequências, o que permite a análise das diferentes frequências presentes em um sinal e seu impacto na amplitude de vibração.

2.2.5.3. Método de envelope

Falhas de rolamentos são muito importantes de serem identificadas, pois podem gerar danos elevados aos equipamentos em indústrias. No entanto, pela quantidade de diferentes frequências e intensidades de oscilações presentes nos diversos equipamentos presentes em um conjunto, muitas vezes é difícil detectar e analisar o rolamento especificamente e detectar a presença de falhas. Para isso é muito utilizada a técnica de envelope. O primeiro passo é executar uma filtragem de passa banda, onde somente serão mantidos os sinais de frequências próximas à frequência natural de oscilação do rolamento, excluindo os sinais oriundos de motores, máquinas, eixos etc. O sinal natural do rolamento é um sinal de frequência de alta energia, enquanto os sinais relacionados a falhas são de frequência de baixas energias. O sinal de maior frequência é denominado sinal portador, ou sinal modulador, pois ele irá modular os sinais de baixa frequência, como mostra a Figura 10, onde f_v e f_i são respectivamente, a frequência natural do rolamento e a frequência relacionada a falha na pista.

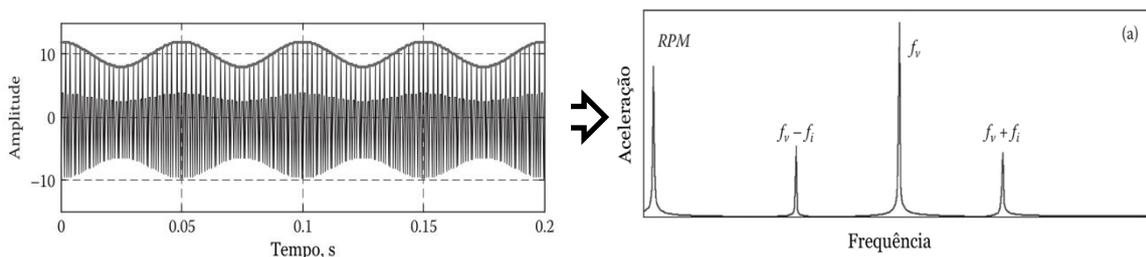


Figura 10: sinal portador antes da utilização da técnica de envelope [29]

A técnica de envelope consiste na remoção do sinal portador, mantendo somente o sinal modulado, possibilitando a análise separada das frequências relacionadas a falha especificamente, como ilustra a Figura 11.

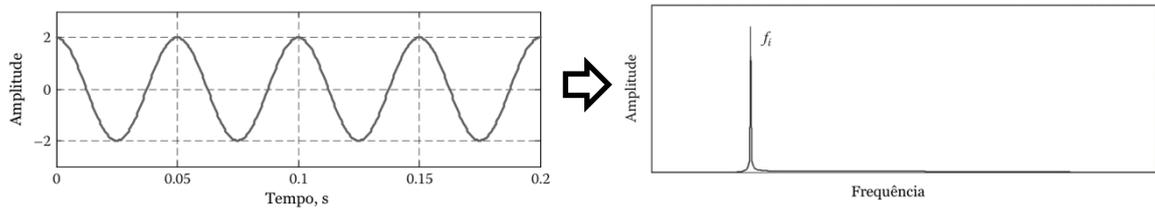


Figura 11: sinal modulado isolado [29]

2.3. Análise de Vibrações aplicada na manutenção preditiva

A análise de vibrações é o método de ensaio não destrutivo mais rentável para avaliação de máquinas rotativas. O estudo consiste basicamente em acompanhar o nível de oscilação de pontos de um determinado equipamento segundo parâmetros como deslocamento, velocidade e aceleração, e assim delimitar as condições ideais para o funcionamento do maquinário. Por meio desse acompanhamento é possível então perceber, através de alterações do comportamento vibracional da máquina, sinais característicos de falhas, fornecendo previsões de quebra de componentes e garantindo de operação normal até a próxima parada de manutenção programada.

Por meio desse acompanhamento é possível evitar diversos tipos de falhas, como rolamentos deteriorados, engrenagens defeituosas, deficiência em lubrificação etc. Para implementar com êxito um esquema de manutenção em um equipamento através de análise de vibrações, é necessário levar em consideração alguns pontos:

- Dados construtivos e operacionais do equipamento;
- Histórico de manutenção do equipamento;
- Escolha dos pontos de medição;
- Escolha da aparelhagem de medição e registro das vibrações
- Grandezas a serem medidas
- Níveis de alarme de cada ponto de medição
- Periodicidade da medição
- Programação dos pontos de coleta
- Informação e relatórios periódicos

3. Metodologia

3.1. Equipamento de medição

3.1.1. Sensores

Como dito anteriormente, os três parâmetros analisados são deslocamento, velocidade e aceleração dos pontos sob estudo. Para a coleta dessas informações, é utilizado uma série de sensores instalados em pontos-chaves do equipamento. Com o passar do tempo, a tecnologia disponível para essa análise foi sendo cada vez mais aprimorada, rendendo diversos tipos de sensores diferentes. A escolha correta do tipo de detector depende da frequência de estudo do nível de sinal envolvido na atividade. Abaixo, são listados os tipos de detectores disponíveis no mercado.

- **Sensor de deslocamento:** São usados para medir o deslocamento relativo de pontos a baixa frequência e pequenas amplitudes. Se devidamente instalado, este sensor é bastante confiável e útil como referência para testes e balanceamento dinâmico. Os modelos mais antigos possuíam limitações, como a dificuldade de instalação e limitação de medições para sistemas de alta frequência, porém nos mais modernos são capazes de trabalhar com taxas de aquisição elevadas.
- **Sensor de velocidade:** Mais utilizados para medir sistemas de baixa à média frequência. Esses sensores utilizam um conjunto eletromagnético para gerar uma resposta proporcional à velocidade da oscilação. De utilização mais simples em comparação aos outros sensores, esse componente é bastante útil para a análise vibracional de máquinas rotativas, entretanto o tamanho e a precisão acabam o inutilizando em frequências muito baixas ou muito altas.
- **Acelerômetros:** Operar normalmente em intervalos muito grandes de frequências, a grande variedade de desenhos e aplicações possíveis tornam esse tipo de sensor o mais utilizados nos acompanhamentos oscilatórios de equipamentos em geral. Suas desvantagens, entretanto, consiste na sua sensibilidade na configuração de montagem e limitação de temperatura de trabalho.

3.1.2. Analisadores de frequência de vibrações

Esse equipamento é utilizado para filtrar, dentro de todas as frequências coletadas pelos sensores, aquelas que podem indicar alguma falha. Disponível desde os anos 50, esse instrumento pode ser dividido em medidores de vibração global e Analisadores de frequência por transformada rápida de Fourier (FFT).

O primeiro aparato focaliza as frequências de interesse em uma faixa de frequência gerada pelo equipamento em análise, sendo capazes de medir o valor global das vibrações do equipamento em estudo. Por mais que tenha boa capacidade de detecção de mau funcionamento, os medidores de vibração global não possuem competência para diagnose e localização das falhas. Para isso, é necessário a utilização dos analisadores de frequência FFT.

Como o nome já diz, esses equipamentos fazem o tratamento da vibração global do maquinário analisado, e através de expressões matemáticas (Transformada Rápida de Fourier), separam as frequências advindas de cada componente, permitindo a identificação e tratativa específica da falha.

3.2. Problemas mais comuns em máquinas

3.2.1. Desbalanceamento

Esse tipo de falha ocorre quando a massa ao redor da linha de rotação de um eixo está distribuída desigualmente, o que acaba gerando cargas nos mancais. Conforme Filho (2013), as principais fontes de desbalanceamento são a má execução do balanceamento inicial, perda de massa do rotor, depósito de materiais, enpenos temporários ou permanentes e excentricidade entre componentes acoplados. Esse estado também pode ser obtido por alguns parâmetros operacionais, como a carga e temperatura de trabalho.

De acordo com Schenk Rotec GMBH (2017), há três tipos de desbalanceamentos:

- Estático: Ocorre quando o eixo de inércia principal de um rotor está deslocado para fora do seu eixo geométrico, oscilando em paralelo em relação ao seu próprio eixo de rotação, como mostrado na Figura 12. Ao atingir o repouso, rotores estaticamente desbalanceados irão fazer movimentos pendulares devido à distribuição irregular de massa. Para corrigir, é necessário a remoção ou adição de massa ao rotor em estudo.

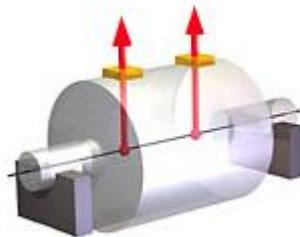


Figura 12: Eixo com desbalanceamento estático.[16]

- Acoplado: O centro de gravidade não está deslocado em relação ao eixo de rotação, porém o eixo de inércia encontra-se inclinado, esquematizado na Figura 13. Isso ocorre devido à ação de dois desbalanceamentos com o mesmo valor deslocados angularmente em 180° , gerando um momento decorrente do binário de forças. Para correção é necessário criar um momento reverso, por meio de duas massas de correção.

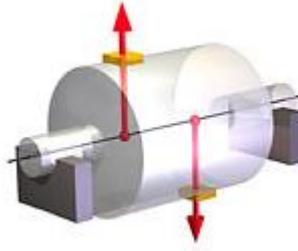


Figura 13: Eixo com desbalanceamento acoplado[16]

- Dinâmico: Ocorre quando a soma dos desbalanceamentos gera duas resultantes em dois planos arbitrários, geralmente com valores diferentes e posições angulares, fazendo com que o eixo principal de inércia se desencontre do eixo de rotação. Para correção, é necessário obrigatoriamente dois planos de correção. Esse tipo de desbalanceamento está mostrado na Figura 14.

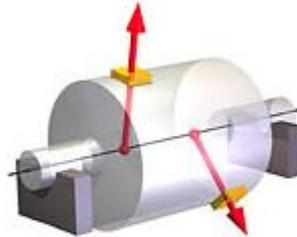


Figura 14: Eixo com desbalanceamento dinâmico[16]

Considerado o problema mais fácil de se reconhecer, quando não associado a outros fatores, se mostra como uma amplitude no espectro na casa de 1 x RPM do dispositivo desbalanceado, porém apresentando valores maiores em direções radiais. Abaixo, na Figura 15, pode-se observar um exemplo de espectrometria desta falha.

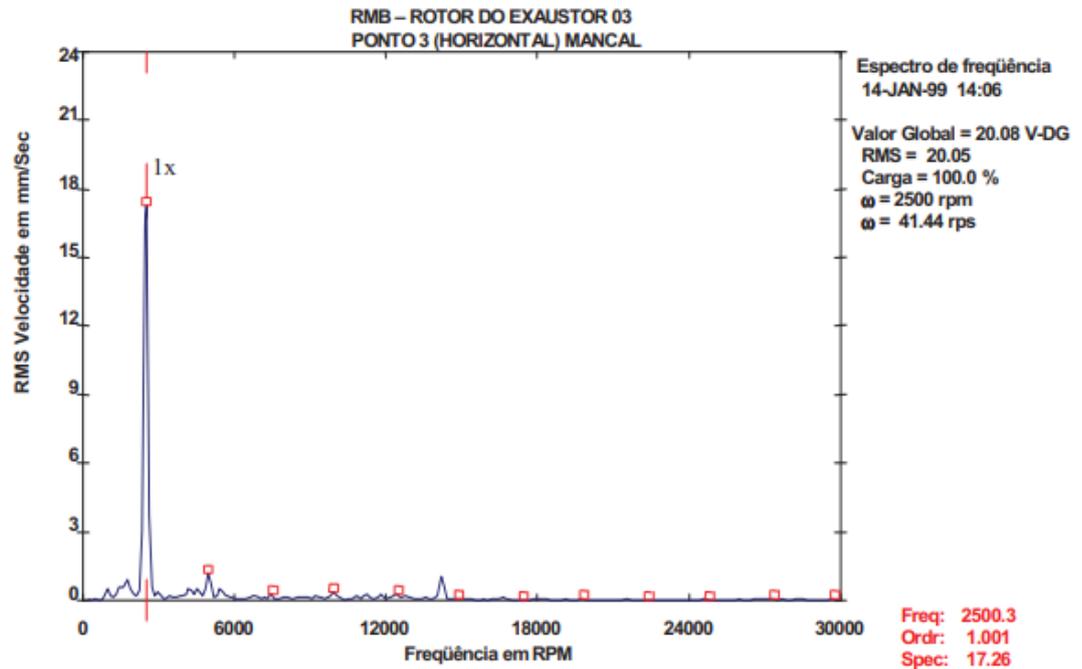


Figura 15: Espectrometria de rotor desbalanceado.[18]

Segundo Spamer (2009), outra característica importante das vibrações decorrentes de desbalanceamento é que a amplitude é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade do rotor, então quando temos uma variação de rotação do mesmo tendendo à parada, a curva da amplitude de vibração deverá ser do tipo exponencial inversa.

3.2.2. Desalinhamento

De acordo com Galli (2017), desalinhamento é definido como a não coincidência de eixos de simetria de dois eixos colineares. O desalinhamento de máquinas diretamente acopladas é o maior causador de vibrações em máquinas em geral. Pode ocorrer devido à diversos fatores como deterioração de ancoragem, dilatação térmica de componentes má calculada e assentamento de fundação.

Pode-se citar 3 tipos de desalinhamento, mostrados na Figura 16:

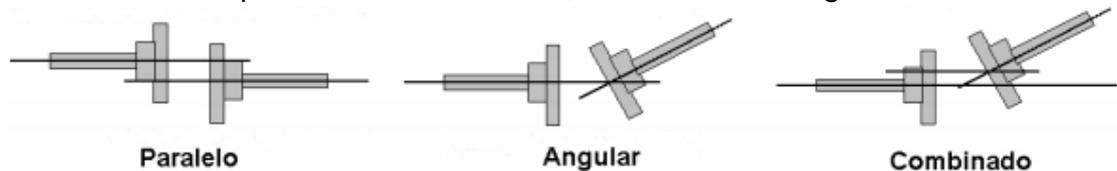


Figura 16: Tipos de desalinhamento de eixos[30]

- Angular: Ocorre quando as linhas de centro dos dois eixos formam um ângulo. Conforme Holanda (2016), esse desalinhamento é caracterizado por alta vibração axial, apresentando valores dominantes de 1 a 3 vezes a rotação do eixo, como mostrado na Figura 17 abaixo.

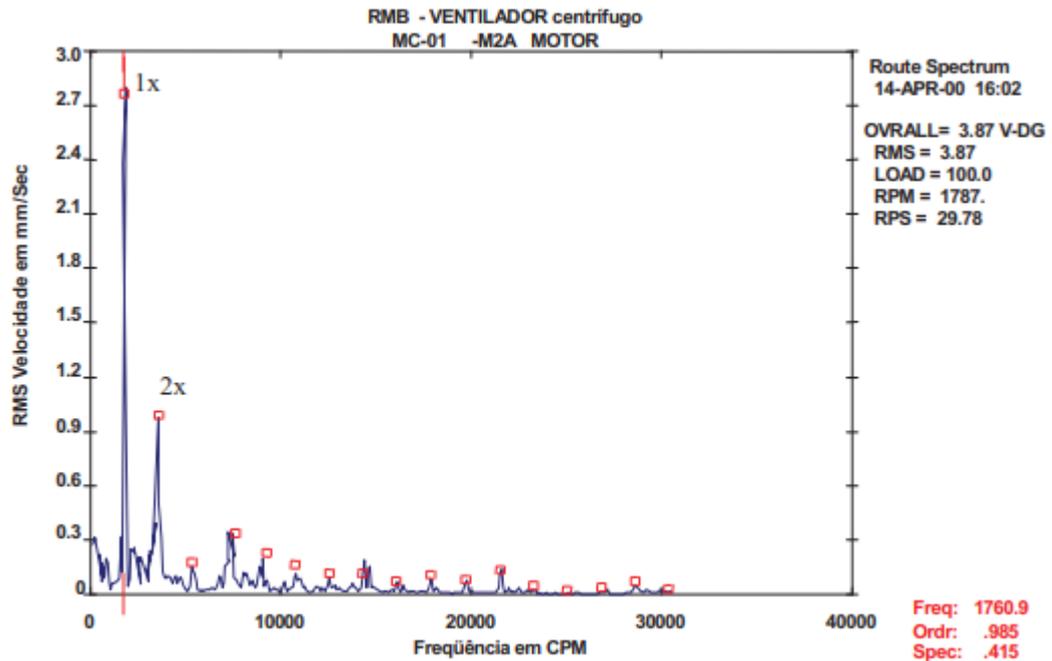


Figura 17: Espectrometria de ventilador com eixo desalinhado angularmente. [18]

- Paralelo: Ocorre quando as linhas de centro são deslocadas entre si, mantendo a paralelidade. De acordo com Spamer (2009), a vibração dominante aparecerá na direção radial com amplitude de cerca de 2 vezes a rotação do eixo, podendo ainda apresentar alta vibração na mesma frequência da rotação do eixo na direção axial. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 18.

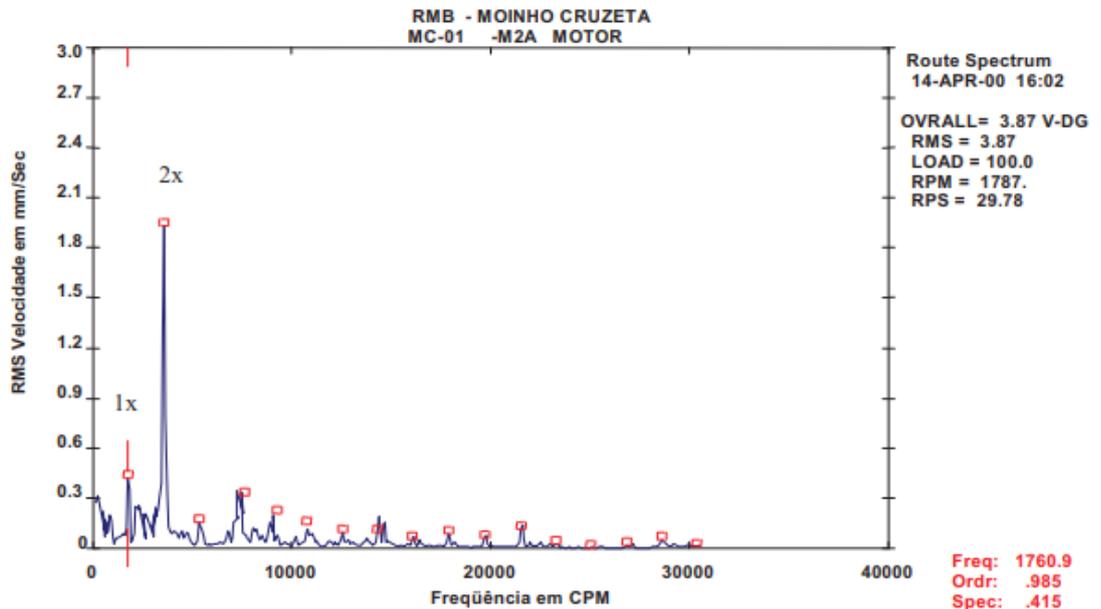


Figura 18: Espectrometria de moinho com eixo desalinhado linearmente.[18]

- Combinado: Basicamente uma junção dos dois modos de desalinhamento já apresentado. Além da vibração predominante ocorrer na direção axial com

frequência igual à rotação do eixo, ocorre uma oscilação significativa do dobro da frequência na mesma direção (Holanda, 2016).

Vale ressaltar que, como levantado por Filho (2013), as vibrações medidas com a mesma potência do rotor podem gerar dúvidas na diferenciação entre Desalinhamento e Desbalanceamento.

3.2.3. Folgas

Consiste na perda de rigidez do maquinário decorrente de quebra de soldas, parafusos soltos, rachaduras, ancoragem deteriorada ou rotores não devidamente fixados. Essas folgas impulsionam as amplitudes geradas por qualquer força de excitação, como desbalanceamento. É necessário lembrar que folgas são quesitos de projeto, e os problemas ocorrem quando elas se tornam maiores que o especificado ao longo da operação. As folgas mecânicas são categorizadas em A, B e C, de acordo com sua origem.

- Tipo A: Folga decorrente de fragilidade em componentes estruturais, como pés, base ou fundação do equipamento. Segundo Spamer (2009), as vibrações no pé da máquina são defasadas em 180°;
- Tipo B: São geradas a partir de parafusos frouxos, trincas nos pedestais ou no mancal;
- Tipo C: Resultantes de fixação inadequadas de componentes da máquina. Pode ser provocado por folga excessiva em buchas ou elementos rolantes de um mancal, rotor solto com folga em relação ao eixo, entre outros exemplos. Ainda de acordo com Spamer (2009), nas análises vibratórias, aparecerão componentes sub e inter-harmônicas, com medidas de fases instáveis, com grandes variações de um ponto ao outro.

Os tipos de folgas e suas respectivas análises no domínio de frequência podem ser observadas na Figura 19 abaixo.

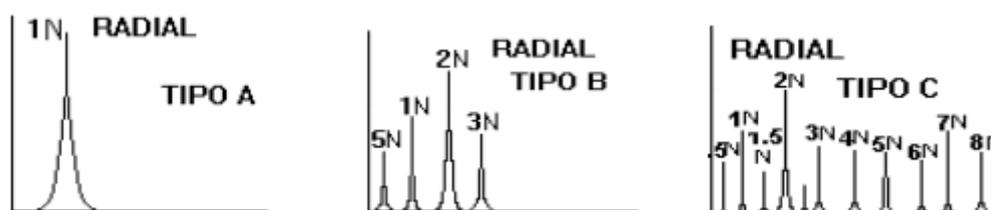


Figura 19: Análises no domínio de frequência de folgas mecânicas, por tipo.[7]

3.2.4. Excentricidade

Excentricidades presentes em engrenagens, rolamentos e polias podem resultar em forças de reação dentro do rotor. Isso faz com que a linha de centro do eixo em rotação não seja a mesma linha do centro geométrico, mesmo após o devido balanceamento.

Segundo Holanda (2016), equipamentos com níveis de excentricidades apresentam as mesmas anomalias dos casos de desbalanceamento. Para checar a condição de excentricidade, é necessário medir a vibração do motor com carga e

observar o comportamento da amplitude de vibração após cessar a alimentação elétrica. Se a amplitude diminuir gradualmente em conjunto com a velocidade do motor, o problema é mecânico, podendo corresponder a desbalanceamento. Porém se a amplitude de vibração diminuir bruscamente após o corte de energia, o problema possivelmente está correlacionado à excentricidade (Spamer, 2009).

3.2.5. Ressonância

Ocorre quando a frequência de trabalho do equipamento coincide com a frequência natural de um dos seus componentes. Para a verificação do problema é recomendado alguns passos, como a mudança da força de excitação, que em circunstância de ressonância geraria grande impactos na variação de amplitude. Outra recomendação é a alteração temporária da massa ou rigidez do componente suspeito, que teria o mesmo impacto na amplitude.

De acordo com Spamer (2009), as análises de espectro desse tipo de anomalia geram grandes picos de vibração em direções radiais, como ilustrado na Figura 20.

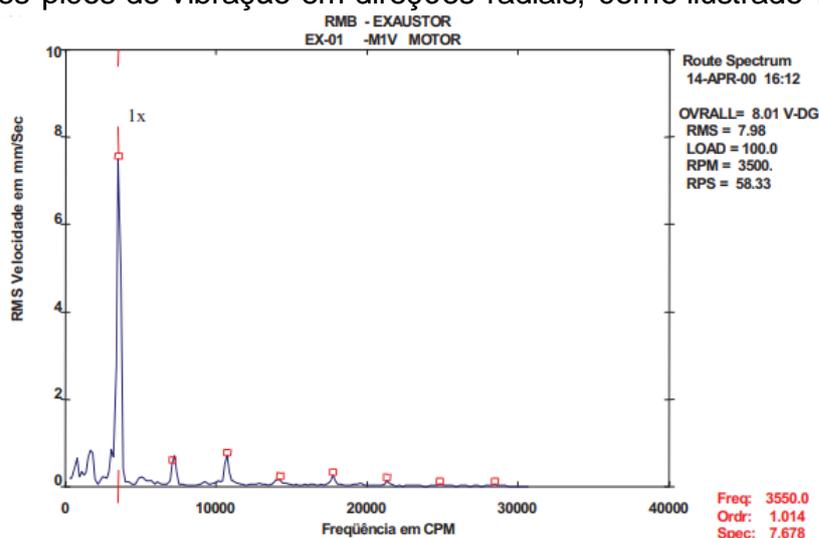


Figura 20: Espectrometria de exaustor em ressonância.[18]

3.2.6. Rolamentos

A análise vibracional pode ser utilizada para detectar irregularidades nos rolamentos durante a operação do equipamento. Considerando que um rolamento novo quase não apresenta vibrações, os desgastes que vão surgindo durante a jornada de trabalho do componente vão gerando frequências características para cada elemento interno da peça. Com o devido estudo dessas oscilações, pode-se identificar diversos defeitos, como sobrecarga, fadiga do material, lubrificação inadequada, descargas elétricas fluindo através do mancal etc.

Primeiramente, é necessário se familiarizar com os elementos internos de um rolamento, demonstrado na Figura 21.

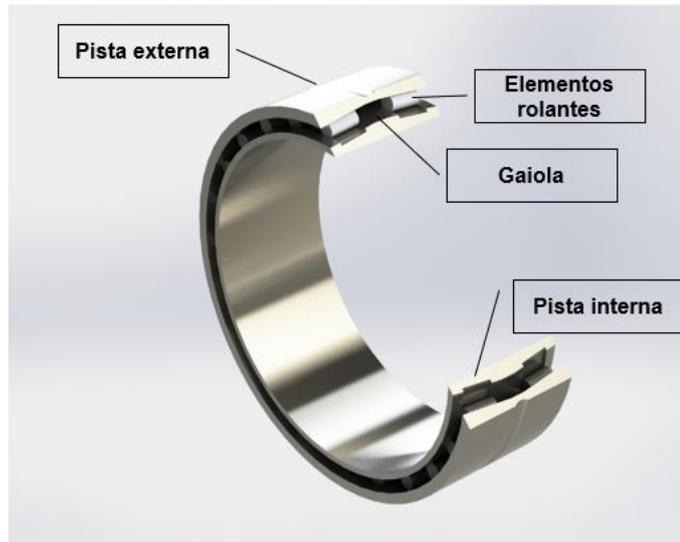


Figura 21: Componentes internos de um rolamento

Cada componente possui defeitos específicos que podem gerar frequências fundamentais relacionadas ao comportamento dinâmico do mesmo. Essas frequências são:

- BPF - Ball Pass Frequency InnerRace (Frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da Pista Interna): Associada a defeitos na pista interna.
- BPFO - Ball Pass Frequency OuterRace (Frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da Pista Externa): Frequência associada a defeitos na pista externa.
- BSF - Ball Spin Frequency (Frequência de giro dos elementos rolantes): Esta frequência está associada a defeitos nos elementos rolantes, sejam rolos ou esfera.
- FTF - Fundamental Train Frequency (Frequência de giro da gaiola ou do conjunto (trem) de elementos rolantes): Associada a defeitos na gaiola e a defeitos em alguns dos elementos rolantes.

Spamer (2009), diz que, segundo Boneli (2002), essas frequências características podem ser modeladas de acordo com as seguintes fórmulas:

$$f_{BPFO} = \frac{n}{2} f_1 \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (21)$$

$$f_{BPFI} = \frac{n}{2} f_1 \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (22)$$

$$f_{BSF} = \frac{PD}{BD} f_1 \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (23)$$

$$f_{BPF} = \frac{f_1}{2} \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (24)$$

Onde

F₁: frequência de rotação do eixo (Hz)

BD: Diâmetro do elemento rolante (mm)

PD: Diâmetro primitivo do rolamento (mm)

N: Número de elementos rolantes

β : ângulo de contato do rolamento

Os defeitos desenvolvidos em rolamentos costumam evoluir lentamente, possibilitando a percepção dos parâmetros de falha, principalmente pela técnica de Envelope. De acordo com Spamer (2009), esses sinais, regularmente, possuem frequências iguais a várias vezes a velocidade angular do eixo em estudo, mas nunca apresentando um múltiplo inteiro. Quando um elemento rolante apresenta defeito, o mesmo entra em contato tanto com a pista interna quanto externa, gerando uma frequência igual ao dobro da frequência de giro do elemento em si. Já quando o defeito é localizado na gaiola, as vibrações geradas são de valores de frequência bem mais baixo. Em ambos os casos, a amplitude das vibrações depende da extensão da falha.

O processo de degradação do rolamento pode ser dividido em 4 estágios, caracterizados abaixo e na imagem 22:

- Estágio 1: As primeiras leituras de problemas são noticiadas em frequências ultrassônicas, na faixa de 20 a 60 KHz, mostrada como zona D da figura, e são avaliadas por meio do método de Envelope. Conforme apontado por Holanda (2016), nesse estágio os rolamentos apresentam uma vida útil de 10 a 20%.
- Estágio 2: Inicia-se o surgimento de pequenos defeitos, gerando impactos internos no rolamento, que conseqüentemente criam frequências naturais na casa de 500 a 2.000 Hz. Essas leituras são acompanhadas de picos de amplitudes inferiores aos outros picos, conhecido como bandas laterais. Holanda (2016) aponta que nesse estágio a vida útil é reduzida ao range de 5 a 10%.
- Estágio 3: Começam a surgir nas análises de espectro as frequências naturais dos defeitos presentes nas pistas interna e externa. Nessa parte, os desgastes já são visíveis, e as leituras de bandas laterais tendem a crescer juntamente com o desgaste da peça. Segundo Spamer (2009), é a época mais indicada para substituição do rolamento, o que é corroborado por Holanda (2016) que alega que a vida útil máxima nesse estágio é de 5%.
- Estágio 4: Colapso iminente do rolamento. Há um aumento na amplitude da frequência igual a 1 vez o rolamento do eixo, causando ainda mais aumento nas bandas laterais. Nessa etapa, as frequências naturais tendem a ser substituídas por faixas amplas de vibrações aleatórias, que pode gerar um nível de ruído. Holanda (2016) ressalta que por mais que as amplitudes do ruído

venha a decrescer, elas apresentarão crescimento excessivo imediatamente antes da quebra. O rolamento tem uma vida útil de, no máximo, 1%.

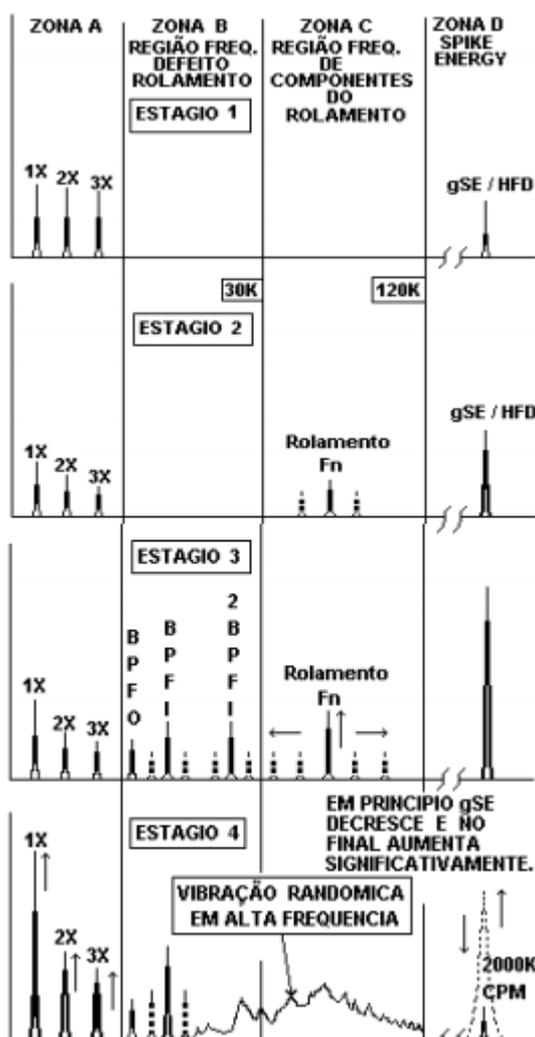


Figura 22: Características de cada estágio de falha de um rolamento. [7]

3.2.7. Engrenagens

As engrenagens são elementos mecânicos que transmitem movimento e força entre dois eixos, e devido a isso, estão sujeitas a cargas dinâmicas que podem gerar vibrações. O estudo dessas vibrações formadas pode dar uma boa noção do atual estado das engrenagens, vindo a detectar previamente defeitos como desbalanceamento das partes móveis, erro de transmissão, desalinhamento, desgaste excessivo nos dentes, variação de torque e turbulência no filme de óleo.

Conforme Holanda (2016) apontou, citando (ALMEIDA, 2003, p.171), os conjuntos de engrenagens possuem uma frequência considerada normal durante a operação. Essas frequências correspondem a $1n_2$ da coroa, $1n_1$ do pinhão e a frequência de engrenamento. Já os picos referentes à frequência natural do projeto, à variação das frequências $1n_1$ e $1n_2$ e à frequência lateral em relação à frequência de engrenamento são indicadores dos defeitos que resultarão em falhas. Esses padrões podem ser observados graficamente na Figura 23.

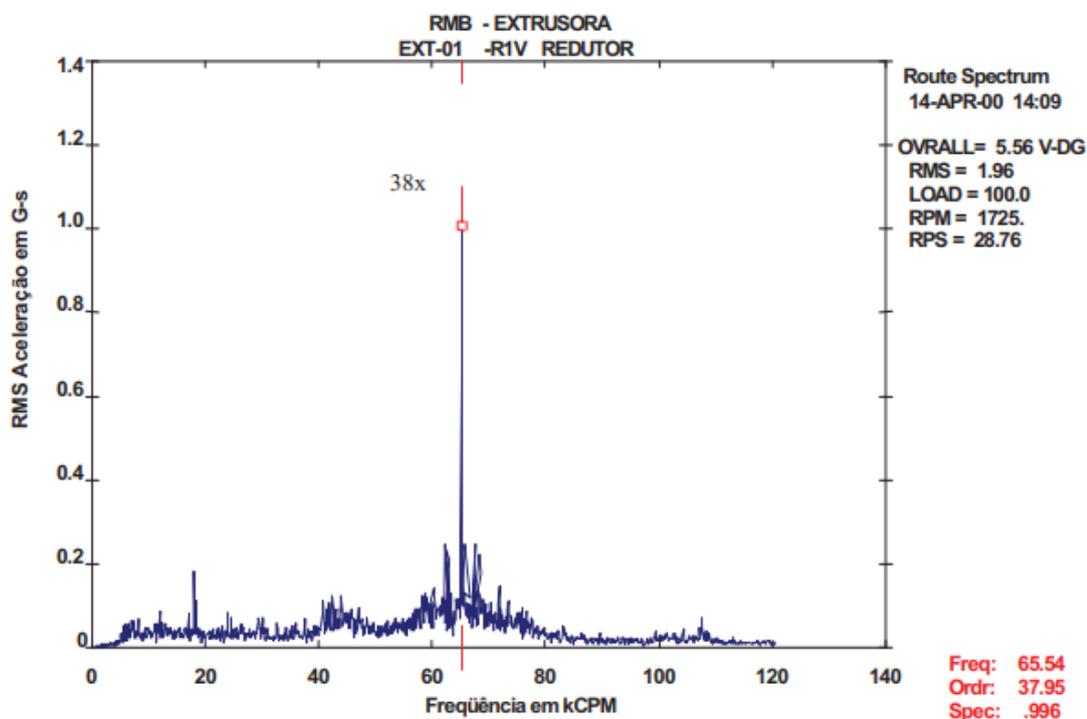


Figura 23: Espectrometria de engrenagens de uma extrusora.[18]

3.3. Descrição do Equipamento

O triturador, mostrado na Figura 24, é um equipamento de alta escala de produção, com grandes volumes de sucata disposta para entrada e saída do processo. As impurezas que estão agregadas à sucata na entrada do processo, como terra, plásticos, borracha e madeira, são removidas durante o processamento, gerando uma grande pilha de um material muito fino que facilmente pode impactar no meio ambiente se o projeto não for devidamente concebido com o foco de proteção ambiental. Atualmente sistemas de sucção como exaustores, dutos e câmaras de armazenamento atendem à contenção deste rejeito em relação à proteção ambiental.



Figura 24: Foto aérea de um Triturador operacional

A seguir, irão ser detalhadas as principais estruturas do triturador, sob o ponto de vista operacional.

3.3.1. Alimentador de Sapatas ou APRON

Sua função é, após ser abastecido por meio de um guindaste especial, elevar a sucata e abastecer a calha de alimentação do moinho.

Em termos simples, um alimentador de sapata é um tipo mecânico de alimentador usado em operações de manuseio de material para alimentar material para outro equipamento ou extrair material de estoques ou caixas a uma taxa controlada de velocidade. Esses alimentadores podem ser usados em uma variedade de aplicações em operações primárias, secundárias e terciárias (recuperação).

Alimentadores de sapatas são usados por vários motivos, mas há alguns que são comumente vistos em todo o setor. Aprons fornecem melhor controle de alimentação para evitar que o material alimentado no equipamento o sufoque. Eles têm a capacidade de absorver o choque do carregamento de material diretamente no alimentador com um leito raso (o impacto sobre o alimentador quando o material é despejado é grande).

Por último, os alimentadores de sapatas podem recuperar uma variedade de materiais secos ou úmidos de vários tamanhos a uma taxa uniforme. Essa flexibilidade pode ser aproveitada em muitas aplicações. Um alimentador de sapata do estilo de corrente de trator refere-se à corrente dos rolos e rodas traseiras que também são usados em tratores e escavadeiras. Este estilo de alimentador domina o mercado em indústrias onde os usuários requerem um apron que possa extrair materiais de características variadas. As vedações de poliuretano na corrente evitam que materiais abrasivos entrem no pino e na bucha, o que reduz o desgaste e prolonga a vida útil do equipamento em comparação com corrente seca. Alimentadores de sapata em estilo de corrente de trator também geram menos poluição sonora para operação mais silenciosa. Os elos da corrente são tratados termicamente, o que resulta em uma maior vida útil. No geral, os benefícios incluem maior confiabilidade, menos manutenção e melhor controle de alimentação. Em consequência, esses benefícios levam a mais produtividade devido aos gargalos mínimos em qualquer circuito de processamento mineral. Abaixo, na Figura 25, pode-se observar um detalhamento nos componentes de um alimentador de sapatas.



Figura 25: Principais componentes do alimentador de sapata.[5]

3.3.2. Rolos Compactadores

Localizados próximo a boca do moinho, tem por finalidade comprimir e lançar a sucata para o interior do moinho. Devido a capacidade de prensagem, esse item permite reduzir o volume dos componentes a serem triturados, aumentando a sua resistência à abrasão ou corte e, simultaneamente, controlando a alimentação no moinho. Estes rolos motorizados são instalados em uma estrutura movimentada através de cilindros hidráulicos e comandados pelo operador na cabine e podem ser vistos na Figura 26.



Figura 26: Rolo compactador

3.3.3. Moinho

O moinho consiste em um rotor girante, acionado por um motor elétrico de alta potência, e apoiado em mancais de rolamento com quatro fileiras de martelo, sendo duas compostas por dois martelos e duas por sete e é demonstrado na Figura 27.

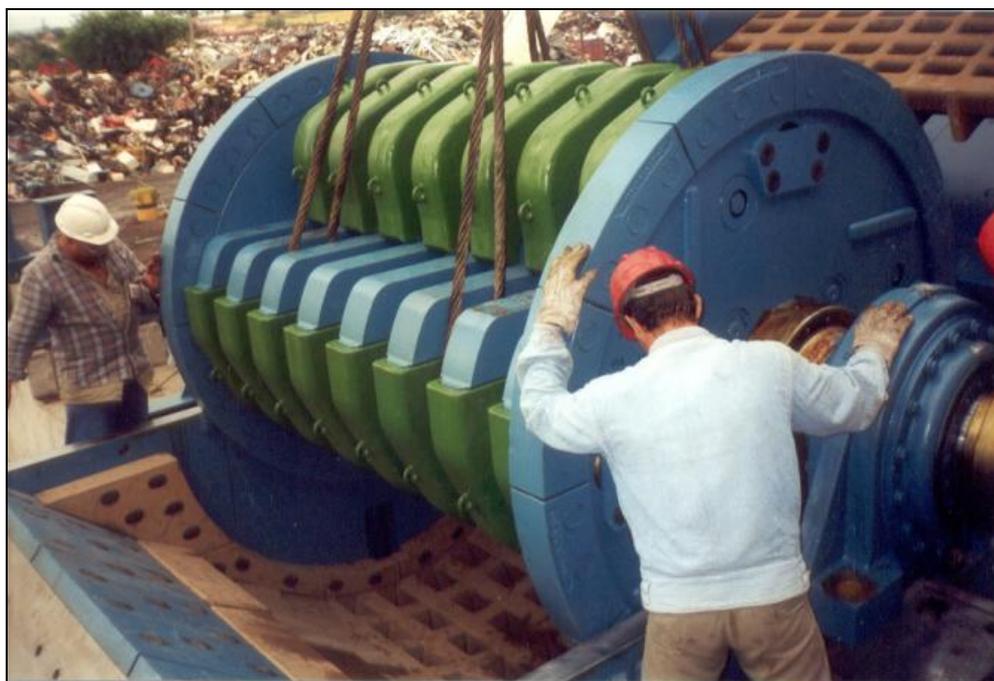


Figura 27: Rotor

Os martelos, feitos de liga de manganês, giram em alta velocidade periférica, triturando o material contra a bigorna e contra as grelhas. Estas, montadas em contato uma com as outras possuem aberturas com tamanhos específicos, permitindo que o material triturado saia somente quando estiver abaixo desta dimensão. O sistema também conta com uma porta de rejeito para eliminação de materiais que não podem ser triturados e que acabariam danificando o triturador. Abaixo, um esquema do conjunto na Figura 28.

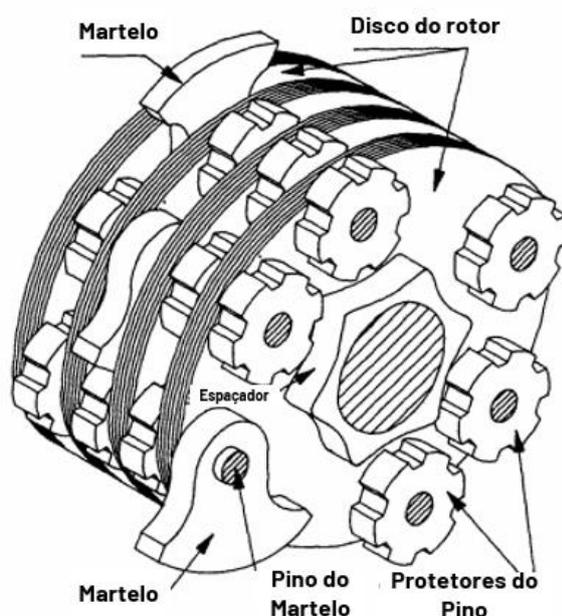


Figura 28: Esquema do conjunto Rotor + Martelos. Adaptado de [19]

Com a utilização do equipamento, os martelos tendem a sofrer desgastes, já que seu emprego envolve choque direto com o material a ser processado. Devido a este fenômeno, é necessário a troca dos mesmos em períodos determinados. Nas Figuras 29 e 30, podemos observar o efeito de desgastes em martelos.



Figura 29: Martelo Novo



Figura 30: Martelo Usado

O conjunto rolo compactador + rotor + martelos é chamado de triturador Housing, e são basicamente o núcleo de operação do triturador de sucatas industrial, esse conjunto é ilustrado na Figura 31.

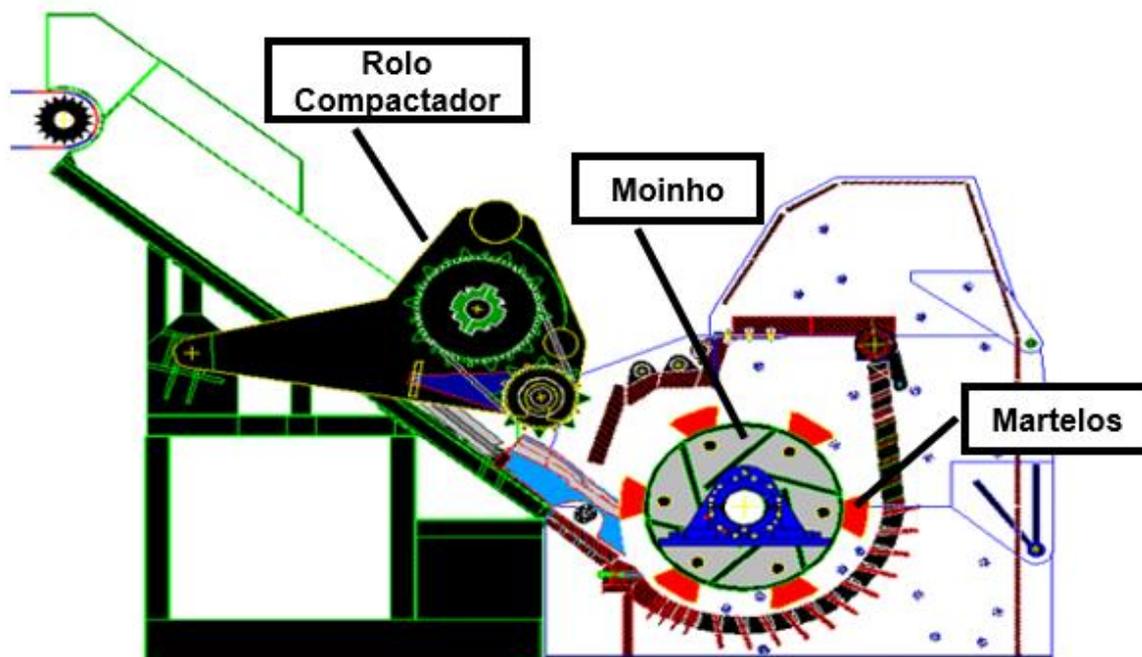


Figura 31: Esquematização do Triturador Housing

Para proteção das peças de desgaste, assim como seus elementos de fixação, são colocados elementos metálicos que atuam como proteções mecânicas. Essas peças são conhecidas como caps (para os martelos) e end caps (para os discos do motor). Ambas as peças estão exemplificadas tanto na Figura 32, quanto na Figura 33.



Figura 32: End Cap

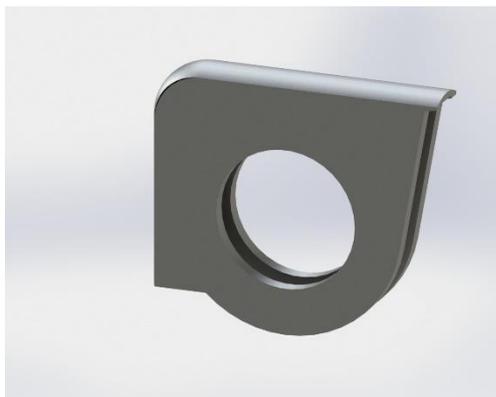


Figura 33: Cap

O moinho do triturador em estudo é acionado por um motor Toshiba de potência nominal de 6000 HP, que funciona com uma rotação nominal de 450 rpm, mostrado na Figura 34 e suas especificações técnicas na Figura 35.



Figura 34: Motor TOSHIBA abrigado

TOSHIBA MOTOR DE INDUÇÃO			
FASE	3	TIPO	MIMT FORMA PCKV
POLOS	16	POTÊNCIA	6000HP ROTAÇÃO 445 rpm
TENSÃO	6600 V	CORRENTE	490 A FREQUÊNCIA 60 Hz
TENSÃO SEC.	2425 V	CORRENTE SEC.	1080 A ISOLAÇÃO F
FATOR DE SERVIÇO	1.0	AMBIENTE	40 °C ΔT 80 °C
REGIME	CONTINUO	lp/ln	* ALTITUDE m
CATEGORIA	NORMA ABNT NBR 7094/1981		
OF. E.	97086RM001	SÉRIE	A11762 DATA ** 09/1998
TOSHIBA DO BRASIL S.A.			
SÃO PAULO-BRASIL			
C. G. C. 61407052-0001/71			

Figura 35: Especificações técnicas do motor TOSHIBA [31]

3.3.4. Despoeiramento

Mostrado na Figura 36, é um sistema que visa a captação de partícula do sólido gerado pelo trabalho de trituração no moinho. O ar e o pó são captados no topo do moinho e passam pela primeira filtragem em um ciclone. Depois, passam pela filtragem final em um lavador de gases, sendo em seguida descarregados na atmosfera pela chaminé. Os rejeitos sólidos são descarregados por meio da válvula rotativa acoplada ao ciclone e transportadores.



Figura 36: Sistema de despoeiramento

A lama sai do lavador, é descarregada em um dispositivo arrastador, e este a descarrega em um tanque de concreto que é esvaziado periodicamente.

3.3.5. Alimentador Vibratório

Sua finalidade é transferir o material triturado para o transportador de correia, que por sua vez, o descarrega no sistema de limpeza da cascata. A limpeza consiste em eliminar, por sucção, parte do particulado sólido não metálico.

3.3.6. Sistema de Separação Magnética

Esse sistema visa a separação de material não magnético como alumínio e cobre. É composto, basicamente, de tambores eletromagnéticos, que são mostrados na figura 37, dois transportadores vibratórios e um conjunto de transformadores de correia que encaminham o material não magnético a uma pilha para uma futura remoção por caminhões.



Figura 37: Tambores eletromagnéticos

3.3.7. Sistema de Separação Manual

Após o sistema de separação magnética o material é dividido em dois transportadores de correia paralelos, como mostrado na figura 38, e serão direcionados para as estações de separação manual. Neste ponto três catadores, estrategicamente posicionados, retiram dos transportadores os materiais que tenham incrustações indesejadas ao processo, como manganês e inox, e depositam em caçambas.



Figura 38: Transportadores de correia paralelos

3.3.8. Empilhadeira Radial

Após passar por todo o processo de separação, a sucata, já beneficiada, é descarregada na empilhadeira radial, equipamento cujo propósito é de formar estoque por toda a circunferência do trilho, de forma que haja uma área de descarga maior. Além disso, este componente possui uma balança integrada, que registra a produção

de sucata triturada. O equipamento é mostrado na Figura 39 abaixo.



Figura 39: Empilhadeira Radial

Em alguns casos, a empilhadeira radial é conectada a uma correia transportadora extra, que permite a realocação do material já processado.

Somando todos esses componentes, tem-se o triturador industrial. Foram esquematizadas duas vistas: uma superior, na Figura 40, e uma frontal, na Figura 41, da planta para melhor compreensão.

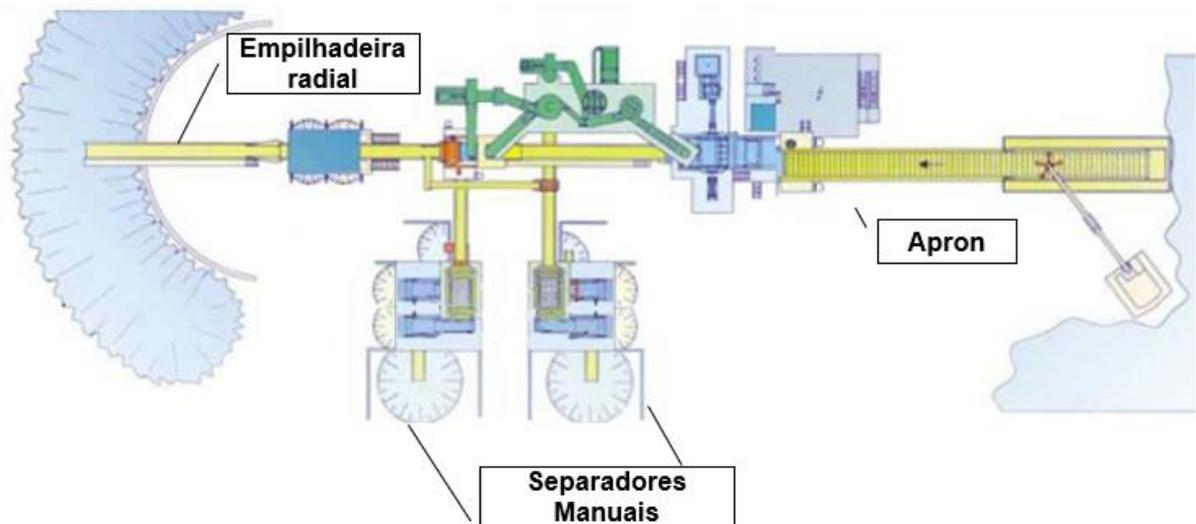


Figura 40: Vista superior da planta de um triturador industrial



Figura 41: Vista frontal da planta de um triturador industrial

3.4. Equipamentos utilizados na medição

Como mostrado no capítulo anterior, o triturador industrial é um equipamento de grandes proporções, com diversos componentes igualmente responsável pelo seu funcionamento. Entretanto, para esse estudo específico, foi decidido fazer o acompanhamento exclusivo do setor do triturador housing, que como visto, consiste no conjunto rolo compactador, rotor e martelos, juntamente com o motor anexado. Logo, foram instalados sensores para captar os deslocamentos verticais, horizontais e axiais em ambos os lados do motor elétrico e do moinho, tendo assim condições de monitorar o elemento produtivo do equipamento.

A instrumentação utilizada para a captura das informações necessárias consiste em 6 transdutores acelerômetros piezométricos da empresa BentlyNevada montados no sistema *stud*. Segundo o manual do fabricante, esse tipo de montagem é mais indicado para sistemas permanentes de monitoramento, resultando em uma resposta melhor na análise do range de frequências que varia de 0,2 a 14.000 Hz, sendo mais apropriados para ambientes industriais agressivos como um triturador de sucata. Em conjunto com os transdutores, há um condicionador de sinais e conversor analógico-digital (DAC) *vbOnline Pro Condition Monitoring System*, que funciona como um analisador FFT, também da empresa BentlyNevada.

Abaixo, pode-se ver os acelerômetros em questão na Figura 42, juntamente com sua ficha técnica, na Figura 43.



Figura 42: Acelerômetro utilizado [32]

Ordering Information

Accelerometer	Part Number
AM3100T2-Z2	Top exit sensor, 100 mV/g, Zone 2 rated
AS3100S2-Z2	Side exit sensor, 100 mV/g, Zone 2 rated
AP3500S2-Z1	Side exit sensor, 500 mV/g, Zone 1 rated
AP3500T2-Z1	Top exit sensor, 500 mV/g, Zone 1 rated
AS3100S2-Z0	Side exit sensor, 100 mV/g, Zone 0 rated
AM3100T2-Z0	Top exit sensor, 100 mV/g, Zone 0 rated

Figura 43: Ficha técnica dos acelerômetros[32]

Pode-se ver ainda os sensores conectados, por diferentes ângulos, na Figura 44 e na Figura 45.

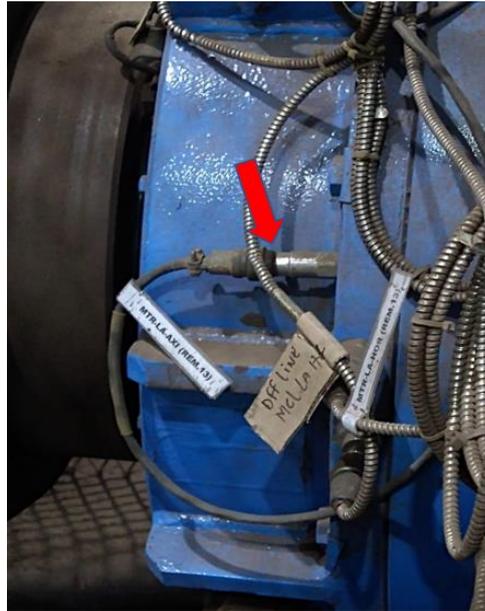


Figura 44: Sensores conectados ao lado acoplado do motor



Figura 45: Sensores conectados ao lado livre do motor

Para melhor visualização, segue a esquematização da montagem do objeto de estudo na Figura 46 e da aquisição de dados na Figura 47.

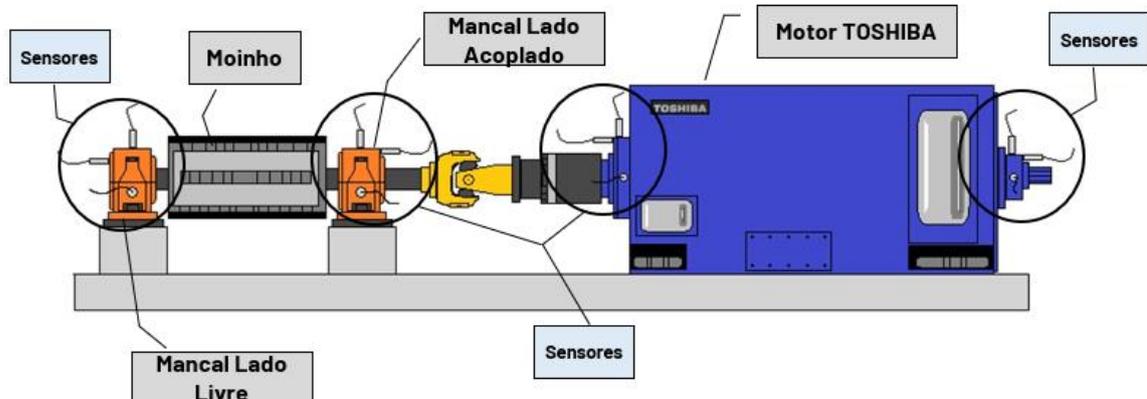


Figura 46: Esquema de montagem dos sensores para coleta

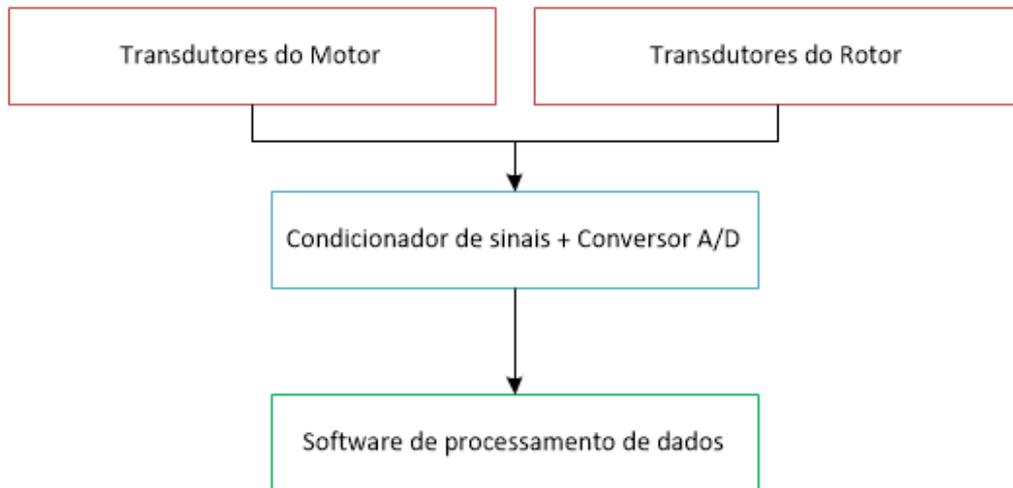


Figura 47: Esquema de aquisição de dados

Os sensores captam as informações de variação de aceleração, que após o processamento inicial pelo conversor, são integradas para se obter os dados sobre variação de velocidade e deslocamento. Vale ressaltar que este tipo de montagem pode gerar ruídos na leitura.

O software utilizado será o System 1, da empresa Baker Hughes, que apresenta uma plataforma mais flexível para o mecanismo em estudo. O software é capaz de prover análises para diversos tipos de máquinas, como mecânicas, hidráulicas e elétricas, além de permitir comunicação em tempo real com o coletor de dados por meio de conexão Ethernet. Abaixo, na Figura 48, o coletor de dados utilizado.



Figura 48: Coletor de dados vbOnline Pro Condition Monitoring System[33]

4. Resultados e discussões

4.1. Desbalanceamento

A imagem abaixo mostra a medição realizada durante desbalanceamento no eixo do rotor do moinho. Analisando a medição, pode-se perceber um pico na amplitude na frequência de 1 vez o RPM do motor, como mostrado na Figura 49.



Figura 49: Espectrografia de rotor do moinho desbalanceado.

Comparando com as análises feitas por Spammer (2009), pode-se notar a similaridade entre a espectrografia do rotor desbalanceado, mostrado na Figura 15.

O desbalanceamento ocorre no eixo do motor do moinho, onde ficam acoplados os martelos, e pode ser causado pelo impacto de peças não conformes, exemplificado na Figura 50, que possuem alta densidade e devido a atuação dos martelos, acabam gerando corpos maciços que não são processáveis, ou emaranhados (cabos de aço, arames, etc) no interior do Triturador Housing. Essas peças podem comprometer a estrutura, causando a quebra dos martelos e das proteções mecânicas do eixo, enquanto os componentes de cabos podem ocasionar o entupimento e agarramento do moinho, ilustrado na Figura 51.



Figura 50: Peça Não Conforme

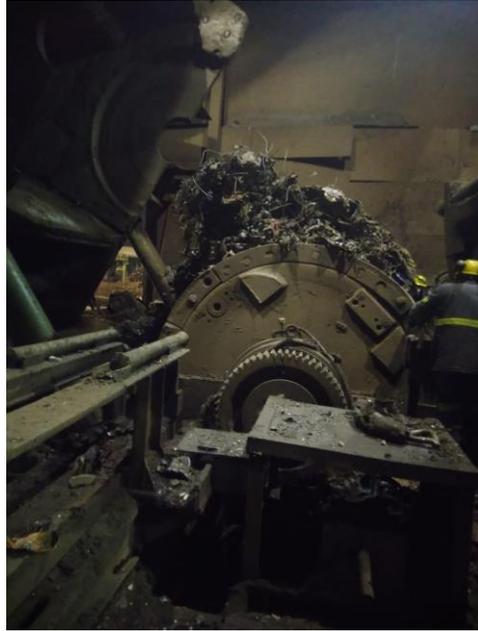


Figura 51: Moinho agarrado

No caso das quebras dos componentes mecânicos, há o decréscimo de massa de acordo que as peças são ejetadas pela linha de processamento, por exemplo a ejeção do martelo quebrado, ilustrado na Figura 52, e dos caps avariados, mostrados na Figura 53. Já na questão de sucata emaranhada, o produto se agrega ao eixo do rotor, causando aumento da massa do conjunto. Para retomada da atividade de trituração é necessário a atuação da equipe no local, paralisando a produção de trituração e colocando os colaboradores em risco.



Figura 52: Peça de martelo quebrado



Figura 53: Caps Quebrados

4.2. Desalinhamento

Novamente, devido ao impacto das peças não conformes, ocorre o empenamento do rotor, gerando um desalinhamento entre o moinho e o eixo rotativo do motor TOSHIBA, ambos conectados pelo eixo cardan, como mostrado na Figura 54. Nessa falha, a presença de cabos de aço não afeta tanto quanto o impacto das peças de alta densidade.



Figura 54: Eixo Cardan

A seguir, na Figura 55 pode-se ver a espectrografia captada com o motor desalinhado. Pode se perceber picos nos valores de amplitude nas frequências equivalentes à 1 e 2 vezes o RPM do equipamento. Ao realizar a comparação com a Figura 17, nota-se a semelhança com o caso de desalinhamento angular. Os pontos estão assinalados abaixo:



Figura 55: Espectrometria de desalinhamento do motor

Também como foi assinalado no tópico acima, é necessário que a equipe de manutenção atue localmente para regulamentação do equipamento, gerando parada de produção e expondo operadores à riscos.

4.3. Falha no rolamento

4.3.1. Conceito de Corrente Parasita

O conceito tem como base o fenômeno físico de indução eletromagnética, também conhecido como Lei da indução de Faraday. A lei de Faraday afirma que variações no fluxo de campo magnético, ocorrendo através de materiais condutores, são capazes de induzir a geração de corrente elétrica.

Com a existência de um campo magnético gerado por uma bobina alimentada através de uma corrente elétrica alternada, é capaz de induzir numa peça na qual está se fazendo o ensaio, correntes elétricas, essas também denominadas como "Correntes Parasitas". Esse fenômeno é ilustrado na Figura 56 abaixo.

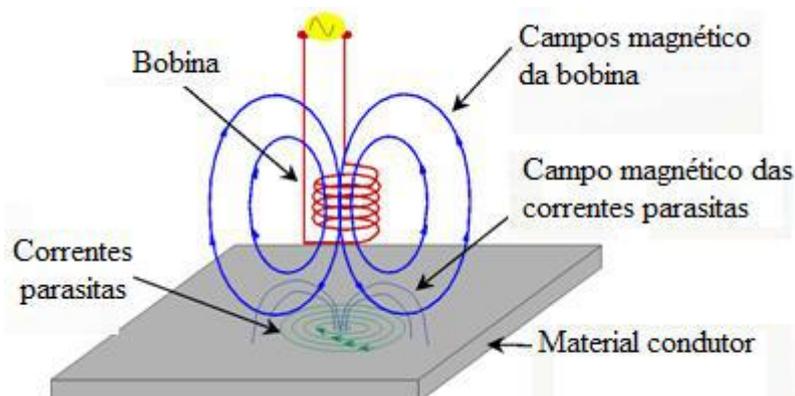


Figura 56: Esquema de Corrente Parasita[25]

O primeiro registro de aplicação industrial do ensaio eletromagnético surgiu por volta de 1930 com a finalidade de separar materiais de diferentes condutividades. Segundo Pereira (2007), as aplicações industriais com outros intuitos somente foram difundidas por volta dos anos de 1950, quando o Dr. Friedrich publicou suas pesquisas sobre caracterização dos materiais e o conceito do diagrama de impedância. Quando as correntes parasitas percorrem uma descontinuidade existente no material, a circulação delas é afetada, assim causando o desbalanceamento do sistema, além de possibilitar a detecção e dimensionamento. Além da capacidade encontrar descontinuidades, a corrente parasita também é capaz de ser usada para verificar a dureza e a condutividade do metal analisado, e para medir camadas finas de revestimentos não condutores, como tinta em peças de metal.

O campo gerado pela excitação vinda de uma corrente alternada na bobina é perpendicular à superfície do material, denominado campo primário ou campo indutor. Quando a bobina é posicionada nas proximidades da superfície do material condutor elétrico, o campo indutor induz correntes elétricas no interior e na superfície da amostra, e estas correntes são as denominadas parasitas, ou “eddy current”, em inglês. Essas correntes elétricas alternadas possuem fluxo em planos paralelos em relação às espiras da bobina de ensaio e produzem um campo magnético alternado, denominado campo magnético secundário ou induzido, com direção igual ao do campo indutor, porém em sentido oposto. O esquema é demonstrado na Figura 57.

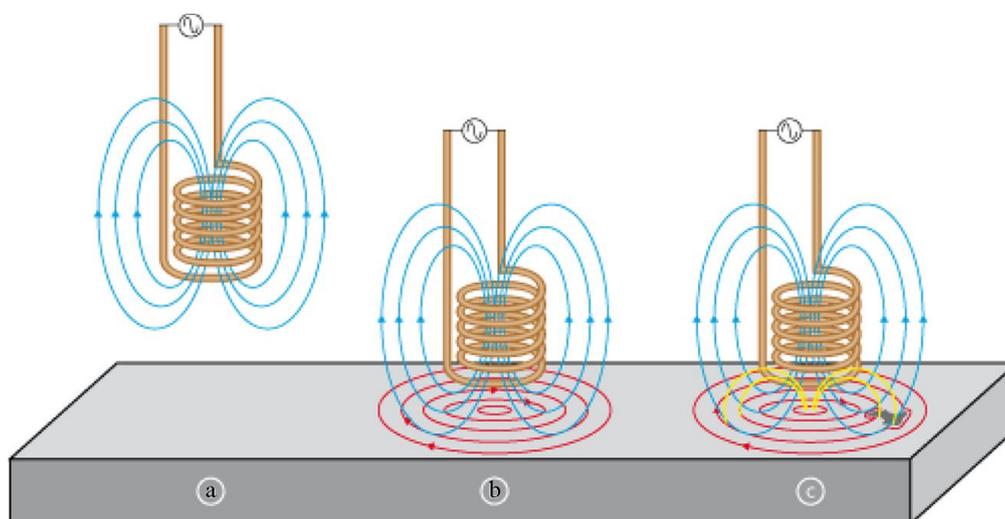


Figura 57: Desenho esquemático do ensaio de correntes parasitas.[27]

O comportamento das correntes parasitas é capaz de alterar a impedância da bobina usada no ensaio. Quando a bobina indutora é colocada em contato com dois materiais com propriedades equivalentes, sendo diferenciadas apenas por uma conter defeitos ou descontinuidades, os caminhos das correntes parasitas nos dois casos devem ser diferentes. Isto pode ser explicado pela presença de um defeito no material causar um aumento na resistência à passagem da corrente elétrica naquela região, reduzindo o fluxo de correntes parasitas. Da mesma forma, variações microestruturais com propriedades magnéticas diferentes geram uma facilitação ou dificuldade da passagem da corrente e, conseqüentemente, impedâncias diferentes. Essa diferença de impedância é usada para analisar os defeitos presentes na amostra e as propriedades dos materiais.

4.3.2. Análise de Falha no Rolamento

Durante acompanhamento online das medições dos sensores acoplados no lado livre, como mostrado na Figura 46, percebeu-se a presença de alguns aspectos de falha no local mencionado. Para detalhamento, é mostrado na Figura 58 o comportamento vibracional considerado normal do componente.

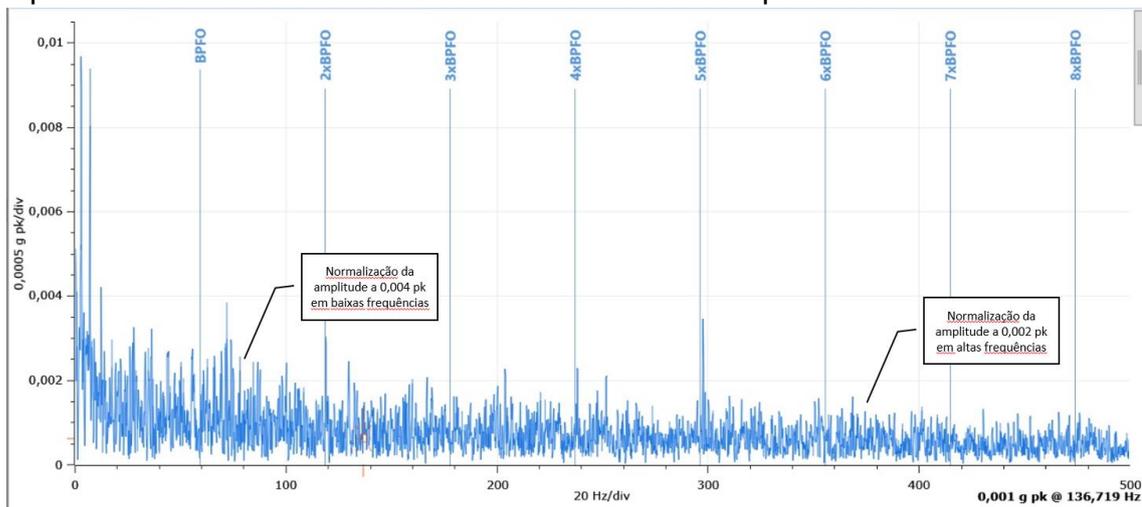


Figura 58: Espectro sem falha da pista externa do rolamento do lado livre

Durante as medições realizadas em funcionamento do rolamento, sem espectro de falha, foi constatado que a variação espacial normalizava por volta de 0,004 vezes o máximo de amplitude (referenciado como pk) em baixas frequências, se tornando menor (0,002 pk) de acordo que o monitoramento avança para altas frequências. No início da medição há a presença de uma distorção de aproximadamente 0,01 pk . Essa medida é considerada uma poluição, pois os sensores podem perder acuracidades em frequências menores.

Posteriormente, foi notado a existência de uma vibração de aproximadamente 0,006 pk , localizado em uma frequência igual a 1 vez a possuída pela pista externa do rolamento. De acordo com o que foi exposto no item 3.1.2.6, na Figura 22, pode-se afirmar que esta inspeção foi realizada no surgimento da falha no rolamento, caracterizando o Estágio 1, pois o valor medido na deformidade não é tão maior que o considerado normal, além de ocorrer nos primeiros múltiplos de rotação da pista externa do rolamento. Na Figura 59 é mostrado a medição mencionada.

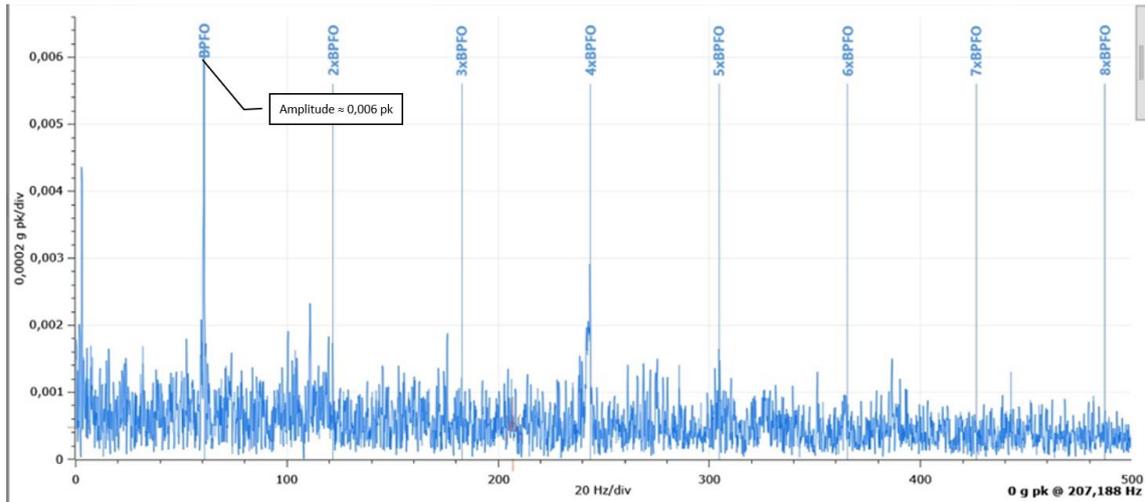


Figura 59: Surgimento de falha na pista externa do rolamento do lado livre

Com o devido acompanhamento, foi possível observar a degradação constante do rolamento, chegando até o Estágio 3, como exibido abaixo na Figura 60:

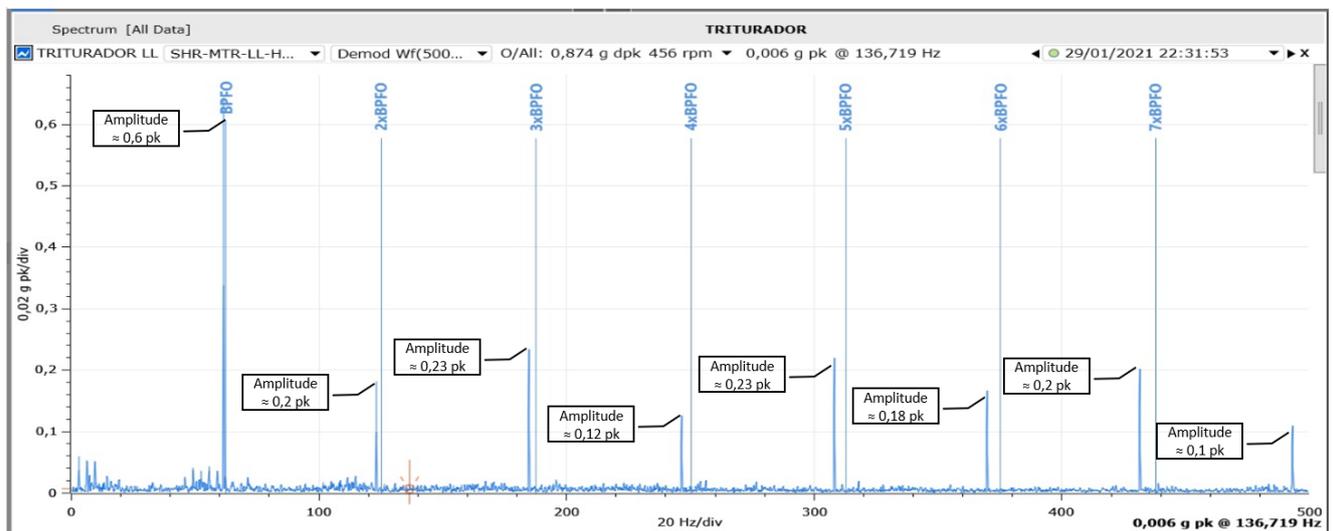


Figura 60: Espectro de agravamento de falha na pista externa do rolamento do lado livre.

Neste espectrograma, pode-se perceber diversos picos de vibração muito acima dos máximos de amplitudes normais, definidos na Figura 58, localizados nas regiões de múltiplos de rotações da pista externa do rolamento em questão. Nesta etapa, foi acionado o time de manutenção local para intervenção no mancal do lado livre do moinho, já que teoricamente a integridade do componente estava comprometida. Para maior exemplificação, a imagem 61 traz o acompanhamento ao longo do tempo da degradação do rolamento.

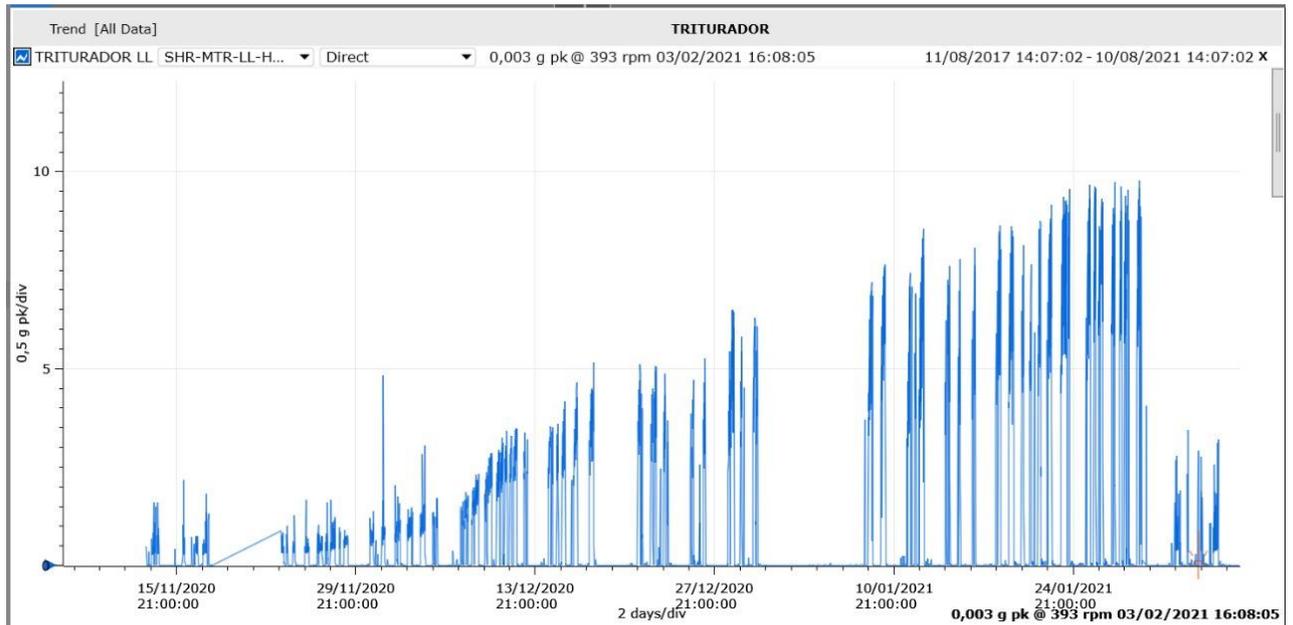


Figura 61: Tendência de falha na pista externa do rolamento do lado livre

Durante a intervenção, o rolamento foi retirado e analisado para tentativa de esclarecimento dos motivos da deterioração do item. Após diversos estudos, foi possível comprovar que a causa raiz da degradação foi a presença de correntes parasitas no conjunto do moinho. Segundo Lamim Filho (2011), a presença dessas correntes gera micro fragmentações e descascamentos nas superfícies das pistas do rolamento, conhecidas como Usinagem por descarga elétrica, que possuem formas bem características, mostradas na figura 62. Após a usinagem do rolamento em estudo, foi possível observar as ranhuras de erosão elétrica causada por esse fenômeno, como mostrado na figura 63.



Figura 62: Usinagem por descarga elétrica na pista de um rolamento.[28]



Figura 63: Corrosão Elétrica na pista externa do rolamento do lado livre

Foram levantadas duas hipóteses para a existências das correntes parasitas, que necessitam de contextualização: Antes da origem da falha, houve a necessidade de troca do motor acionador do conjunto. Anteriormente, consistia em um modelo de indução trifásico da WEG, cujas informações técnicas se encontram na Figura 64.

Identificação		
<p>  WEG Indústrias S.A. - Máquinas Relatório de Ensaio de Tipo Máquina de Indução Trifásica Número de Série: 128849 </p>		
<p> Cliente: GERDAU S. A. Rotação: 447 rpm Proteção: IPW24 Forma Construtiva: B3D Primário: 6600 V 589,0 A Y Secundário: 2425 V 1281,0 A Y </p>	<p> Modelo: MAT 1120 Fator de Potência: 0,8 Elevação de Temperatura: 80 K Classe de Isolação: F Categoria: . Altitude: 1000 m </p>	<p> Potência Nominal: 7000 HP Potência Nominal: 5222,0 kW Frequência: 60 Hz Temperatura Ambiente: 40. °C Regime: S1 Fator de Serviço: 1,15 Massa: 35000 kg Norma: IEC34.2/NBR5383 </p>

Figura 64: Especificações técnicas do motor WEG

Há uma diferença significativa nas correntes dos dois motores utilizados. Uma das teorias propostas é que essa diferença pode ter gerado a corrente parasita, e conseqüentemente a falha no rolamento. Outra teoria é que, durante o processo de troca do motor, não foi realizado corretamente o processo de aterramento do mesmo, que também poderia causar o surgimento das correntes no conjunto.

Como tratativa direta do evento, foi trocado o rolamento defeituoso por um similar, porém com maior vedação e isolamento em relação aos outros componentes.

5. Conclusão

Dessa forma, o estudo realizado indica que para o caso de um triturador industrial, a análise vibracional é uma ferramenta precisa, tanto para detecção e predição de falhas de desempenho operacional. Ao fazer uso das técnicas de análise relatadas neste artigo, é possível a diminuição de custos e de paradas técnicas ao realizar a predição dos defeitos. Será possível prever quando será necessária uma intervenção, além de aumentar a vida útil do equipamento.

Por meio dos dados obtidos com os equipamentos de medição previamente exibidos, foi possível gerar espectros de frequência com boa precisão. Fazendo uso desses gráficos e da literatura disponível, através de análises comparativas foi possível identificar desalinhamentos e desbalanceamentos no rotor do triturador. Além disso foi possível identificar em estágio inicial uma falha no rolamento do mancal do lado acoplado do rotor. Após essa identificação, foi realizado um acompanhamento da evolução da falha até o momento em que a vida útil do rolamento era mínima e a troca foi realizada.

A quebra do rolamento do motor poderia ter ocasionado uma avaria catastrófica do triturador industrial, pois danificaria o componente principal do triturador, que é o moinho. Como mencionado, a queda de produção seria uma consequência direta da quebra, além de colocar os funcionários em riscos sérios de segurança, fato que as empresas devem prezar em seus valores.

Após uma análise realizada, foi possível concluir que, apenas em 2021, 10% das paradas do triturador industrial foi decorrente de cargas não conformes e suas derivações, como quebras de martelo ou de grelhas. Num cenário de grandes demandas de material, é importante que o equipamento esteja disponível para produção o maior tempo possível, para que assim, a empresa se torne mais competitiva. Sendo assim, fica claro que a adesão de técnicas de manutenção preditiva, mais especificamente, análise vibracional, se torna útil e uma aliada muito importante.

6. Bibliografia

- [1]. ALMEIDA, Márcio Tadeu e GÓZ, Ricardo Damiano Sales. **Análise de Vibrações I - Medidas e Diagnósticos**. FUPAI, Itajubá, 2003.
- [2]. **ANÁLISE de Vibração - método de Preventiva**. [S. l.], 8 abr. 2015. Disponível em: <https://www.manutencaoemfoco.com.br/analise-de-vibracao/>. Acesso em: 21 abr. 2021.
- [3]. BARONI, tarcísio et al. **Gestão estratégica e técnicas preditivas**, editora qualitymark, rio de janeiro 2002
- [4]. BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, E. Russel; CORNWELL, Phillip J. **Mecânica Vetorial para Engenheiros: Dinâmica**. 9. ed. Porto Alegre: McGraw Hill, 2012
- [5]. FEEDING the facts 1/3: **Apron feeder basics**. [S. l.], 8 jul. 2019. Disponível em: <https://www.mogroup.com/insights/blog/mining-and-metals/feeding-the-facts-part-1-apron-feeder-basics/?r=1>. Acesso em: 22 mar. 2021.
- [6]. FILHO, L. F. Salomão. **Manutenção por análise de vibrações: Uma valiosa ferramenta para gestão de ativos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Naval, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- [7]. HOLANDA, Sandra Maria Santos. **Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto**. 2016. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.
- [8]. MAIS, J. **Spectrum analysis: the key features of analyzing spectra**. EUA: SKF Reliability Systems, may. 2002. 31p.
- [9]. MAIS, J.; BRADY, S. **Introduction guide to vibration monitoring: measurements, analysis, and terminology**. EUA: SKF Reliability Systems, may. 2002. 30p.
- [10]. **MANUTENÇÃO preditiva, tudo que você deve saber**. [S. l.], 28 jan. 2020. Disponível em: <https://equipeprodutiva.me/manutencao-preditiva/#:~:text=A%20manuten%C3%A7%C3%A3o%20preditiva%2C%20ao%20contr%C3%A1rio,coletados%20durante%20a%20visita%20t%C3%A9cnica>. Acesso em: 8 mar. 2021.
- [11]. **MANUTENÇÃO Preditiva**. [S. l.], 202-. Disponível em: <https://blog.engeman.com.br/manutencao-preditiva/?cn-reloaded=1>. Acesso em: 19 fev. 2021.
- [12]. **MANUTENÇÃO Preventiva na Indústria: o que é, como e quando fazer**. [S. l.], 7 abr. 2019. Disponível em: <https://blog.ploomes.com/index.php/2019/04/17/manutencao-preventiva/>. Acesso em: 6 mar. 2021.
- [13]. MORO, Noberto; AURAS, André Paegle. **Introdução à gestão de manutenção**. [S. l.: s. n.], 2007.
- [14]. NEPOMUCENO, Laur Xavier. **Técnicas de Manutenção Preditiva**. Editora Edgard. 1.ed. São Paulo: Blücher, 1989. 1 v

- [15]. **O QUE é manutenção preventiva? Aprenda como fazer a aplicação na sua empresa.** [S. l.], 23 jun. 2020. Disponível em: <https://caetreinamentos.com.br/blog/lean-manufacturing/manutencao-preventiva/#:~:text=A%20manuten%C3%A7%C3%A3o%20preventiva%20%C3%A9%20o,de%20vida%20%C3%BAtil%20dos%20equipamentos>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- [16]. **POR QUE o balanceamento é tão importante.** [S. l.], 202-. Disponível em: <https://www.schenck-rotec.com.br/why-balancing/introducao.html>. Acesso em: 3 maio 2021 .
- [17]. RAO, Singiresu. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2008
- [18]. SPAMER, Fernanda Rosa. **Técnicas preditivas de manutenção de máquinas rotativas**. Monografia em Engenharia Elétrica, Universidade do Rio de Janeiro, 2009.
- [19]. THE NEWELL Triturador. [S. l.: s. n.], 1994.
- [20]. MONTEIRO. C. I, SOUZA. L. R, ROSSI. P. H. L. **Manutenção e lubrificação de equipamentos**. Bauru. 2010.
- [21]. MARAN, M. **Manutenção baseada em condição aplicada em um sistema de ar condicionado como requisito para sustentabilidade de edifício de escritórios**. São Paulo. 2011.
- [22]. MARA, J, L. **Medida de vibração, uma ferramenta para a manutenção**. São Paulo, 2004.
- [23]. GOMES, M. **Manutenção preventiva**, 2009. Disponível em: <http://professormarciogomes.files.wordpress.com/2009/03/5manutencaopreventiva.pdf>. Acesso em 25 mai 2021.
- [24]. PINTO, A. K. , XAVIER, J. A. N., BARONI, T. A. **Gestão estratégica e técnicas preditivas**. Rio de Janeiro: Qualitymark: ABRAMAN, 2006.
- [25]. NDTResourceCenter.[Online]. Disponível em:http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/cc_ec_index.htm. Acesso em :10 Ago. 2021
- [26]. HALLIDAY, D., RESNICK R., WALKER, J. **Fundamentos de Física 3. Vol 3**. 7a edição. São Paulo: Ed. LTC, 2009.
- [27]. PEREIRA, P. A. de S., **Estudo Preliminar da Aplicação da Técnica de Correntes Parasitas Visando a Inspeção Submersa de Elementos Combustíveis**, Tese de M.Sc., COPPE COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [28]. LAMIM FILHO, Paulo Cezar Monteiro et al. **Estudo de falhas em rolamentos provenientes de tensões e correntes parasitas utilizando o sensor Shaft Probe**. 2011. Artigo (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São João Del Rei, [S. l.], 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/276226344_Study_of_damages_in_bearings_proceeding_from_tensions_and_currents_parasites_using_the_sensor_Shaft_Probe/fulltext/570e376808aec783ddd1bac1/Study-of-damages-in-bearings-

proceeding-from-tensions-and-currents-parasites-using-the-sensor-Shaft-Probe.pdf. Acesso em: 15 Ago. 2021.

- [29]. SINHA, Jyoti Kumar. **Vibration Analysis, Instruments, and Signal Processing**. 1. ed. [S. l.]: Taylor & Francis Group, 2015.
- [30]. GALLI, Vinicius Barcos. **Manutenção Preditiva por Análise de Vibração Mecânica em Máquinas Rotativas: Estudo de Caso**. 2017. TCC (Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, [S. l.], 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/157012/000906450.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 11 fev. 2021.
- [31]. MANUAL de instruções O.F. Nº DE SÉRIE: 11762. 2 set. 1998. Manual de Instruções.
- [32]. CASE mounted accelerometers: Datasheet. 2. ed. rev. [S. l.: s. n.], [20-].
- [33]. VBONLINE Pro Condition Monitoring System: User Guide. 4. ed. rev. [S. l.: s. n.], [20-].
- [34]. TAVARES, L. **Administração Moderna da Manutenção**. Rio de Janeiro, Novo Pólo Publicações, 1999.
- [35]. MOBLEY R. K. **An introduction to predictive maintenance**: Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.