



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

LIS SILVA DE MOURA

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE BASES MAGNÉTICAS PARA FIXAÇÃO DE
ACELERÔMETROS NA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO INDUSTRIAL**

TUCURUÍ
2024

LIS SILVA DE MOURA

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE BASES MAGNÉTICAS PARA FIXAÇÃO DE
ACELERÔMETROS NA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Orientador(a): Prof. Me. Walter dos Santos Sousa

Coorientador(a): Prof. Dr. Alexandre Luiz Amarante Mesquita

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

M929a Moura, Lis Silva de.
AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE BASES MAGNÉTICAS
PARA FIXAÇÃO DE ACELERÔMETROS NA ANÁLISE DE
VIBRAÇÃO INDUSTRIAL / Lis Silva de Moura. — 2024.
78 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Me. Walter dos Santos Sousa
Coorientador(a): Prof. Dr. Alexandre Luiz Amarante Mesquita
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de
Engenharia Mecânica, Tucuruí, 2024.

1. Bases Magnéticas, Acelerômetros, Análise de Vibração,
Manutenção Preditiva. I. Título.

CDD 620.3



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITARIO DE TUCURUI

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO/TCC Nº 1 / 2024 - CTUCU (11.16)

Nº do Protocolo: 23073.011735/2024-96

Tucuruí-PA, 23 de fevereiro de 2024.

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE BASES MAGNÉTICAS PARA FIXAÇÃO DE
ACELERÔMETROS NA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO INDUSTRIAL**

LIS SILVA DE MOURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título bacharel em Engenharia Mecânica.

Data da aprovação: 23/02/2024

Conceito: Excelente

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Me. Walter dos Santos Sousa
FEM/CAMTUC/UFPA

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Luiz Amarante Mesquita
FEM/ITEC/UFPA

Membro Interno: Prof. Dr. Leopoldo Pacheco Bastos
FEM/ITEC/UFPA

(Assinado digitalmente em 23/02/2024 15:27)
ALEXANDRE LUIZ AMARANTE MESQUITA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
ITEC (11.41)
Matrícula: ###578#2

(Assinado digitalmente em 25/02/2024 11:01)
LEOPOLDO PACHECO BASTOS
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
ITEC (11.41)
Matrícula: ###546#6

(Assinado digitalmente em 23/02/2024 18:07)
WALTER DOS SANTOS SOUSA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
CTUCU (11.16)
Matrícula: ###112#8

Para verificar a autenticidade deste documento entre em
<https://sipac.ufpa.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **1**, ano: **2024**,
tipo: **TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO/TCC**, data de emissão: **23/02/2024** e o código
de verificação: **93d71fa691**

DEDICATÓRIA

À mulher mais extraordinária que já conheci, minha mãe, Sandra, que durante todo o tempo que estive aqui sempre me ouviu, me incentivou e me apoiou.

‘Mesmo que você não esteja mais aqui fisicamente, seu amor, ensinamentos e alegria continuam a inspirar minha jornada pessoal e profissional.

Eterna Gratidão por tudo, Mãe’

AGRADECIMENTOS

Deus por sua constante presença em minha vida, pela força e graça que me sustentaram em cada passo do caminho, dando-me esperança em cada desafio e conquista.

À minha mãe, por ter me ensinado a ser sonhadora e a perseguir meus sonhos. Jamais haverá como retribuir tanta dedicação e tanto amor. Apenas estou concluindo esta importante etapa em minha vida que lhe prometi

Gratidão imensurável ao meu pai, Ronaldo Moura, que jamais deixou de me apoiar nas minhas decisões e me dar o suporte necessário para alcançar o que almejei.

Aos meus irmãos, Ian e Ivy, por estarem sempre ao meu lado, sendo meu suporte e fazendo com que minha jornada pessoal e profissional seja mais leve e feliz.

Ao meu namorado, Elton, por me acompanhar e me incentivar em todo o desenvolvimento deste trabalho, por ser meu confidente e meu melhor amigo, sempre me apoiando em todas as etapas desta jornada.

Aos meus orientadores Prof. Alexandre Mesquita e Prof. Walter Sousa pelo apoio, incentivo, orientação e ensinamentos fornecidos durante a realização de minha pesquisa.

Agradeço à Dynamox pela oportunidade de estágio, apoio e materiais necessários para a realização deste trabalho. Em especial, expresso minha gratidão ao Sr. Joel Nunes e a toda a equipe da Dynamox de Itabira-MG, pelos valiosos aprendizados adquiridos.

A todos os professores e funcionários do curso de Engenharia Mecânica da UFPA-CAMTUC, que sempre foram fantásticos e preocupados com a qualidade do ensino e com a amizade demonstrada durante os períodos mais difíceis.

Ao TECNOLAGO e ao Professor André Mesquita, pelo apoio, instalações disponibilizadas e todas as oportunidades, as quais me permitiram desenvolver essa pesquisa.

Ao meu avô Orlando Moura, e às minhas avós, Ieda Moura e Rosa Esther da Silva, por me ensinarem a ter humildade e seguir o caminho do bem.

À minha tia e madrinha Conceição Maria da Silva, por sempre enxergar meu potencial e ser minha maior incentivadora a jamais desistir.

A meus familiares e amigos que contribuíram e me incentivaram durante minha graduação e minha vida.

A todos que, de forma direta e indireta, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Gratidão!

“Estou entre aqueles que acham que a ciência tem uma grande beleza”

Marie Curie.

RESUMO

Na indústria, é decisivo assegurar a continuidade operacional dos ativos. Para isso, é realizada a implementação de práticas de manutenção eficazes, a fim de mitigar paralisações não programadas do processo produtivo, decorrentes de falhas inesperadas, as quais causam um impacto negativo na produtividade. Na manutenção preditiva realiza-se a análise de dados e monitoramento contínuo para identificar problemas em equipamentos antes que ocorram falhas e garantindo a disponibilidade e a confiabilidade de ativos. Com esse objetivo, é muito utilizada a análise de vibração. Por meio da medição das vibrações geradas pelas máquinas, torna-se possível identificar os padrões de funcionamento desses ativos. Isso, por sua vez, permite a detecção precoce de problemas potenciais, indicando, assim, a necessidade de intervenção de manutenção antes que ocorram falhas graves. Os acelerômetros utilizados para medir essas respostas de vibração podem ser fixados em estruturas de várias maneiras. É importante considerar que o método de fixação selecionado exerce influência direta sobre a faixa de frequência utilizável do acelerômetro e impacta diretamente nos resultados obtidos. Uma das formas mais utilizadas para realizar medições de forma rápida é através da fixação magnética. Essa técnica oferece flexibilidade na fixação dos sensores em diferentes locais, agilizando o processo de medição e minimizando o custo com quantidade de sensores. O presente trabalho objetiva realizar uma análise comparativa das respostas em frequência obtidas por diferentes tipos de fixação magnética, levando em consideração variações nos tamanhos, força de atração e modelos de bases magnéticas. Mediante essa análise, foi realizado um mapeamento e classificação dos critérios de importância. O estudo revelou que, embora uma base magnética com melhor desempenho tenha sido identificada, diversos fatores podem contribuir para a perda de desempenho.

Palavras-chaves: Bases Magnéticas, Acelerômetros, Análise de Vibração, Manutenção Preditiva

ABSTRACT

In the industry, maintaining operational continuity is of paramount importance. This is because operational continuity is vital for the production process, ensuring smooth operations and minimizing disruptions. Effective maintenance techniques are implemented to prevent unplanned interruptions in production, caused by unexpected failures, which can have a detrimental impact on productivity. Predictive maintenance strategies, such as data analysis and continuous monitoring, are employed to identify equipment issues before they lead to failures, thus ensuring the availability and reliability of assets. Vibration analysis, a common technique used in predictive maintenance, allows for the early detection of potential problems by measuring machine-generated vibrations and identifying operating patterns. It indicates the need for maintenance intervention before serious failures occur. Accelerometers, used to measure these vibration responses, can be mounted on structures in various ways. It's crucial to select the appropriate mounting method, as it directly influences the accelerometer's usable frequency range and impacts the accuracy of results obtained. Magnetic mounting is one of the preferred methods due to its ease of installation and removal, providing flexibility in sensor placement and streamlining the measurement process while minimizing costs associated with sensor quantity. This study aims to conduct a comparative analysis of frequency responses obtained by different types of magnetic mounting, considering variations in sizes, attraction force, and models of magnetic bases. In this investigation, a mapping and classification of importance criteria will be conducted to identify the most effective approach. While identifying a magnetic base with superior performance, it's essential to recognize that various factors may contribute to performance loss, emphasizing the need for careful consideration and evaluation in maintenance practices.

Keywords: Magnetic Bases, Accelerometers, Vibration Analysis, Predictive Maintenance

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Esquema de Manutenção.....	25
Figura 2. Sistema massa-mola.....	26
Figura 3. Movimento Harmônico Simples.....	26
Figura 4. Formas de representação da amplitude.....	27
Figura 5. Relação dos parâmetros para o mesmo nível de severidade.....	28
Figura 6. Monitoramento de sinais de vibração remoto.....	29
Figura 7. Espectro de Frequência típico de desbalanceamento.....	30
Figura 8. Tipos de Desalinhamento.....	31
Figura 9. Espectro de Frequência típico de desalinhamento angular e paralelo.....	32
Figura 10. Diagrama de Órbita de mancal de rolete de acionamento de um TC.....	33
Figura 11. Espectro de frequência típico de folga.....	34
Figura 12. Espectro de frequência típico de cavitação.....	34
Figura 13. Matriz de risco.....	37
Figura 14. Relação entre o valor de pico da vibração e o valor RMS.....	38
Figura 15. Fator K.....	39
Figura 16. Transformada de Fourier em relação ao sinal em domínio do tempo.....	41
Figura 17. Esquema de um sistema Foucault.....	44
Figura 18. Interior de um acelerômetro.....	45
Figura 19. Curva de Resposta do acelerômetro.....	46
Figura 20. Principais formas de montagem de acelerômetros.....	48
Figura 21. Resposta do acelerômetro em relação a fixação.....	53
Figura 22. Acelerômetro DynaLogger HF+.....	57
Figura 23. Modelos de Bases magnéticas diferentes.....	58
Figura 24. Superfície de contato das Bases magnéticas.....	58
Figura 25. Bancada experimental.....	61
Figura 26. Acelerômetro fixado por parafuso no Mancal 1.....	62
Figura 27. Bases magnéticas posicionadas.....	63
Figura 28. Valor de Pico.....	65
Figura 29. Valor RMS.....	65
Figura 30. Fator de Crista.....	66
Figura 31. Fator K.....	67
Figura 32. Curtose.....	67
Figura 33. Espectro de Frequência da base UNF Male 3011.....	68

Figura 34. Espectro de Frequência da base MagTek 3120.....	69
Figura 35. Espectro de Frequência da base 30MH115-2A.....	70
Figura 36. Power Spectral Density	71

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	15
1.2. OBJETIVOS.....	17
1.2.1. Objetivo Geral.....	17
1.2.2. Objetivos Específicos.....	17
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1. MANUTENÇÃO INDUSTRIAL.....	19
2.1.1. Tipos de manutenção.....	22
2.2. ANÁLISE DE VIBRAÇÃO.....	25
2.2.1. Conceitos Básicos sobre Vibrações	25
2.2.2. Principais falhas mecânicas em máquinas	28
2.2.3. Técnicas de Monitoramento de Vibrações	35
2.2.3.1. Análise de Severidade a partir do Nível Global	35
2.2.3.2. Análise no Domínio do Tempo	37
2.2.3.3. Análise da Domínio da Frequência	40
3. INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO.....	43
3.1. TIPOS DE SENSORES DE VIBRAÇÃO.....	43
3.1.1. Sensores Deslocamento.....	43
3.1.2. Sensores de Velocidade	44
3.1.3. Sensores Acelerômetros	44
3.2. INSTALAÇÃO DE ACELERÔMETROS.....	47
4. TIPOS DE FIXAÇÃO DE ACELERÔMETRO.....	48
4.1. MONTAGEM PARAFUSADA	49
4.2. MONTAGEM COM BASE MAGNÉTICA	50
4.2.1. Principais Vantagens da Fixação Magnética	50
4.2.2. Limitações da Fixação Magnética	51
4.3. MONTAGEM COM ADESIVO OU COLA	52
4.4 UTILIZAÇÃO DE PONTEIRA	53

4.5. INFLUÊNCIA DA FIXAÇÃO NA FAIXA DE FREQUÊNCIA UTILIZÁVEL	53
5. METODOLOGIA.....	55
5.1. SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS E MATERIAIS.....	56
5.1.1. FASE 1: Tipos de bases	57
5.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	58
5.3. VARIÁVEIS ANALISADAS	59
6. ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	60
6.1. BANCADA EXPERIMENTAL.....	61
6.2. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL.....	62
6.3. PROCEDIMENTO DE AQUISIÇÃO DOS SINAIS.....	63
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
7.1 ANÁLISE COMPARATIVA.....	65
8. CONCLUSÃO.....	73
8.1. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS.....	74

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

À medida que a indústria se moderniza, há uma maior complexidade das máquinas e equipamentos que impulsionam a produção, a eficiência e a competitividade. Manter a continuidade operacional da produção é uma questão crucial que afeta diretamente a produtividade e a lucratividade das empresas. No contexto em que o tempo é dinheiro, a paralisação não programada de máquinas devido a falhas inesperadas representa um dos maiores desafios enfrentados pela indústria. Tendo isso em vista, para garantir a eficiência e a confiabilidade de suas operações, as empresas têm reconhecido a necessidade de implementar práticas de manutenção eficazes. Com relação a isso, Otani e Machado (2008) observam que a manutenção, enquanto função estratégica das organizações, é responsável direta pela disponibilidade dos ativos e têm importância capital nos resultados da empresa. Os resultados são tão melhores quanto a eficácia da gestão da manutenção. Isso faz da manutenção um pilar fundamental da gestão industrial e essencial para garantir a continuidade das operações. Os motivos para investir em manutenção eficaz são claros: custos associados à inatividade, reparos onerosos e perda de produção podem ser substanciais, representando uma ameaça direta à lucratividade.

Nesse contexto, a manutenção preditiva tem emergido como uma estratégia altamente relevante e eficaz. Essa abordagem utiliza dados e tecnologia avançada para identificar problemas potenciais em estágios iniciais e então planejar a manutenção de forma a realizar manutenções e corrigir esses defeitos antes que ocorram falhas que provocam paradas na produção que necessitam de manutenção corretiva. A manutenção preditiva é a ideia de que a manutenção existe para que não haja manutenção. Isso parece paradoxal à primeira vista, mas, numa visão mais aprofundada, vemos que o trabalho da manutenção está sendo enobrecido onde, cada vez mais, o pessoal dessa área precisa estar qualificado e equipado para evitar falhas e não para corrigi-las (KARDEC e NASCIF, 2009). Para atingir esses objetivos de reduzir custos de mão de obra e prolongar a vida útil dos ativos, as organizações recorrem aos conceitos que configuram a Indústria 4.0: dispositivos interconectados, sensores, gateways, nuvens e outras ferramentas de Internet das Coisas (IoT). Isso possibilita a coleta instantânea de grandes conjuntos de dados de diferentes ativos, além da aplicação da análise de Big Data para fornecer informações preditivas de manutenção (DILMEGANI, 2019).

Diante desse cenário, a Manutenção Preditiva emerge rapidamente. Sua implementação possibilita monitorar a integridade dos ativos, otimizar os cronogramas de manutenção e obter alertas em tempo real dos riscos operacionais, benefícios estes que se encontram com as necessidades atuais das organizações (EZRA, 2018). Uma das ferramentas mais utilizadas para esse processo é a análise de vibração. A partir da medição das vibrações geradas por máquinas e equipamentos, torna-se possível identificar padrões de funcionamento e perceber mudanças no comportamento das máquinas, sendo possível a detecção precoce de defeitos. Isso permite que as equipes de manutenção intervenham de forma planejada os reparos e substituições antes que ocorram falhas graves que parem a produção e causem custos com reparos de emergência. Com isso, há um aumento da vida útil dos ativos e melhoria da eficiência operacional.

Contudo, garantir a eficiência do sistema de medição de vibração é crucial para garantir medições precisas e eficazes. Para isso, é fundamental selecionar adequadamente os equipamentos e métodos a serem utilizados. Para a medição de vibração, amplamente utilizam-se acelerômetros. Portanto, é crucial selecionar adequadamente os métodos de fixação destes, uma vez que as diferentes formas de fixação, com parafuso e fixação magnética, têm implicações diretas na faixa de frequência utilizável dos acelerômetros, o que afeta a qualidade dos dados coletados.

Com base nessa concepção, este trabalho propõe uma análise comparativa desses métodos de fixação, considerando variações nos tamanhos, força de atração e modelos de bases magnéticas. O objetivo é avaliar como esses parâmetros influenciam a funcionalidade dos acelerômetros na análise de vibração. A pesquisa busca orientar a seleção adequada de bases magnéticas para a fixação de acelerômetros, considerando que é a forma mais aplicada quando a necessidade é facilidade de instalação e remoção, oferecendo flexibilidade na fixação dos sensores em diferentes locais, o que agiliza o processo de medição e minimiza o custo com quantidade de sensores. O estudo proporcionará informações valiosas para profissionais e gestores de manutenção industrial, contribuindo para a continuidade operacional de ativos e a eficiência da indústria como um todo.

Este trabalho é motivado pela necessidade na indústria de compreender a influência da fixação magnética dos sensores de vibração. Essa forma de fixação é amplamente adotada no ambiente industrial, onde muitas vezes a praticidade e agilidade na coleta de vibração em zonas industriais são prioritárias. Além disso, esse tipo de fixação é utilizado para reduzir os custos

com a aquisição de equipamentos sensores de vibração, uma vez que um único sensor pode ser transferido entre vários pontos de medição para coletar as vibrações dos diferentes ativos.

No entanto, apesar de ser uma questão de grande relevância, há uma escassez de estudos na literatura que abordem esse tema. Portanto, há uma motivação em ampliar e incentivar esse tipo de pesquisa, decorrente de uma necessidade prática de aplicação na indústria.

A análise comparativa das bases magnéticas revelou resultados significativos e conclusivos. Os objetivos estabelecidos para a pesquisa foram alcançados com sucesso, fornecendo dados valiosos sobre o desempenho dessas bases em diferentes métricas de análise de vibração e demonstrar a eficácia das bases magnéticas na fixação de acelerômetros, esclarecendo questões essenciais sobre seu comportamento dinâmico em comparação com a fixação por parafuso. As hipóteses, quando indicadas, foram confirmadas ou refutadas com base nos resultados obtidos nas métricas avaliadas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Realizar uma avaliação comparativa da influência das respostas de tempo e frequência obtidas por diferentes tipos de fixação por base magnética.

1.2.2. Objetivos Específicos

- ❖ Realizar um estudo na literatura dos tipos de fixação mais utilizados com ênfase nas vantagens e desvantagens da fixação magnética;
- ❖ Desenvolver um plano experimental para identificar e comparar a influência das diferentes formas de fixação nos resultados obtidos pelo acelerômetro;
- ❖ Definir uma configuração experimental que se aproxime da realidade industrial;
- ❖ Analisar os dados para avaliar a influência da fixação na resposta do acelerômetro;
- ❖ Classificar e pontuar os critérios de importância na comparação dos diferentes tipos de fixação utilizados no estudo;

- ❖ Apresentar o comparativo dos resultados do comportamento vibracional dos pontos coletados com diferentes fixações;
- ❖ Definir a base com melhor comportamento de acordo com os critérios estabelecidos.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

A seção de revisão bibliográfica aborda os conceitos fundamentais de análise de vibração utilizados neste estudo, dividindo-se em dois focos: manutenção industrial, que explora os tipos de manutenção na indústria e seus critérios de aplicação, e análise de vibração, que apresenta as principais métricas dessa análise.

A seção de Instrumentação para monitoramento de vibração discute os tipos de sensores de vibração usados na indústria e sua instalação na área industrial.

A seção Tipos de fixação de acelerômetro descreve os métodos mais comuns: Montagem Parafusada, Montagem com base magnética, Montagem adesivada e Montagem com ponteira. Explora os critérios para escolha do tipo de fixação e os procedimentos de montagem, além de apresentar a influência da fixação na faixa de frequência utilizável.

Na seção de metodologia, é detalhada a estrutura do estudo, visando comparar a influência da fixação na faixa de frequência utilizável, considerando variáveis como tamanho, força do ímã e tamanho da base magnética. Esta comparação foi realizada por meio de uma série de ensaios e técnicas de análise de vibração.

A seção de ensaios experimentais descreve o setup experimental e os equipamentos utilizados. Os resultados obtidos e as conclusões sobre a comparação entre as bases são apresentados na seção de Resultados e Discussões, enquanto as conclusões finais são destacadas na seção final.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

Ao analisarmos a etimologia da palavra "manutenção", cujas origens remontam ao latim, especificamente a “*manus tenere*”, que significa "manter o que se tem", percebemos que esse conceito possui uma longa história na evolução da humanidade. Desde os tempos primordiais, quando os primeiros seres humanos começaram a lidar com equipamentos, a manutenção já estava presente de alguma forma. No entanto, foi durante a Revolução Industrial, no final do século XVIII, que a manutenção passou por um período de transformação significativo e adquiriu um papel crucial nos ambientes industriais. Isso se deve ao fato de que, com a produção em massa de bens de consumo, surgiu a necessidade de manter e aprimorar as máquinas industriais. A princípio, a palavra “manutenção” é associada às origens no vocabulário militar, onde significava manter o efetivo e o material em unidades de combate em um nível constante. Segundo o autor Monchy (1989), ela teve origem na indústria nos Estados Unidos da América por volta de 1950, enquanto na França, por exemplo, era associada à palavra "conservação", *conservation*.

A evolução da manutenção ao longo das décadas pode ser dividida em quatro gerações distintas, cada uma marcada por mudanças significativas nas abordagens e práticas de manutenção. Este capítulo discute sucintamente as características de cada geração, destacando os principais marcos e desafios que moldaram o campo da manutenção industrial.

Primeira Geração (Segunda Guerra Mundial - 1940): Na primeira geração, a manutenção não ocupava uma posição de destaque nas organizações. As técnicas de manutenção eram rudimentares, com ênfase em ações simples, como limpeza, lubrificação e inspeção visual. Essa abordagem era predominantemente corretiva e não planejada, o que significa que as intervenções ocorriam somente após a ocorrência de falhas, tornando a manutenção altamente reativa (KARDEC e NASCIF, 2009).

Segunda Geração (1940-1970): A segunda geração ocorre após o término da Segunda Guerra Mundial, quando houve uma diminuição na oferta de mão de obra, mas uma crescente demanda por uma variedade de bens de consumo. Esse cenário impulsionou a mecanização e complexificação das instalações industriais, elevando a importância da manutenção. Na década de 1950, surgiu o conceito de manutenção preventiva, enfatizando a prevenção de falhas. Isso

levou à necessidade de implementar sistemas de planejamento e gestão da manutenção, com o objetivo de ampliar a vida útil dos ativos físicos (KARDEC e NASCIF, 2009).

Terceira Geração (1970 - 2000): Durante esse período, a globalização da economia impôs desafios adicionais relacionados à produtividade e qualidade. Com investimentos substanciais em ativos fixos e crescentes custos, as expectativas em relação à manutenção aumentaram. A manutenção preditiva ganhou destaque, e houve um esforço para desenvolver softwares que permitissem um planejamento, controle e acompanhamento mais eficaz dos serviços de manutenção. No entanto, a falta de integração entre as áreas de engenharia, manutenção e operação resultou em altas taxas de falhas prematuras (KARDEC e NASCIF, 2009).

Quarta Geração (a partir dos anos 2000): Nessa fase, houve uma consolidação das atividades de engenharia de manutenção e um foco na análise de falhas como uma metodologia capaz de melhorar o desempenho dos equipamentos. A manutenção preditiva se torna-se cada vez mais comum, o que leva a uma redução na dependência da manutenção preventiva. A manutenção corretiva não planejada passa a ser vista como um indicador de ineficácia da manutenção. Nesse contexto, a elaboração de estratégias de manutenção se tornou crucial para alcançar melhores resultados (KARDEC e NASCIF, 2009). Os autores apontam ainda que, nas últimas décadas, houve significativas transformações no conceito de manutenção, influenciadas pelo aumento no número, diversidade e complexidade dos itens de manutenção. Essas mudanças foram também impulsionadas pelo surgimento de novas técnicas de manutenção, que trouxeram novos enfoques à organização e às responsabilidades relacionadas à manutenção

A evolução da manutenção ao longo das gerações reflete o reconhecimento crescente da importância desse campo na indústria, bem como a busca contínua por abordagens mais eficazes para garantir a confiabilidade, disponibilidade e desempenho dos equipamentos. Cada geração trouxe novos desafios e oportunidades, contribuindo para a complexidade atual da gestão da manutenção. Esta análise histórica é fundamental para compreender a trajetória e as tendências da manutenção industrial e serve como base para as práticas e estratégias de manutenção contemporâneas. Nesse contexto, nota-se que conforme os equipamentos se tornaram progressivamente mais modernos e produtivos, a elaboração de planos de manutenção assume um papel crucial na indústria. A manutenção, anteriormente vista de forma mais simplista, evoluiu para uma função estratégica de importância vital para garantir a eficiência, a confiabilidade e o desempenho dos equipamentos industriais

A manutenção não se limita apenas a máquinas e equipamentos em operação, mas também envolve a concepção de projeto. Com isso, se incluem a disposição das peças, a acessibilidade dos conjuntos para os mecânicos e o dimensionamento das peças e componentes de maneira a facilitar as operações de manutenção futuras. Esse conceito é destacado por Almeida (2016) em sua obra, onde o autor afirma que a manutenção eficiente começa no papel, com a consideração cuidadosa da concepção do projeto e suas implicações para futuras operações de manutenção. Esse conceito é reforçado por outros autores como Kardec e Nasfic (2009) que ressaltam que a manutenção não se limita a assegurar que um equipamento funcione adequadamente, mas também deve garantir a confiabilidade e disponibilidade do item ou instalação, atendendo ao processo com segurança e preservando o meio ambiente, tudo isso a custos adequados.

Já na norma NBR 5462 (1994), em seu item 2.81, manutenção é definida como a "combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual ele possa desempenhar uma função requerida". Ao longo dos anos a manutenção se tornou um setor crucial para a indústria para garantir o funcionamento contínuo de todo o processo de produção, além de garantir a manutenibilidade dos equipamentos em operação ela é fundamental para garantir a qualidade e minimizar os custos dos produtos e serviços oferecidos.

Para atingir esses objetivos é preciso definir uma estratégia de manutenção a ser aplicada no processo produtivo e em seus subprocessos, as ferramentas organizacionais que possibilitam o funcionamento eficaz da manutenção, as técnicas de planejamento, o perfil formativo de cada área, os índices de qualidade e o sistema de gerenciamento formam as bases da estruturação da manutenção industrial da empresa. Em sua obra Viana (2014) destaca que a primeira decisão a ser tomada é a escolha da estratégia de manutenção. Isso envolve definir quais estratégias irão ser adotadas para manutenção dos diferentes tipos de ativos e definir a abordagem para as intervenções nos instrumentos de produção. Entre os autores nota-se um consenso em relação a quatro tipos de manutenção: corretiva, preventiva, preditiva e autônoma (TPM). Cada uma dessas estratégias desempenha um papel importante na manutenção de equipamentos e na garantia do funcionamento eficiente das operações industriais.

Em um contexto amplo, as atividades de manutenção também devem envolver a modificação das condições originais, através da introdução de melhorias para evitar a ocorrência ou incidência de falhas, reduzindo o custo e aumentando a produtividade. O autor

Salgado (2008) defende que, a estratégia de manutenção deve contemplar todas as atividades e ações necessárias para restaurar e/ou prevenir a ocorrência ou reincidência de falhas em sistemas e componentes, e o autor Xavier (1999) fez que as atividades de manutenção existem para evitar a degradação, causada pelo desgaste natural de seu uso, dos equipamentos e instalações, recuperando a boa funcionalidade e confiabilidade dos equipamentos. Para Mirshawka e Olmedo (1993), manutenção é o conjunto de atividades técnicas e administrativas, que visam consertar ou restituir um item, para que este cumpra sua função exigida. Como afirma Moubrey (2001), o objetivo da manutenção é assegurar que os itens físicos continuem a fazer o que seus usuários desejam que eles façam, mantendo sua capacidade funcional de operação.

A estratégia de manutenção tem fundamental importância para uma operação segura e eficiente de qualquer planta industrial. Contudo, há uma mistura dos aspectos de segurança e confiabilidade da planta com as questões relacionadas ao desempenho econômico, como receitas de produção, custos de reparo e manutenção, tornando o problema de gerenciar atividades de manutenção altamente complicado, especialmente para sistemas complexos com muitos componentes (JARDINE e TSANG, 2013). Para Marseguerra et al (2000) as decisões sobre a logística das atividades de reparo e manutenção devem ser o resultado de um estudo de otimização. Para isso, deve ser devidamente estudada a estratégia de manutenção a ser adotada em cada ativo e quais ações a serem tomadas em situações de falhas e/ou intervenção nos equipamentos.

Os tipos de manutenção existentes são caracterizados pela forma como é realizada a intervenção nos equipamentos, sistemas ou instalações. Há uma extensa gama de denominações que classificam os tipos de manutenção, são eles: manutenção corretiva não planejada e planejada, manutenção preventiva, manutenção preditiva, manutenção detectiva e engenharia de manutenção.

2.1.1. Tipos de manutenção

No realizar a organização é preciso considerar qual método de manutenção a ser aplicado em cada aplicação. Há várias estratégias definidas, os tipos de manutenção. Siqueira (2005) em sua proposta classificou em seis categorias, são elas: reativa ou corretiva; preventiva; preditiva; proativa e detectiva. Que estão no esquema da Figura 1 e podem ser definidos como:

Manutenção Corretiva é o método de manutenção caracterizado pela intervenção no ativo quando há uma falha, nesta não existe um direcionamento financeiro para manutenção

anterior a uma falha operacional (ALMEIDA, 2008). Para Marçal (2004) nesta metodologia há uma maior paralisação do processo produtivo o que gera, conseqüentemente, uma quebra na logística produtiva e diminuição dos lucros, além de gastos diversos em decorrência da falha, o que não é o mais indicado para as indústrias da atualidade em decorrência da produção estar diretamente relacionada ao tempo e eficiência da produção e com isso a sua interrupção implica negativamente no cronograma produtivo. O autor ainda ressalta que esse tipo de manutenção possui diversos indicativos de ineficiência como: um custo elevado para um estoque de peças sobressalentes e demanda maior de horas extras para manutenção, além da paralisação do processo produtivo que implica na redução da produção e aumento do prazo para produção que em um todo reduz o lucro. Para tanto, esse processo ainda pode ser subdividido em dois, sejam eles, manutenção corretiva planejada e não planejada.

A manutenção corretiva planejada é a correção do baixo desempenho ou da falha, por decisão gerencial. Para Marçal (2004) esse tipo de manutenção é efetuado em um período programado, com intervenção e acompanhamento, desde que o defeito não implique na ocorrência de uma falha e, quando há decisão de o equipamento funcionando até quebrar é recomendável compartilhar com outros defeitos já relatados e tomar ação preventiva e naturalmente econômica. Para Almeida (2008), o planejamento é fundamental e deve considerar fatores diversos para o não comprometimento do processo produtivo. Portanto, na correção do erro acontece por meio de um acompanhamento do maquinário pode-se esperar a falha, porém a ação não é de antecipar o erro totalmente, mas em parcialidade e em casos especiais, fazer a manutenção até a falha. Isto é, há uma organização e prognóstico de possíveis interrupções do andamento cotidiano, ainda que de maneira pouco sistemática. A manutenção corretiva é efetuada depois de detectada uma avaria para repor um bem que possibilite a realização da sua função.

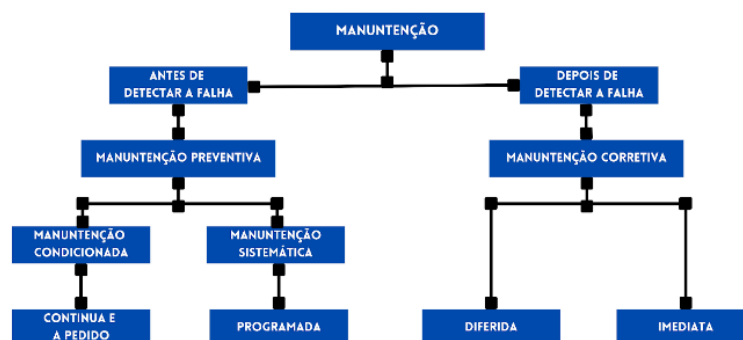
A manutenção corretiva não planejada ocorre quando há a correção da falha aleatória. Em Marçal (2004) o autor afirma que a manutenção ocorre no fato já ocorrido ou no momento seguinte à identificação do defeito. Isso implica na paralisação do processo, perdas de produção, perdas de qualidade e elevação de custos indiretos de produção. Embora haja manutenção para colocar o equipamento nas condições de operação, neste tipo tem-se o acontecimento falha para que posteriormente se estabeleça a manutenção o que o torna ainda menos eficiente do que o anterior. Conforme Almeida (2008), um processo produtivo intenso acarreta uma demanda maior do maquinário e, conseqüentemente, o aumento de falhas inesperadas em decorrência dessa sobrecarga. Entretanto, há casos em que algum maquinário que apresenta necessidade de

uma substituição de peça que deverá ser encomendada, demandando tempo e recurso financeiro, além da paralisação, ou na possibilidade de já haver o que se precisa para o reparo em estoque, tem-se o tempo como inimigo produtivo e redutor de lucros. Nesse sentido, essa manutenção reativa está na contramão da eficiência produtiva, redução de gastos operacionais e maximização de lucros.

A manutenção preventiva é o tipo cuja máquina passa por um reparo ou outros procedimentos funcionais de acordo com estatísticas de uso baseada na curva do tempo médio para falha - CTMF (Almeida, 2008). Isto é, manutenção preventiva é realizada em intervalos de tempo pré-determinados. Em seu estudo Marçal (2004) subdividiu manutenção preventiva em duas classes, a manutenção preventiva em programada e de rotina. Onde a primeira é aquela que há uma periodicidade na manutenção, sejam elas baseadas na necessidade indicada em dias, ciclos ou horas de uso, sem considerar demais condições externas a esse parâmetro, e a segunda a que se baseia-se no sentido humano como meio catalisador do processo. Nesse tipo, o controle é realizado por meio de controles manuais sem muitos parâmetros. Em suma, a finalidade deste na manutenção preventiva é reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do funcionamento de um ativo. A Manutenção Preventiva caracteriza-se pela intervenção, antes que o equipamento venha a falhar. No estudo de Pais e Farinha (2018) o autor afirma ainda que quando o operador é capacitado a efetuar a manutenção a ação de disponibilidade dos recursos é otimizada e o tempo de parada é reduzido.

A Manutenção Preditiva na indústria representa um indicativo positivo de redução de prejuízos e custos de manutenção, ausência mínima de interrupções inesperadas na produção e maximização dos lucros, isso além de outras tantas possibilidades de análise sistêmica que possibilitem uma avaliação global que envolva outros parâmetros que a empresa julgar pertinente. Essa metodologia propõe ações que podem “prever” o problema e não somente no resultado ou sintoma que gerou a falha. Ela busca entender o porquê de determinada necessidade de manutenção e insere nesse propósito a intervenção na manutenção de uma forma otimizada (Almeida, 2008). A manutenção preditiva é realizada de acordo com as previsões extrapoladas da análise e da avaliação de parâmetros significativos da degradação do equipamento.

Figura 1. Esquema de Manutenção



Fonte: Autoria Própria

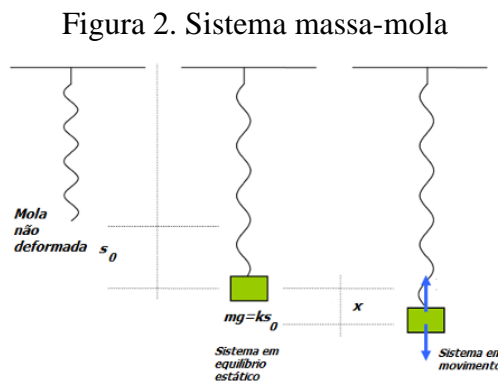
2.2. ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

No caso da realização da manutenção preditiva, a análise de vibrações é apenas uma das ferramentas disponíveis para determinar as condições de uma máquina. A partir das medições da vibração de uma máquina, é possível conhecer o padrão de funcionamento do equipamento e então perceber qualquer alteração, o que pode indicar uma falha inicial. As medições de vibrações produzem um grande volume de dados sobre as possíveis falhas futuras ou como um ativo se comportou em determinada situação. Esses dados são de extrema importância para a gestão de ativos como um todo. Nesse sentido, a análise de vibração é uma técnica com importante relevância no controle de condições. O estudo relacionado aos comportamentos vibracionais de um equipamento pode ser considerado um tanto quanto complexo, uma vez que cada estrutura, sistema, equipamento ou máquina possui um comportamento diferente e merece uma análise metódica para cada caso. Em determinadas situações, não é possível realizar apenas uma análise intuitiva, o que transparece a grande importância da experiência no campo para realizar uma abordagem concreta nesse assunto. Este trabalho tem como objetivo atuar em um sistema de sensoriamento de vibração no qual há uma estrutura magnética de fixação do sensor na superfície das máquinas. Portanto, embora não seja o foco principal do trabalho realizar diagnóstico de componentes de máquinas, é preciso conhecer as particularidades dos tipos de falhas que comumente ocorrem e são diagnosticadas por análise de vibração.

2.2.1. Conceitos Básicos sobre Vibrações

Vibração conceitua-se em um movimento oscilatório em torno de um ponto de referência. Esta é provocada pela existência de forças dinâmicas inerentes ou não ao sistema.

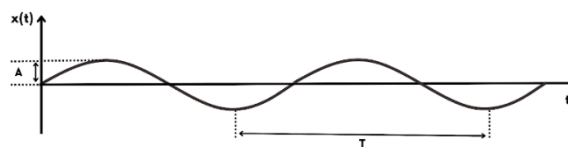
Essas forças podem ser originadas por defeitos existentes no sistema, como desalinhamentos, desequilíbrios, folgas, entre outros. A amplitude da vibração depende da força de excitação, da massa, da rigidez e do amortecimento do sistema. Embora nem sempre a existência de vibrações num equipamento signifique uma fonte de problemas, a partir das vibrações é possível diagnosticar falhas. Uma forma de ilustrar uma vibração e, conseqüentemente, um movimento oscilatório, pode ser o sistema massa-mola, representado na Figura 2, onde o movimento é provocado pela compressão ou alongamento da mola através do deslocamento da massa.



Fonte: Seco (2012)

A vibração pode surgir de quando um sistema é deslocado da sua posição de equilíbrio. Quando essa massa é deslocada até uma distância x da sua posição de equilíbrio, à qual a mola reagirá com um movimento contrário (força de restituição) e, será alongada até uma distância x , na direção oposta. É justamente a repetição deste processo que se designa como movimento oscilatório. Neste caso, a vibração pode ser descrita por um movimento harmônico simples, ilustrado na Figura 3.

Figura 3. Movimento Harmônico Simples



Fonte: Autoria Própria

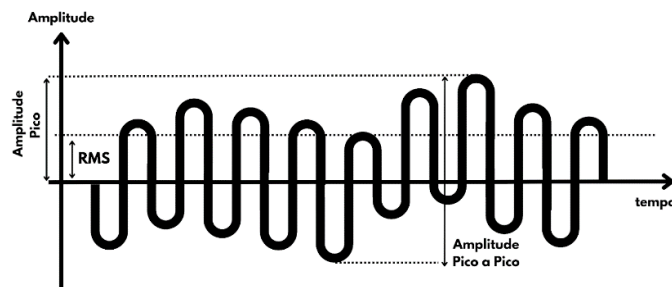
No gráfico da Figura 3 são apresentadas as principais características básicas fundamentais no que diz respeito à análise de vibrações sendo eles, o período (T) e a amplitude (A). Relacionado ao período, este consiste no tempo que é necessário para concluir um ciclo e pode ser determinado pelo inverso da frequência. Já a frequência consiste no número de vezes

em que ocorre um movimento completo num determinado tempo. Esta pode ser expressa em três unidades:

- ❖ Ciclos por segundo (Hz);
- ❖ Ciclos por minuto (CPM);
- ❖ Ordens, que corresponde ao número de ciclos por rotação da máquina.

Quando a amplitude de vibração se eleva isso é um indicador do estado do equipamento, esse parâmetro indica a severidade da vibração que nele está presente, ou seja, quanto maior for maior será a gravidade do problema. Esta amplitude pode ser expressa em valor de *pico*, *pico a pico* e *valor eficaz (RMS)*, conforme está ilustrado na Figura 4.

Figura 4. Formas de representação da amplitude



Fonte: Autoria Própria

O valor de pico é o valor máximo a partir do zero (positivo ou negativo). Logo, este pode ser tanto o valor máximo quanto o valor mínimo. O valor de pico a pico, é a distância entre o pico máximo e o pico mínimo indicando assim, o percurso máximo da onda. O valor de RMS de um sinal $x(t)$ pode ser definido pela seguinte expressão (Sinha 2015):

$$y_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^T x^2(t) dt}{T}} \quad (1)$$

onde T corresponde ao período do sinal $x(t)$. Quando o movimento é harmônico o valor de RMS será 0.707 do valor de pico. O RMS é tratado como a medida mais comum em relação à definição da amplitude de vibração. Isso ocorre devido ao fato de que, este parâmetro considera o histórico no tempo da onda e oferece um valor de nível, o qual é diretamente relacionado à energia contida e, portanto, à capacidade destrutiva da vibração, denominada severidade da vibração.

2.2.2. Principais falhas mecânicas em máquinas

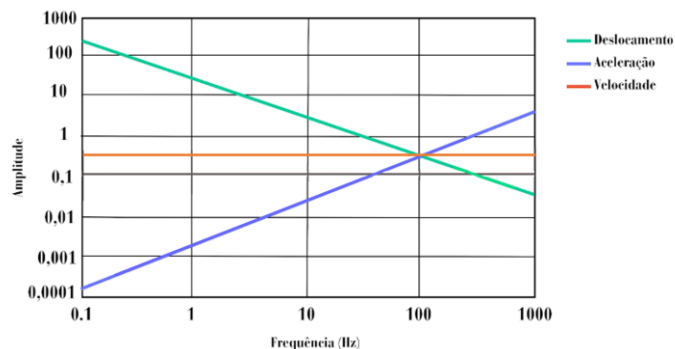
Os parâmetros para medir a amplitude de vibração são três:

- ❖ Deslocamento
- ❖ Velocidade
- ❖ Aceleração

Diante desses três tipos, existem restrições à utilização de cada um deles. A escolha do parâmetro a utilizar está relacionada com a frequência da vibração e com a condição do equipamento.

A Figura 5 apresenta um gráfico onde é demonstrada a utilização de cada parâmetro consoante a frequência do defeito considerando o mesmo nível de severidade para os três parâmetros.

Figura 5. Relação dos parâmetros para o mesmo nível de severidade



Fonte: Adaptado de Girdhar (2004)

Com base nas informações da Figura 5, nota-se que quando as frequências são baixas, deve-se utilizar o parâmetro deslocamento, pois este é mais sensível nessa gama de frequências. Em contrapartida, quando se analisam frequências intermediárias, deve-se utilizar o parâmetro velocidade e, em altas frequências, o parâmetro aceleração. Deste modo, obtêm-se os melhores resultados em termos da possibilidade de detectar fenômenos.

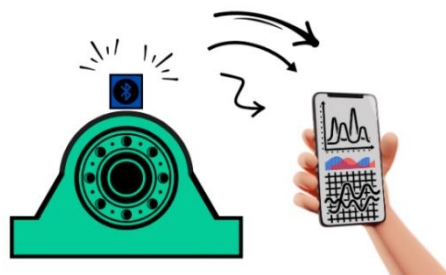
Como mencionado anteriormente, a análise de vibrações é uma das ferramentas disponíveis para determinar as condições de uma máquina. Ela consiste em um grande volume de dados sobre as possíveis falhas futuras ou sobre como um ativo se comporta. Conhecer esses dados é de extrema importância para a gestão de ativos. A partir desses dados obtidos, é possível diagnosticar uma série de defeitos em ativos com seus característicos espectros.

Para Glenn D. White, autor do livro *Introduction to Machine Vibration*, é preciso primeiro entender como a vibração pode ser utilizada para reproduzir a condição ou estado de um equipamento. Para ele, em uma máquina ideal, toda a energia é focalizada para a produção de trabalho, sem transformação em calor, ruído ou vibração. No entanto, em máquinas reais, a vibração pode ser entendida como o produto da transmissão normal de forças cíclicas na máquina. Quando os elementos do equipamento interagem, parte da energia é dissipada através da estrutura sob a forma de vibração. Dessa forma, quanto menor for essa perda de energia, mais eficiente é o sistema, ou seja, quanto menores forem os níveis de vibração, melhor.

O autor Glenn D. White (1997) faz uma analogia chamando a vibração de o “vilão” das máquinas, pois resulta da transmissão de forças internas no ativo, gerando acelerações em diversos sentidos, que por sua vez provocam desgaste nos componentes. Porém, para os outros autores analisados, essa analogia pode ser mais bem interpretada se compreendermos a vibração como o “sintoma” de uma doença sofrida pelas máquinas. Como cada conjunto de ativos possui um padrão ou espectro de frequência único, denominado assinatura de vibração, qualquer alteração nesse comportamento é considerada um sinal dessa doença. Nesse sentido, fica claro que é de extrema importância determinar o padrão inicial para considerar esses os padrões de normalidade do funcionamento desse ativo. Como resultado, esses dados são utilizados para o monitoramento futuro do equipamento. Ou seja, ao constatar uma alteração desse nível, alguma falha pode estar em desenvolvimento. Qualquer defeito em desenvolvimento altera a assinatura da máquina e, justamente por isso, a medição de vibração é uma excelente ferramenta para a manutenção preditiva e, conseqüentemente, gestão de ativos. Contudo, a partir da análise de vibração mais detalhada é possível diagnosticar a natureza do defeito, analisando métricas como o espectro de vibração da máquina.

A imagem da Figura 6 apresenta uma ilustração de como o monitoramento de máquinas é realizado de forma remota e sem a presença de cabos entre os componentes.

Figura 6. Monitoramento de sinais de vibração remoto



Fonte: Autoria Própria

Há um consenso entre os autores de que existem vários tipos de falhas, sendo que cada uma delas provoca uma mudança específica no espectro. Esses tipos são:

❖ Desbalanceamento

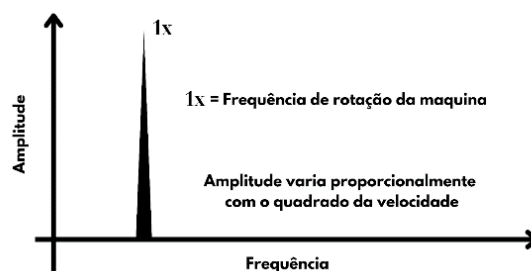
O desbalanceamento é definido pela International Standards Organization (ISO) como:

“Condição que existe no rotor quando vibração, força ou movimento é transmitido aos mancais como resultado de forças centrífugas”

Outra definição para o desbalanceamento é tratá-lo como uma distribuição desigual de massas ao longo do eixo do centro de massa do rotor. Este é o eixo sobre o qual o rotor deveria girar caso ele não fosse restringido pelos mancais, também conhecido como eixo principal de inércia. Quando o eixo do centro de massa do rotor coincide com o eixo físico do rotor, o rotor está balanceado e não há desbalanceamento.

Esse tipo de defeito geralmente é causado por balanceamento inadequadamente executado, o que causa um desbalanceamento residual. Além disso, o desbalanceamento pode ser causado por perdas de partes do rotor. Essas perdas normalmente ocorrem devido a depósito de material estranho em alguma das pás do rotor que causam um desbalanceamento das massas e uma excentricidade entre os componentes acoplados e outros. A vibração resultante de um desbalanceamento é observada em forma de um sinal de senoidal na própria frequência (ordem $x1$), como demonstra a Figura 7.

Figura 7. Espectro de Frequência típico de desbalanceamento



Fonte: Autoria Própria

O autor Glenn D. White (1997), em sua obra realizou várias considerações relacionadas a dados de diferentes situações de desbalanceamento. O autor ainda ressalta os três principais tipos de desbalanceamento, são eles:

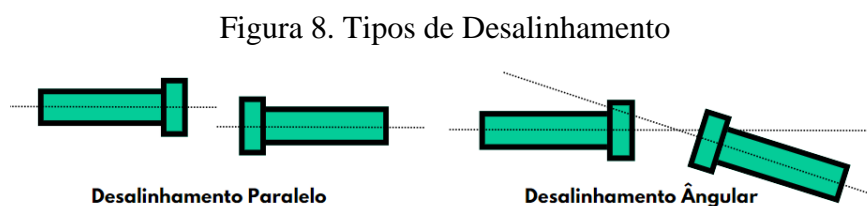
O Desbalanceamento Estático, que ocorre quando o eixo do centro de massa e o eixo do rotor são paralelos e pode ser modelado por uma massa desequilibrada sobre o plano perpendicular ao eixo físico do rotor e passa pelo seu centro de massa. Nesse tipo as vibrações radiais e axiais em um mesmo mancal estarão defasadas em 90° . Porém, as medições de um mesmo tipo de vibração (axial ou radial) feitas simultaneamente em ambos os mancais são estáveis e em fase.

O Desbalanceamento Acoplado, que é aquele em que o eixo do centro de massa e o eixo do rotor se interceptam no centro de massa do rotor e é caracterizado pela existência de massas desequilibradas diametralmente opostas, produzindo momentos iguais ao redor do centro de massa. Este tipo de desbalanceamento pode causar vibração axial e radial e quando medidas simultaneamente em ambos os mancais, as vibrações em um mesmo plano estarão defasadas em 180° .

O Desbalanceamento Dinâmico, é o cujo eixo do centro de massa e o eixo físico do rotor não se tocam ou coincidem.

❖ Desalinhamento

O desalinhamento é um problema inerente ao acoplamento entre dois eixos em uma máquina. Pode-se dividir esse defeito em dois tipos. O Desalinhamento Angular onde as linhas de centro dos dois eixos se cruzam formando um ângulo entre elas e o Desalinhamento Paralelo cuja linhas de centro dos eixos são paralelas entre si e apresentam um off-set. A Figura 8 apresenta ambos os tipos.

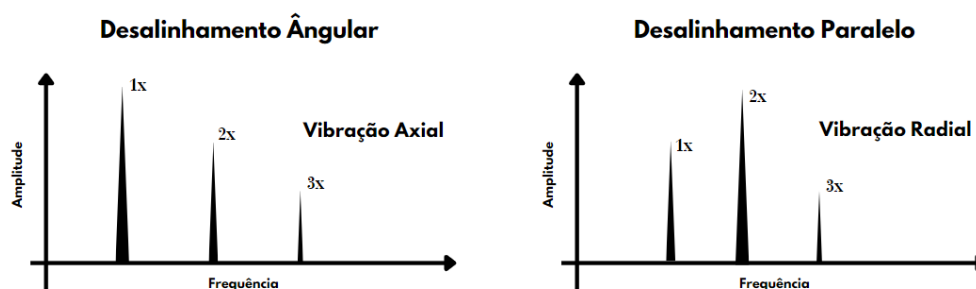


Em ambos os casos, os sintomas são semelhantes, embora o defeito de desalinhamento paralelo apresenta vibrações radiais mais elevadas, cujas fases se aproximam de 180° em cada lado do acoplamento.

O desalinhamento possui uma característica peculiar, pois o acoplamento do eixo possui a capacidade de absorver o desalinhamento e devido a isso, a vibração só se manifesta quando

as forças provocadas pelo desalinhamento são transmitidas ao rotor e mancais sob a forma de pré-carga. No espectro de frequência é possível observar a presença de desalinhamento na componente de segunda ordem, $X2$, principalmente em casos de acoplamento de engrenagens, podendo ser observada uma elevação da componente relacionada a frequência da máquina, $X1$. Infelizmente, ao ocorrer essa elevação na primeira ordem, é comum isso levar a dúvida quanto a fonte de vibração, ou desalinhamento e desbalanceamento. A Figura 9 mostra o espectro característico da falha de desalinhamento.

Figura 9. Espectro de Frequência típico de desalinhamento angular e paralelo



Fonte: Autoria Própria

De modo geral, quando o desalinhamento se agrava, podem surgir picos de grande amplitude em harmônicos mais altos ($3X$ à $8X$). A forma do espectro sofrerá influência direta do tipo do acoplamento. Quando cargas radiais, devidas ao desalinhamento, aumentam, a órbita registrada pelo eixo se torna mais achatada, com formato elipsoidal. Se as cargas radiais continuarem aumentando, a partir de um ponto, a órbita pode apresentar laços de tamanhos variados.

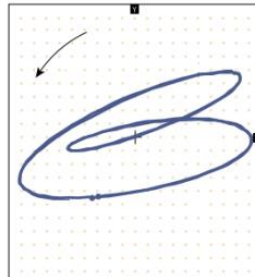
Em casos de eixos cujos suportes dos mancais são colineares pode ocorrer um aquecimento excessivo do mancal devido à fricção constante entre as partes do eixo e o interior do mancal.

❖ Instabilidade e Chicote de Óleo (Oil Whirl and Whip)

Esses problemas pertencem ao chamado grupo das vibrações sub síncronas, ou seja, aquelas cujas frequências estão abaixo da rotação das máquinas são consideradas auto excitadas e caracterizam-se pela incapacidade de os mancais manterem o rotor numa posição estável e são muito comuns em máquinas equipadas com mancal de deslizamento com lubrificação hidrostática, operando a altas velocidades.

Com a métrica de orbitais há o surgimento de laços internos e o surgimento de componentes sub-harmônicas 1X (de 0,3X a 0,6X aproximadamente) com predominância nas componentes de frequência direta. A Figura 10 apresenta um exemplo da situação de *Whirl* em um mancal de rolete de acionamento de um transportador de correia (TC).

Figura 10. Diagrama de Órbita de mancal de rolete de acionamento de um TC



Fonte: Autorial Própria

Esse defeito geralmente ocorre devido a deficiência de lubrificação do mancal. Essa falta torna insuficiente o suporte dado pelo filme de óleo ao rotor e gera um atrito direto entre o rotor e o interior do mancal. Com isso, há geração de vibrações em alta frequência, sendo que os harmônicos podem ou não estar presentes. Entretanto, esse fenômeno mancal não é facilmente detectável, mas apresenta espectro característico de que a frequência de vibração do conjunto rotor/mancal alcança níveis de vibração elevados. No espectro observa-se a predominância das componentes diretas com harmônicos e sub-harmônicos da velocidade de rotação. A principal característica é o pico na frequência de ressonância do rotor

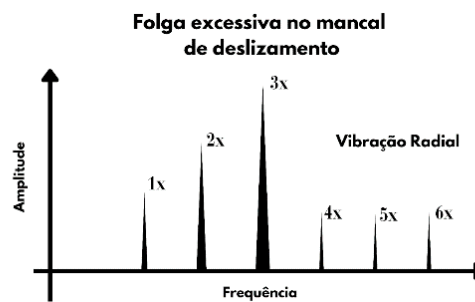
A vibração causada pelo *Oil Whirl* muitas vezes acaba por causar o rompimento do filme de óleo e, por conta disso, na falha no mancal. Isso ocorre devido a frequência de vibração provocada pelo *Oil Whirl* se aproxima da crítica do conjunto rotor/mancal, os níveis de vibração atingem amplitudes elevadas, culminando na falha. Esse fenômeno é altamente instável e destrutivo para o mancal.

❖ Folgas

Os casos mais comuns de vibração provocada pela existência de folga entre componentes são: folga entre a caixa dos mancais e a carcaça da máquina. O espectro característico desse tipo de defeito caracteriza-se quando há a reprodução da componente de $\frac{1}{2}$ ordem e/ou a geração de grande quantidade de harmônicos.

Em alguns casos de acoplamento com folgas excessivas. Ao medir simultaneamente a vibração axial nos mancais em cada lado do acoplamento, observa-se que os sinais estarão defasados em 180° e um pico na frequência 3X no espectro do sinal de vibração radial. A Figura 11 apresenta o sinal característico do defeito de folga.

Figura 11. Espectro de frequência típico de folga

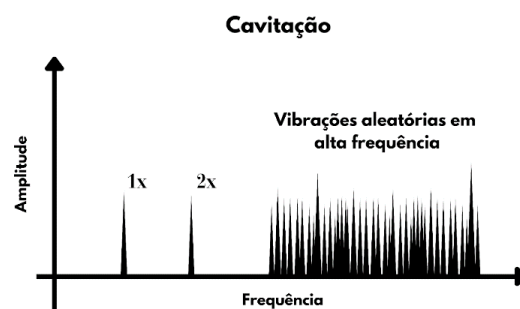


Fonte: Autoria Própria

❖ Cavitação

A cavitação é um fenômeno que ocorre devido a um grande número de bolhas que se formam na água dentro da turbina ou no duto de adução. Essas bolhas são formadas por gases que, sob pressão, podem se dissolver no líquido. Quando a pressão do líquido é reduzida, esses gases escapam, formando as bolhas. O mesmo ocorre quando a pressão absoluta interna da bomba diminui rapidamente. Quando essas bolhas se chocam com as paredes da bomba ou com as pás do rotor, elas se condensam. A implosão das bolhas gera impactos que tendem a causar vibrações aleatórias em alta frequência, como ilustrado na Figura 12.

Figura 12. Espectro de frequência típico de cavitação



Fonte: Autoria Própria

Em seu estudo, Escaler et al. (2006) mostraram que as técnicas mais comuns para detectar cavitações consistem no estudo da vibração, da emissão acústica e dos níveis de pressão dinâmica na turbina, em altas faixas de frequência.

2.2.3. Técnicas de Monitoramento de Vibrações

O monitoramento de equipamentos para análise de vibrações desempenha um papel fundamental na manutenção preditiva e na avaliação da integridade estrutural de uma grande variedade de ativos. Portanto é importante destacar as principais métricas utilizadas nos ambientes industriais e as próximas tendências a serem adotadas.

De modo geral, as técnicas de identificação de defeitos por análise de vibração podem ser divididas em três grandes grupos de acordo com o domínio cujo sinal é tratado e analisado. Portanto, são essas técnicas no domínio do tempo, no domínio da frequência e no tempo-frequência, sendo essa última mais recente (Bezerra, 2004).

Avanços dessas técnicas possibilitam aprimorar a eficiência operacional e a segurança, reduzindo os custos de manutenção e minimizando o tempo de inatividade (Chen et al., 2019). Contudo, o estudo e a aplicação dessas técnicas e métricas de análise de vibração continuam a desempenhar um papel crucial na garantia do desempenho confiável de ativos e estruturas.

2.2.3.1. Análise de Severidade a partir do Nível Global

A forma mais simples e muito aplicada na indústria, consiste em medir o nível global do sinal, onde a ocorrência de qualquer defeito provoca uma alteração do nível global da vibração característica, pertencentes a cada máquina, provocando alterações deste parâmetro. Isto é, quando há uma mudança ocorre no valor global e ele aumenta, possivelmente indica o aumento da severidade de um defeito. Para acompanhar o comportamento de ativos, os responsáveis pelo setor de manutenção utilizam essa métrica, essas medições sistemáticas visam avaliar a intensidade das vibrações e se elas estão dentro das faixas de aceitação.

O monitoramento de ativos com base no nível global de vibração é uma técnica essencial para determinar o aparecimento de falhas. Em seu estudo Lenzi (1991) afirma que o nível global obtido no ponto de vibração representa um primeiro passo do monitoramento de vibrações, proporcionando informações básicas para a verificação das condições de funcionamento e para o acompanhamento das variações destas. Ele ainda ressalta que é um procedimento simples, rápido, dispensa pessoal qualificado, bem como equipamentos mais sofisticados. Entretanto, o autor considera que esse tipo de métrica apresenta desvantagens que limitam a capacidade de identificação de defeitos. Para o autor, essa técnica permite apenas detectar desbalanceamentos, desalinhamentos grosseiros e eixos exageradamente tortos, defeitos que produzem altos níveis de vibração. Mas, para falhas incipientes que produzem baixos níveis de vibração, que são

mascarados pelos altos níveis de vibração produzidos por outros defeitos, é difícil a identificação.

Em Kaplun (2019), o autor considera que uma das desvantagens da análise de severidade a partir do Nível Global é não efetuar uma análise espectral e ser insensível às vibrações de altas frequências, o que o torna inviável para a análise de muitos tipos de defeitos. Porém, o autor coloca que método de nível global possui vantagens apreciáveis e constituem um processo perfeitamente válido em várias aplicações. Esse processo é confiável e permite que sejam tomadas providências muito antes de atingir uma fase perigosa da falha. Portanto, este método é adotado como estágio inicial, para métodos mais elaborados, que permita o estabelecimento de um diagnóstico, ele não se aplica, pois o método de nível global não permite estabelecer a origem da falha que originou a vibração.

Na gestão de ativos a análise de severidade a partir do nível global é utilizada para perceber o aumento na vibração global do ativo. Uma ferramenta valiosa nesse processo é a Matriz de Risco, que ajuda a quantificar e classificar o impacto das falhas em ativos e sistemas.

A Matriz de Risco é uma metodologia de classificação das falhas, ela as organiza em categorias, geralmente de baixo a alto risco. À medida que as vibrações ultrapassam os limites aceitáveis, um alerta é acionado. A Matriz de Risco é então usada para avaliar a severidade da falha com base nas consequências que essa falha pode ter em termos de segurança, custos de reparo, tempo de inatividade e outros fatores.

A análise de severidade a partir do nível global de vibração, juntamente com a Matriz de Risco, ajuda a priorizar a manutenção e alocar recursos de forma eficiente. Isso permite que as equipes de manutenção concentrem seus esforços nas áreas de maior risco, reduzindo os custos e melhorando a confiabilidade operacional. Em última análise, essa abordagem contribui para um ambiente de produção mais seguro e eficiente. A Figura 13 apresenta a matriz de risco exemplificada pela norma ISO 10816-3 (2009).

Figura 13. Matriz de risco

Matriz semi-qualitativa de risco		Consequências				
		Desprezível	Marginal	Média	Crítica	Externa
Probabilidade	Quase Certo	11	16	20	23	25
	Provável	7	12	17	21	24
	Possível	4	8	13	18	22
	Pouco Provável	2	5	9	14	19
	Rara	1	3	6	10	15

■ Trivial
■ Aceitável
■ Moderado
■ Substancial
■ Intolerável

Fonte: ISO 10816-3 (2009)

2.2.3.2. Análise no Domínio do Tempo

A Análise no Domínio do Tempo é uma abordagem que se concentra na investigação de sinais e dados em relação ao tempo. Nesse método, os fenômenos são observados e estudados em termos de sua evolução temporal. A análise no domínio do tempo permite examinar a forma de onda, a periodicidade, a amplitude e outras características temporais dos dados, proporcionando dados cruciais para entender e controlar sistemas dinâmicos.

- **Valor de Pico**

O Valor de Pico é uma medida que representa o ponto mais alto de amplitude em um sinal vibratório, ele é vital na detecção de picos anômalos associados a defeitos em máquinas. Nesse sentido, Valor de Pico excede limites predefinidos, isso sinaliza a necessidade de ações de uma avaliação mais crítica. O valor de pico é utilizado para elaboração de outras métricas como o Fator de crista e o Fator k.

- **Raiz Quadrada da Média do Quadrado (RMS)**

O Valor RMS (Root Mean Square) é uma métrica amplamente utilizada na análise de vibração para avaliar os níveis globais estatísticos das vibrações. Esse valor fornece uma medida eficaz da amplitude média das vibrações ao longo do tempo, ajudando a quantificar o nível de vibração global em um sistema. Ele é um método eficiente especialmente para indicar se houve um aumento na energia do sinal. Como mencionado por Barilli (2013), as vibrações globais podem evoluir nos estágios finais de falha, o que limita a capacidade do Valor RMS de detectar defeitos em estágios iniciais. A Equação 2 apresenta a relação para cálculo do RMS.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (2)$$

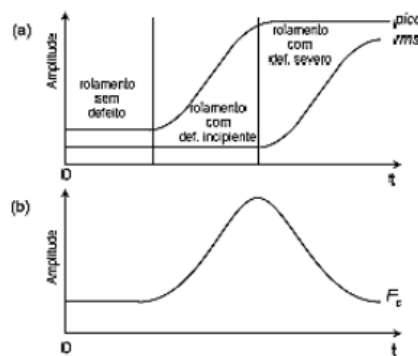
Embora o valor rms não seja capaz de indicar a localização da falha incipiente, o rms é amplamente aplicado na indústria para monitorar a condição de equipamentos. Por exemplo, em máquinas de atividade em mineradoras, como transportadores de correia, é comum o setor de confiabilidade de ativos avaliar a vibração de um equipamento pelo rms, e então acompanhar o aumento na amplitude das vibrações, o que pode ser indicativo de desequilíbrio, desalinhamento, folga ou desgaste de roletes. Nessa análise, quando o rms ultrapassa limites pré-definidos, um planejamento de manutenção do ativo é determinado para ajustes a fim de evitar falhas catastróficas e reduzir o tempo de inatividade do ativo. Portanto, o Valor RMS desempenha um papel importante na manutenção preditiva e na confiabilidade operacional em uma variedade de aplicações industriais.

- **Fator de Crista (FC)**

O Fator de Crista é uma métrica na análise de vibrações que desempenha um papel significativo na detecção de defeitos em rolamentos. O FC representa a relação entre o valor de pico da vibração e o valor RMS do sinal como representa a Figura 20, geralmente examinado em uma determinada faixa de frequência.

$$FC = \frac{X_{pico}}{X_{rms}} \quad (3)$$

Figura 14. Relação entre o valor de pico da vibração e o valor RMS



Fonte: Bezerra (2004)

Segundo Bezerra (2004), existe uma relação para descrever o comportamento e classificar o Fator de Crista de um equipamento. Ele observou que com o surgimento de um defeito no rolamento, o valor de pico cresce mais que o Valor RMS, o que resulta no aumento do fator de crista. Essa relação é apresentada na Figura 14.

É notado por Bezerra (2004) também que, com o surgimento mais severo do defeito no rolamento, o Valor RMS aumenta mais que o valor de pico, isso resulta em uma redução do fator de crista. Logo, o autor conclui que o fator de crista não é um bom indicador de falhas severas. Entretanto, quando um rolamento está em boas condições, o Fator de Crista tende a estar dentro do intervalo de 2 a 6 e sua súbita elevação é um indicativo claro de problemas.

- **Fator K**

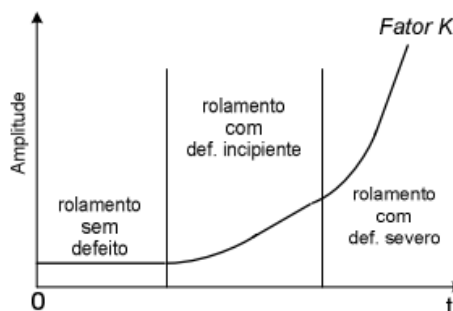
Essa métrica é utilizada na análise de vibrações e é utilizada na resolução de problemas associados ao Fator de Crista. Como discutido anteriormente o Fator de Crista é a razão entre o valor de pico da vibração e o valor RMS do sinal e apresenta suas limitações, especialmente na detecção de defeitos em estágios iniciais de desenvolvimento. E para abordar essas limitações, o Fator K foi introduzido. O Fator k é definido como o produto entre o valor RMS e o valor de pico das vibrações. A expressão matemática que descreve o Fator K é a seguinte:

$$F_k = X_{pico}X_{RMS} \quad (4)$$

Esse parâmetro leva em consideração tanto a amplitude média das vibrações quanto os valores de pico, fornecendo uma métrica mais abrangente e sensível. Por esse motivo, o Fator K é valioso na detecção de defeitos em máquinas, uma vez que permite uma análise mais detalhada e eficaz das vibrações.

A Figura 15 ilustra o desenvolvimento do Fator K ao longo do tempo desenvolvido de Bezerra (2004). Essa representação gráfica demonstra como o valor do Fator K pode variar à medida que as condições das máquinas se alteram, o que torna importante o seu acompanhamento contínuo.

Figura 15. Fator K



Fonte: Bezerra (2004)

- **Curtose**

A Curtose é um conceito estatístico usado na análise de vibrações e detecção de falhas em máquinas, especialmente em rolamentos. A curtose é o quarto momento estatístico central normalizado pelo desvio padrão, elevado à quarta potência. Para defeitos em rolamentos, um rolamento em condições normais exibe uma distribuição Gaussiana de aceleração, representando a aleatoriedade esperada. No entanto, quando um rolamento desenvolve defeitos, essa distribuição se torna não gaussiana devido ao aumento de picos de aceleração.

A Equação da densidade de probabilidade, representada como $p(x)$, e o cálculo da Curtose (k) são apresentadas na Equação 5 e 6.

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x(t) - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (5)$$

$$k = \left[\frac{m}{\sigma}\right]^4 = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{+\infty} [x(t) - \mu]^4 p(x) dx \quad (6)$$

É importante observar que a Curtose diminui à medida que o defeito se torna mais avançado. Isso ocorre porque as características da vibração mudam à medida que as falhas progridem, resultando em uma distribuição de aceleração menos aguda e picos discretos menores.

A análise da Curtose é uma ferramenta valiosa na manutenção preditiva, pois permite a detecção precoce de defeitos em rolamentos e máquinas. Quando o valor da Curtose excede os níveis aceitáveis, as equipes de manutenção podem intervir a tempo de evitar falhas catastróficas e minimizar o tempo de inatividade na indústria.

2.2.3.3. Análise da Domínio da Frequência

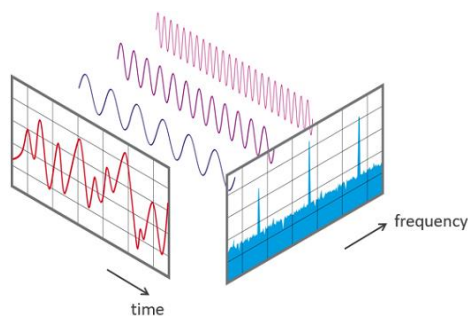
A Análise no Domínio da Frequência é uma técnica muito utilizada na engenharia e ciências que se concentra na decomposição de sinais e dados em suas componentes de frequência. Diferentemente da análise no domínio do tempo, que se concentra na evolução temporal dos sinais, a análise no domínio da frequência examina como diferentes frequências contribuem para um sinal. Isso é feito por meio de técnicas como a Transformada de Fourier, que converte sinais do domínio do tempo em seu equivalente no domínio da frequência. Essa abordagem é fundamental em uma variedade de aplicações, incluindo processamento de sinais, comunicações, acústica e análise de vibrações.

- **Transformada de Fourier**

A Transformada de Fourier consiste na decomposição de sinais de vibração complexos em suas componentes de frequência individuais. Ela é amplamente usada para entender as características das vibrações, identificar padrões e detectar anomalias em sistemas mecânicos. Ela funciona transformando um sinal no domínio do tempo em seu equivalente no domínio da frequência. Isto é, desmembra um sinal de vibração em suas diferentes frequências componentes, revelando as frequências naturais ou harmônicas presentes nas vibrações.

A Figura 16 mostra a representação do sinal de espectro da Transformada de Fourier em relação ao sinal em domínio do tempo.

Figura 16. Transformada de Fourier em relação ao sinal em domínio do tempo



Fonte: Autoria Própria

Com essa técnica é possível identificar as frequências associadas a defeitos ou problemas específicos. Por exemplo, quando um rolamento está com problemas, pode gerar vibrações a frequências características que indicam o defeito na pista interna, nos elementos girantes ou outros defeitos (Qiu, 2015). Além de rolamentos a Transformada de Fourier é utilizada para uma grande variedade de aplicações. Randall (2002), destaca a importância da Transformada de Fourier na identificação de falhas em engrenagens. A análise de frequência resultante da Transformada de Fourier é representada em um espectro de frequência, onde as amplitudes são plotadas em função da frequência. Ele demonstra como a técnica pode ser usada para detectar picos de frequência associados a problemas de desalinhamento e desgaste nas engrenagens.

Além disso, a Transformada de Fourier pode ser aplicada a diferentes domínios, como o domínio do tempo discreto (usando a Transformada Discreta de Fourier - DFT) ou o domínio contínuo (usando a Transformada Contínua de Fourier - CFT).

- **Análise de Densidade Espectral (Power Spectral Density - PSD)**

O PSD é uma abordagem comumente aplicada na análise de vibrações para determinar a distribuição das frequências em um sinal. Ela é especialmente útil na identificação de frequências naturais de ressonância, bem como na detecção de componentes defeituosos em máquinas, como rolamentos desgastados ou engrenagens danificadas.

Essa análise é realizada por meio da Transformada de Fourier, e a partir dessa análise, é possível identificar picos no espectro de densidade espectral que correspondem às frequências dominantes no sinal. A magnitude desses picos está relacionada à amplitude das vibrações a essa frequência específica.

Segundo Saini (2015) A função PSD calcula a potência total contida em cada componente espectral de um determinado sinal. O autor considera que em uma onda senoidal de alguma frequência fixa o gráfico de PSD incorpora apenas uma componente espectral que está presente nessa frequência selecionada. De maneira simplificada, o espectro de potência de qualquer sinal de domínio de tempo determina a distribuição da variância dos dados no domínio da frequência e a distribuição da variância dos dados domínio de frequência, na forma de componentes espectrais nas quais o sinal real pode ser decomposto.

3. INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAMENTO DE VIBRAÇÃO

O monitoramento de vibração é muito importante para manutenção preditiva e para o diagnóstico de problemas em máquinas e sistemas mecânicos. Para realizar essa tarefa com eficiência, são necessários equipamentos especializados que possam capturar, processar e analisar os sinais de vibração de forma precisa e confiável. Ao longo das últimas décadas, houve avanços significativos na tecnologia de sensores e equipamentos utilizados para esse fim. Equipamentos modernos de monitoramento de vibração são capazes de coletar dados em tempo real, permitindo uma análise contínua do estado de máquinas e equipamentos

Para realizar a análise de vibrações, é necessário recorrer a equipamentos de medição capazes de medir o sinal vibratório. Estes equipamentos são denominados sensores. Esses aparelhos são capazes de converter um tipo de energia num tipo de energia diferente. Na análise de vibrações, o sensor irá converter a vibração num sinal elétrico (Blaquez e Barbosa 2015).

3.1. TIPOS DE SENSORES DE VIBRAÇÃO

Em seu estudo Blaquez e Barbosa (2015) classificam os sensores usados para estudo de vibração em três tipos mais utilizados, são estes: sensores de deslocamento, velocidade e aceleração, sendo este último o mais utilizado. Os autores ainda salientam que uma das ações mais importantes durante a recolha de dados é a seleção do sensor, que melhor se adapta às condições operacionais do sistema em análise. Uma vez que, cada sensor pode apresentar vantagens para certas aplicações e limitações a outras situações, ou seja, não existe um sensor que satisfaça todas as aplicações

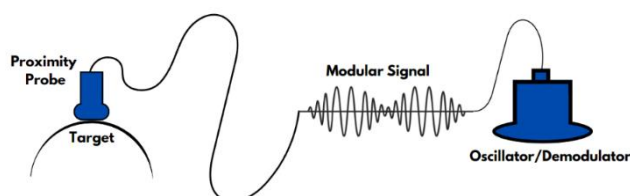
3.1.1. Sensores Deslocamento

Esses sensores são principalmente utilizados para detectar modificações na posição de sistemas, mas também podem ser utilizados para detectar diferenças de posição de um componente rotativo, em relação a um estacionário. E por esse motivo, são normalmente utilizados para medir vibrações relativas e para controle de vibrações em máquinas rotativas equipadas com chumaceiras de deslocamento (Scheffer & Girdhar 2004).

Um sistema de corrente de Foucault, é composto por um sensor, um cabo de extensão e um oscilador/ demodulador. Um sinal de alta frequência (2 MHz), é gerado pelo oscilador/ demodulador, sendo emitido na ponta do sensor. Em seguida, correntes de Foucault são geradas na superfície do veio. O oscilador/demodulador demodula o sinal e proporciona uma tensão DC

modulada, em que a essa porção, é diretamente proporcional à distância medida e a porção AC é diretamente proporcional à vibração medida (Scheffer & Girdhar 2004). Desta forma, um transdutor de corrente de Foucault pode ser utilizado, tanto para medir distâncias, como para medir vibrações (Scheffer & Girdhar 2004). O sistema de Foucault é apresentado na Figura 17.

Figura 17. Esquema de um sistema Foucault



Fonte: Adaptado de Scheffer & Girdhar (2004)

3.1.2. Sensores de Velocidade

Esses sensores são muito utilizados para controlar o nível de vibrações de máquinas rotativas. Eles possuem uma instalação fácil e, quando comparados com os outros sensores, estes são mais baratos. Estes sensores são compostos por três componentes: um íman, uma bobina e por molas que suportam o íman. Por esse motivo, quando o sensor é colocado sob a superfície do equipamento a ser analisado o movimento relativo entre o íman estacionário e a bobine (que vibrará em sincronismo com a máquina) fará com que, as linhas magnéticas do ímã atravessem a bobina, o que induzirá uma tensão na bobina proporcional à velocidade de vibração (Scheffer & Girdhar 2004).

Esse tipo de sensor possui uma sensibilidade constante numa gama de frequências específica geralmente entre 10 Hz e 1 kHz (Scheffer & Girdhar 2004). Em frequências fora dessa faixa a sensibilidade diminui, o que originará que as medições sejam pouco precisas.

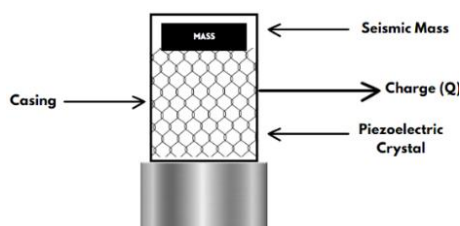
Para Scheffer & Girdhar (2004), esse tipo de sensor possui certas vantagens como a maior facilidade de instalação, sinais fortes dentro de uma determinada faixa de frequência, sem necessidade de alimentação externa. Porém, os autores reforçam que as desvantagens desse tipo de sensores estão associadas à sua estrutura grande e pesada, sua sensibilidade à frequência de entrada e alta sensibilidade a campos magnéticos.

3.1.3. Sensores Acelerômetros

Esse tipo de sensor são os mais utilizados para a medição de vibrações. Os acelerômetros mais utilizados são os piezoelétricos. Estes são constituídos basicamente por um cristal

piezoelétrico e por uma pequena massa, normalmente fechada numa caixa metálica protetora (Crocker, 2007). A mola é um elemento piezoelétrico de alta rigidez que produz uma carga proporcional à força física exercida pelas forças inerciais da massa. Consequentemente, acelerômetros piezoelétricos podem ser considerados sistemas de um único grau de liberdade levemente amortecidos. A Figura 18 ilustra um acelerômetro piezoelétrico.

Figura 18. Interior de um acelerômetro



Fonte: Sinha (2015)

Seu funcionamento se dá ao ficar em contato com o sistema, este ficará sujeito à vibração do mesmo. Assim, a massa no seu interior exerce uma força variável sobre o cristal piezoelétrico, força essa que é proporcional à aceleração da vibração sofrida E , por sua vez, a carga produzida pelo cristal é proporcional à vibração do equipamento (Sinha 2015). Nesse sentido, o tamanho do sistema acelerômetro é uma variável importante a considerar dado que, irá influenciar a sensibilidade do mesmo. Sendo a sensibilidade a relação entre o sinal de entrada e o de saída, ou seja, representa a forma como varia o sinal de saída com a variação do sinal entrada, logo, quanto maior for o acelerômetro maior será a sua sensibilidade e, por outro lado, menor será a gama de frequência máxima utilizável (Sequeira 2013).

Acelerômetros piezoelétricos possuem uma resposta de frequência plana e normalmente as medições são limitadas ao uso da parte linear da curva de resposta, que no extremo de alta frequência é limitada pela ressonância natural do acelerômetro. Como regra geral, o limite superior de frequência para medições é de 20%, 30% e 50% da frequência ressonante para erros de 5%, 10% e 30% (ou 3 dB) nas frequências. Os valores reais dependem do tipo específico de acelerômetro e as frequências associadas a um erro específico geralmente são fornecidas nas especificações do acelerômetro (Miller et al, 2018).

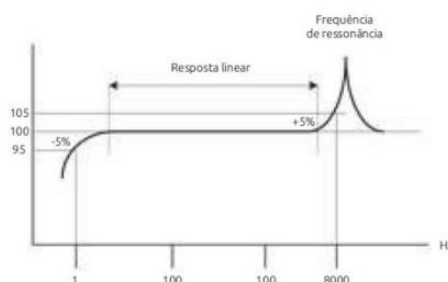
Para selecionar um acelerômetro há parâmetros especiais levando em consideração a aplicação pretendida. Os parâmetros em questão são os seguintes:

- ❖ Gama de frequências;

- ❖ Sensibilidade;
- ❖ Ressonância
- ❖ Tensão de polarização
- ❖ Gama de temperaturas;
- ❖ Dynamic range;

A Figura 19 apresenta um exemplo de uma curva de sensibilidade de um acelerômetro.

Figura 19. Curva de Resposta do acelerômetro



Fonte: Siqueira (2013)

Na Figura 19 pode-se verificar que os acelerômetros possuem certas condições de funcionamento em que a sua resposta é linear. Desse modo, as medições deverão ser efetuadas nesse intervalo, pois é nessas condições que está associada a garantia de que, os valores medidos, são efetivamente proporcionais à vibração existente. Em regiões de frequência fora dessa zona de resposta linear existem outras duas zonas não lineares, uma para as baixas frequências e outra para as altas frequências.

Esses sensores possuem muitas vantagens como: fácil instalação, pequenos e leves, possuem uma robustez e resistentes ao choque, quedas, umidade, poeiras, óleo e outras agressividades ambientais e de manuseamento o que os deixam apropriados para ambientes fabris. Além disso, os acelerômetros são pouco sensíveis a vibrações laterais, transversais e a campos magnéticos. Para Roque (2007) esse tipo de sensores tem desvantagens na sua utilização são estas: necessidade de condicionar o sinal, relação sinal/ruído limitada, possibilidade de saturação a altas frequências e são sensíveis à temperatura.

Cada vez mais os acelerômetros estão aumentando a tecnologia e ficando mais produtos robustos, resistentes a ambientes hostis e menores, o que aumenta a gama de aplicações desses sensores. Além disso, cada vez mais esses sensores possuem uma ampla resposta de frequência.

3.2. INSTALAÇÃO DE ACELERÔMETROS

A instalação dos acelerômetros é realizada tendo em conta o preconizado na Norma ISO 5348 (1998), que descreve os cuidados a ter com a vibração transmitida ao acelerómetro, o tipo de fixação. Além disso, deve ser levado em consideração o tipo de fixação que melhor se aplica a cada aplicação. Uma vez que, a forma de fixação do sensor pode impactar diretamente nos sinais de vibração obtidos. Dessa forma, as análises de monitoramento desse ativo são diretamente afetadas pela forma de fixação. Logo, para garantir o funcionamento adequado do sistema é importante conhecer a influência da forma de fixação sob a precisão dos sinais de vibração obtidos.

A norma ISO 5348 (1998) aborda questões específicas relacionadas à medição das vibrações. A norma destaca a importância de usar instrumentação apropriada para medir as vibrações e obter dados precisos. Além disso, a norma fornece orientações sobre o posicionamento correto dos acelerômetros nos pontos de medição, o que é crucial para garantir que as vibrações sejam registradas com precisão e que os resultados reflitam as condições reais.

Para Sequeira (2013) ao realizar a instalação de sensores de vibração um dos aspectos mais importantes é a escolha dos pontos de leitura para a recolha dos sinais vibratórios dado que, uma má decisão poderá originar erros de leitura. Portanto, a seleção dos pontos deve ser planejada levando em consideração as características construtivas ou processuais e a acessibilidade do equipamento em análise (Sequeira, 2013).

4. TIPOS DE FIXAÇÃO DE ACELERÔMETRO

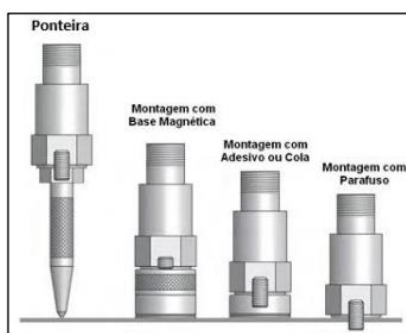
Um aspecto importante a ser considerado é que o uso de acelerômetros para monitorar as vibrações de máquinas envolve a seleção da montagem do sensor na estrutura. Acelerômetros podem ser fixados em estruturas de várias maneiras. Portanto, o método de fixação escolhido afetará a faixa de frequência utilizável do acelerômetro. Nesse contexto, os acelerômetros dependem da forma de fixação para atuar na performance estabelecida por seus respectivos fabricantes. Contudo, existem quatro tipos de montagem principais:

- ❖ Montagem parafusada;
- ❖ Montagem com base magnética;
- ❖ Montagem com adesivo ou cola;
- ❖ Utilização de ponteira.

Cada tipo de montagem tem um campo de aplicação específico, que depende, por exemplo, das condições da superfície de montagem, da temperatura e da acessibilidade ao ponto de montagem específico. A seleção da montagem tem um efeito significativo na precisão da resposta de frequência utilizável. Isso ocorre porque quanto maior for a rigidez da fixação, maior será o limite de frequência de corte da montagem.

A Figura 20 apresenta as principais formas de montagem.

Figura 20. Principais formas de montagem de acelerômetros



Fonte: (Collection CTC, 2022)

A escolha do modo de montagem também depende do equipamento, das suas características e da acessibilidade ao mesmo.

É interessante observar que, apesar dos milhares de artigos descrevendo como tratar o sinal de vibração, apenas alguns se concentram na configuração correta dos sensores de

vibração (Bowers, 1991). Dytran (2015) e *Introduction to Piezoelectric Accelerometers* destacam que esse aspecto prático deveria ser abordado em cursos universitários de análise de vibração, por meio de experiência pessoal ou de informações fornecidas pelos fornecedores de acelerômetros. A configuração de montagem depende principalmente dos requisitos de medição, como a faixa de frequência a ser analisada. Outros fatores a serem considerados são a localização de montagem, restrições, acessibilidade e temperatura

4.1. MONTAGEM PARAFUSADA

Entre os tipos de montagem, o aparafusado é considerado a melhor solução, uma vez que, este é o que fornece uma resposta em frequência mais ampla, assim como, é o mais seguro e confiável em termos de montagem. Entretanto, a sua maior desvantagem é a de a superfície precisar de ser maquinada.

Para aplicação do parafuso é necessário que a superfície seja plana e tenha um tamanho 1,1 vezes maior do que o diâmetro da superfície de montagem do sensor (*Installation of vibration sensors – Wilxcon, 2019*). Além disso, ainda segundo o manual, o furo deve ser perpendicular dentro de 1° do ponto de montagem e ter pelo menos duas roscas a mais do que o parafuso para evitar espaço entre o sensor e a superfície de montagem e o torque deve ser adequado, uma vez que um torque insuficiente no sensor reduz a rigidez da conexão e um torque excessivo pode causar danos permanentes às roscas do sensor.

Em aplicações fora de aplicações regulares de monitoramento de ativos raramente a montagem por parafusos é utilizada. Isso ocorre devido ao fato de que, para instalação do parafuso é preciso realizar furação na superfície. Em aplicações, como danos estruturais, conforto humano e ruído gerado pelo solo (ou pela estrutura), perfurar e rosquear furos de montagem na superfície de teste muitas vezes não é possível, é impraticável e consome muito tempo (Miller, 2018).

Em aplicações práticas o parafuso é escolhido como forma de fixação quando o sensor irá ser posicionado de forma permanentemente e é necessária precisão em altas frequências. Para outras aplicações os métodos de montagem com adesivos ou magnéticos são não destrutivos e tornam-se aplicações mais práticas e, portanto, amplamente utilizados.

4.2. MONTAGEM COM BASE MAGNÉTICA

A montagem com base magnética é uma das mais utilizadas, sendo tipicamente empregada em medições temporárias devido à sua boa fixação e facilidade de remoção rápida. No entanto, por esse motivo, esse método não é recomendado para montagens permanentes, pois a fixação maleável pode ser inadvertidamente movida de sua posição. Além disso, as múltiplas superfícies e materiais do ímã podem interferir nos sinais de alta frequência (Miller, 2018).

Como mencionado anteriormente, a forma de fixação do acelerômetro afeta diretamente sua performance. Ao tratar da fixação magnética, as especificações da faixa de frequência utilizável são limitadas e muitas vezes genéricas, não considerando as diferentes bases magnéticas disponíveis no mercado e suas particularidades para fixação de acelerômetros. No entanto, considera-se que as bases magnéticas com superfícies planas sejam adequadas para locais planos e as configurações de trilho duplo para superfícies curvas. Sobre esse assunto, pouco comentado, este trabalho reforça a importância de uma abordagem mais aplicável às necessidades da indústria.

Para compreender o nível de influência do uso do ímã e do conjunto da base magnética, é preciso considerar os possíveis efeitos do tamanho, força ou massa do ímã em relação à massa do acelerômetro. É importante também comparar a resposta de frequência com diferentes tipos de fixação.

4.2.1. Principais Vantagens da Fixação Magnética

A fixação magnética é uma técnica muito utilizada em diversas aplicações práticas. Na literatura uma série de estudos e artigos de pesquisa têm destacado suas principais vantagens como sendo a maior facilidade de Instalação e Reposicionamento quando preciso. Esse tipo de fixação é rápida e segura e permite a capacidade de reposicionar esses dispositivos o que proporciona flexibilidade em ambientes industriais.

A fixação magnética evita a necessidade de perfuração ou colagem, reduzindo assim o potencial de danos ou deformações nas superfícies dos equipamentos ou estruturas de teste. Isso é particularmente valioso em aplicações de monitoramento de vibrações em que a integridade da estrutura deve ser mantida (Miller, 2018).

Muitos autores na literatura, como Silva (2005) e Diretrizes para a Montagem de Acelerômetros de Teste (2018), destacam que a fixação magnética simplifica significativamente o tempo de setup de experimentos e testes em comparação com métodos tradicionais. Além disso, os autores exaltam a versatilidade da fixação magnética, pois ela pode ser aplicada a diversas superfícies, incluindo metais, plásticos e compósitos. Essa adaptabilidade torna a fixação magnética adequada para uma ampla gama de aplicações industriais e experimentais.

4.2.2. Limitações da Fixação Magnética

Com relação às desvantagens da fixação por base magnética é encontrado na literatura informações divergentes sobre a eficácia da montagem magnética. O Autor Dytran (2018) observa que geralmente os sistemas de fixação magnéticas devem ser usados com cautela e raramente confiados em frequências acima de 1 kHz. Da mesma forma, Silva (2005) defende que o método de fixação magnética reduz o limite de frequência superior em certa medida (tipicamente 1,5 kHz). O trabalho publicado por Robinson e Arlington (2018), assim como os trabalhos de Brüel & Kjær (1982) e Broch (1984), apresentam resultados para um acelerômetro específico e observam que o limite superior da faixa útil de frequência é cerca de 2 kHz.

Em outras referências para um acelerômetro específico mostram que ímãs podem ser eficazes até e acima de 5 kHz, incluindo Serridge & Licht (1987), AS 2775-2004 e Diretrizes para a Montagem de Acelerômetros de Teste (2018). Os Autores Serridge e Licht (1987) observaram em seu estudo que considerando a aparente baixa rigidez de acoplamento o método de fixação por base magnética oferece um bom desempenho em altas frequências, especialmente em superfícies planas.

Para os autores encontrados na literatura a ressonância do acelerômetro pode estar dentro da largura de banda de frequência capturada, desde que a magnitude e a relação de fase sejam conhecidas, os resultados podem ser compensados. No entanto, o uso de um acelerômetro acima de sua ressonância reduz a sensibilidade e provavelmente afeta adversamente a precisão.

O trabalho de Miller *et al* (2018) mostrou que as frequências superiores alcançáveis (para superfícies planas e lisas de acoplamento) devem ser conhecidas para cada tipo de acelerômetro e ímãs usados antes de realizar medições. Isso é melhor do que depender de gráficos genéricos e reduz significativamente o risco de ressonâncias de montagem desconhecidas afetarem os resultados.

4.3. MONTAGEM COM ADESIVO OU COLA

Quando a máquina não puder ser perfurada a montagem com adesivo é a próxima alternativa. Esse tipo de montagem apresenta uma fixação segura e sem a necessidade de maquinar extensivamente a superfície. Adesivos estruturais são mais utilizados na fixação de acelerômetros, uma vez que são uma montagem rápida e sem a necessidade de perfuração na máquina (Harris et al, 2002). No entanto, este método reduz a faixa de resposta de frequência e/ou a precisão da medição, isto devido à propriedade de amortecimento do adesivo. Além disso, com o acelerômetro fixado à máquina com adesivo, se for necessário removê-lo posteriormente possivelmente o acelerômetro será danificado. Outra desvantagem é o facto de com o aumento da temperatura o adesivo pode ser danificado. Por essas razões, é recomendável utilizar um suporte de montagem juntamente com o adesivo. Esse suporte é um disco, normalmente de aço inoxidável, que é plano de um lado e tem um pino integral do outro lado.

Na montagem adesiva, que inclui uma variedade de produtos diferentes, desde adesivos temporários como a cera de abelha até adesivos permanentes como polímeros de cianoacrilato (Cocconcelli e Spaggiari, 2015).

Juntamente com parafuso a fixação por adesivos resulta em uma conexão rígida com alta rigidez e ampla faixa de resposta de frequência. Quanto maior a rigidez da fixação, maior o limite de frequência de corte da montagem. Enquanto uma alta rigidez é sempre fornecida por meio do acoplamento com parafusos, a rigidez da união adesiva depende das características físicas do adesivo, que nem sempre são fornecidas pelo fabricante.

O Estudo de Cocconcelli e Spaggiari (2015) se concentra em um aspecto específico da configuração do acelerômetro, a montagem entre o sensor e a superfície do componente. Os autores compararam três tipos de adesivos estruturais em termos de sua capacidade de transmitir respostas dinâmicas. Os autores concluem que a amplitude da resposta depende das características do adesivo, e a função de transferência da camada de adesivo não distorce o sinal, desde que a camada de adesivo seja fina o suficiente. Portanto, a escolha do adesivo pode ser baseada em considerações de custo e disponibilidade, sem afetar significativamente a transmissão do sinal.

A espessura da camada adesiva é uma característica importante na rigidez e resistência do adesivo, uma vez que é um parâmetro tipicamente não controlado em uma aplicação prática de um acelerômetro colado (Arenas, 2010).

Para um desempenho ideal, a superfície da máquina deve ser preparada da mesma maneira descrita na montagem por parafuso, removendo ferrugem, tinta solta ou sujeira, limpar a área com solvente.

4.4 UTILIZAÇÃO DE PONTEIRA

A utilização da ponteira é a menos utilizada, dado que, é difícil exercer a mesma pressão de contacto em todas as medições (pressão de contacto manual altera o valor da amplitude e frequência).

Este método é usado em programas de monitoramento itinerante. Com esse método de fixação a faixa de frequência de ambos os métodos de montagem é dramaticamente reduzida em comparação com montagens por parafuso ou adesivo (Miller, 2018).

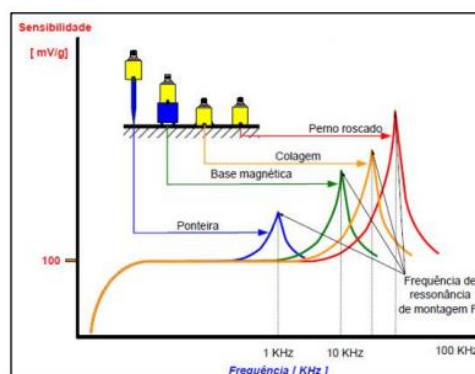
As ponteiras devem ser feitas de aço e não devem ser mais longas do que seis polegadas.

4.5. INFLUÊNCIA DA FIXAÇÃO NA FAIXA DE FREQUÊNCIA UTILIZÁVEL

A forma de fixação de um acelerômetro afeta diretamente a largura de banda teoricamente utilizável, podendo reduzi-la. Portanto, o método de fixação do acelerômetro na superfície de medição é um dos fatores mais críticos para obter resultados precisos em altas frequências nas medições práticas de vibração. Uma montagem inadequada resulta na redução da frequência de ressonância montada do acelerômetro, o que pode limitar severamente sua largura de banda utilizável.

A Figura 21 apresenta a resposta do acelerômetro em relação ao modo de fixação utilizado. Pode-se observar as diferentes faixas de frequência onde a resposta é linear, assim como sua frequência de ressonância, reforçando o que foi mencionado sobre cada tipo.

Figura 21. Resposta do acelerômetro em relação a fixação



Fonte: Adaptado de Kluczyk (2017)

Com base no esquema apresentado na Figura 21, o tipo de fixação que apresenta uma maior faixa de frequências, e o mais recomendado, é o acelerômetro com montagem por parafuso. Por outro lado, o menos recomendado é o de ponteira pois apresenta a menor faixa de frequências (Kluczyk, 2017).

Em aplicações práticas, é normalmente utilizado o método parafusado em recolhas em uso contínuo, ou seja, em recolhas que não seja necessário alterar a posição do acelerômetro entre medições. No caso de medições de rotina é utilizável qualquer outro tipo de montagem (preferencialmente a base magnética) evitando, sempre que possível, a ponteira pelas causas referidas anteriormente.

Os fabricantes de acelerômetro podem publicar resultados para um tipo específico de acelerômetro, porém nem um tipo de consideração sobre o tipo de fixação é realizada geralmente. Portanto, é possível estimar alterações na largura de banda utilizável por meio de experimentos (Miller, 2018).

5. METODOLOGIA

Como citado anteriormente, a montagem magnética é muito utilizada em aplicações práticas, uma vez que elas permitem que os acelerômetros sejam movidos rapidamente entre pontos de medição, reduzindo o tempo gasto na preparação da superfície e na espera pela cura dos adesivos entre as medições. Entretanto, as faixas de frequência utilizável dependem da fixação escolhida, isto é, a fixação interfere diretamente na faixa de frequência utilizável a ser analisada. Nesse contexto, esse trabalho discute a eficácia da montagem magnética. Irá ser apresentada uma análise comparativa entre diferentes métodos de montagem e então serão identificados os principais fatores os quais a fixação influencia a capacidade do acelerômetro.

A metodologia deste trabalho foi desenvolvida para avaliar os diversos fatores de influência sobre a fixação do sensor acelerômetro. Com esse intuito, a metodologia de estudo consiste em realizar uma seleção de equipamentos e materiais que construa um ambiente realismo capaz de abranger as diferentes configurações de fixações de bases magnéticas. Além disso, foram fabricadas bases não magnéticas de proporções iguais às bases magnéticas selecionadas para que seja elaborado um estudo sobre a influência no imã e as dimensões das bases.

Outro fator relevante para o desenvolvimento da pesquisa é o procedimento experimental sobre o qual os ensaios foram realizados. Essa etapa foi estabelecida em fases nas quais cada uma dessas fases consistiu em um foco de pesquisa. Essas etapas buscam definir quais ensaios devem ser realizados para cada frente de estudo que está respectivamente relacionado com diferentes parâmetros de estudo. Nesse contexto, essa etapa apresenta o cronograma de ensaios realizados em cada uma dessas frentes de estudo e o equipamento utilizado. Além disso, este tópico descreve a bancada experimental no qual os estudos foram realizados.

Em sequência após os ensaios realizados os dados serão conduzidos a uma sequência de métricas definidas e então um estudo é realizado para compreender a influência de cada parâmetro sobre o desempenho do acelerômetro. Nesta etapa foram definidas as abordagens realizadas para o desenvolvimento da etapa de análise dos resultados. Os dados coletados durante a etapa de procedimento experimental foram estudados de acordo com cada linha de estudo, as quais irão ser analisadas individualmente em um primeiro momento. No segundo momento, as análises e conclusões prévias foram cruzadas a fim de compreender os fenômenos

de forma paralela e correlacionada. A partir desta análise será desenvolvida uma quantificação da influência desses parâmetros.

As etapas citadas estão tratadas de forma mais detalhada nos próximos tópicos.

5.1. SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

Na realização deste estudo, que visa comparar a influência de diferentes formas de fixação magnética sobre a faixa de frequência utilizável de acelerômetros, a seleção criteriosa de equipamentos e materiais desempenha um papel fundamental na garantia da precisão e confiabilidade dos resultados. Para isso, foi realizada uma cuidadosa seleção de equipamentos e materiais, considerando as necessidades específicas da pesquisa. Dessa forma, foram consideradas diversas abordagens de parâmetros no estudo, são elas:

- ❖ **Influência da Holding Force (Força do Ímã):** Para verificar a influência da holding force, foram selecionadas bases com forças de atração diferentes;
- ❖ **Influência da Superfície de Contato do Ímã:** Para investigar a influência da superfície de contato do ímã, foram selecionadas bases planas e bases de trilho duplo.
- ❖ **Influência da Altura da Base:** A fim de analisar a influência da altura da base, foram selecionadas bases com diferentes alturas e mesmo material.
- ❖ **Influência do Campo Magnético Gerado:** Para avaliar a influência do campo magnético criado devido à presença do ímã, produzimos bases de dimensões idênticas às das bases magnéticas para fins de comparação.

Essa seleção criteriosa de equipamentos e materiais baseou-se em uma revisão detalhada da literatura, consulta a especialistas na área e testes preliminares. Dessa forma, para garantir que os equipamentos e materiais escolhidos fossem apropriados para conduzir testes consistentes e precisos, possibilitando uma análise confiável das bases magnéticas em estudo.

O modelo de sensor acelerômetro utilizado foi o modelo DynaLogger HF + da Dynamox, que possui um range de frequência de 13kHz, alta sensibilidade, resposta de frequência adequada e capacidade de comunicação com sistemas de aquisição de dados. A Figura 22 mostra o equipamento para sensoriamento de vibração utilizado para as medições.

Figura 22. Acelerômetro DynaLogger HF+



Fonte: Autoria Própria

Como a metodologia do presente aborda diferentes estudos relacionados, os materiais selecionados foram escolhidos conforme necessidade de cada cenário experimental. Com isso, nos itens a seguir serão descritos os equipamentos utilizados para cada configuração conforme a necessidade.

5.1.1. FASE 1: Tipos de bases

O estudo com relação aos tipos diferentes de base magnética neste projeto é importante para compreender como esses tipos afetam os sinais de vibração capturados pelo acelerômetro. A diversidade de bases inclui variações em termos de tamanho, forma, condições superficiais e força de atração, refletindo a complexidade e diversidade de cenários práticos. Nesse contexto, foram utilizadas bases planas, representadas pela base MagTeK 3120 (plana), que durante os estudos passou por uma avaliação detalhada, incluindo o processo de lixamento no estudo de superfície que será apresentado na FASE 3. Além disso, a base UNF Male 3011 (plana) e a base 30MH115-2A (trilho duplo) que apresenta uma dimensão única ao estudo devido à sua configuração diferenciada.

Outro fator que difere as bases entre é a variação na força de atração entre as bases magnéticas, isso contribui para uma compreensão mais profunda de como diferentes níveis de força podem influenciar a fixação magnética. Essa consideração foi incorporada e entende-se que a força de atração pode impactar diretamente a capacidade da base de manter-se fixa em diferentes superfícies e sob diversas condições operacionais. As bases são apresentadas na Figura 23 e 24.

Portanto, nesta etapa foram realizados teste com as três bases magnéticas citadas anteriormente, sendo elas:

- ❖ Base magnética UNF Male 3011 (plana), Força de Atração: 14 kgf;

- ❖ Base magnética MagTeK 3120 (plana), Força de Atração: 16 kgf;
- ❖ Base magnética 30MH115-2A (trilho duplo), Força de Atração: 12 kgf.

Figura 23. Modelos de Bases magnéticas diferentes



Fonte: Autoria Própria

Figura 24. Superfície de contato das Bases magnéticas



Fonte: Autoria Própria

Conforme citado anteriormente as bases possuem fixação diferentes, cujas duas primeiras são planas e a terceira de trilho duplo. Em ambientes industriais, é muito aplicável o uso da base magnética de trilho duplo. Esse fato ocorre devido à sua capacidade de fixação estável, versatilidade e ajuste fácil, tornando-as ideais para várias aplicações industriais.

5.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Antes de realizar os testes, o ambiente de teste foi devidamente preparado. Isso incluiu a minimização de influências externas, como campos magnéticos ambientais, vibrações e interferências eletromagnéticas. A temperatura e umidade do ambiente de teste foram monitoradas e mantidas constantes durante os experimentos.

A configuração utilizada segue a seguinte orientação:

- ❖ Sensor DynaLogger HF+ parafusado;
- ❖ Sensor DynaLogger HF+ com base magnética UNF Male 3011;
- ❖ Sensor DynaLogger HF+ com base MagTeK 3120;
- ❖ Sensor DynaLogger HF+ com base magnética 30MH115-2A.

Durante os testes, os dados de aceleração foram registrados usando os acelerômetros selecionados. Cada configuração experimental, incluindo as cinco medições associadas, foi devidamente documentada com fotografias do procedimento experimental. Esses dados foram armazenados juntamente com informações detalhadas sobre as configurações de cada teste para análise subsequente.

Foi implementado um procedimento de controle de variáveis para garantir que as mudanças nos resultados estivessem relacionadas às variações nas bases magnéticas e não a outras variáveis não controladas. Dessa forma, foi realizado o controle da execução dos testes perante o planejamento experimental predefinido, incluindo a realização de cinco medições para cada configuração experimental refinada. Isso permitiu avaliar a consistência dos resultados em cada configuração. O procedimento experimental estabelecido foi:

- ❖ Retirar do ambiente experimental influências externas;
- ❖ Montar cada base magnética nos acelerômetros de acordo com as especificações do fabricante;
- ❖ Garantir que as bases magnéticas estejam devidamente alinhadas e fixadas de maneira da mesma forma na realização de todos os ensaios;
- ❖ Manter todos os procedimentos uniformes para todas as configurações definidas para o estudo.

5.3. VARIÁVEIS ANALISADAS

Conforme citado anteriormente este estudo buscou analisar uma variedade de variáveis para compreender a influência das bases magnéticas nas medições de aceleração, foram as variáveis consideradas:

- **Influência da *Holding Force* (Força de atração do Ímã);**

É importante compreender o quanto a força do ímã afeta diretamente a estabilidade das medições. Sabe-se que a fixação sólida dos acelerômetros é fundamental para evitar movimentos indesejados e garantir medições precisas. Compreender como a força do ímã se relaciona com a estabilidade é fundamental para selecionar bases magnéticas que ofereçam fixação robusta, o que é crucial na indústria para garantir a integridade dos dados.

- **Influência da Superfície de Contato;**

A superfície da base influencia diretamente a uniformidade da fixação. Uma superfície de contato uniforme evita distorções nas medições, tornando-as mais confiáveis. Entender essa relação é de grande importância para a indústria, especialmente em aplicações que requerem monitoramento de vibrações, onde a uniformidade da fixação é crítica para identificar problemas precocemente e evitar falhas no equipamento (Miller, 2018).

E para realizar a avaliação das variáveis foram aplicadas para realizar a análise comparativa realizada entre as diferentes bases magnéticas métricas, são elas:

- ❖ RMS Global
- ❖ Fator de Crista
- ❖ Fator K
- ❖ Curtose
- ❖ Transformada de Fourier
- ❖ Power Spectral Density (PSD)

Essas métricas forneceram uma compreensão abrangente do desempenho dos acelerômetros com diferentes bases magnéticas em várias condições. A análise dessas variáveis e métricas nos permite avaliar a influência das bases magnéticas em detalhes e fornecer dados valiosos para a pesquisa.

6. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Nesta etapa, será abordado o os detalhes dos ensaios experimentais conduzidos para avaliar as bases magnéticas em estudo. Será apresentada a bancada a qual os estudos foram desenvolvidos. Além disso, serão abordados os procedimentos adotados, as configurações utilizadas e as condições de teste previstos no planejamento e os quais o estudo se desenvolveu. O planejamento dos ensaios previamente citado vai ser abordado em mais detalhes nesta etapa. Será fornecida uma visão detalhada das configurações utilizadas e das condições de teste nas quais o estudo se desenvolveu, assegurando uma compreensão clara do ambiente experimental.

Os ensaios experimentais são fundamentais para validar a metodologia proposta e extrair conclusões significativas. Ao garantir que os procedimentos sejam executados de maneira controlada, asseguramos a confiabilidade dos resultados e possibilitamos conclusões significativas para orientar futuras aplicações práticas. Por esse motivo os procedimentos de testes devidamente controlados serão apresentados nesta etapa.

6.1. BANCADA EXPERIMENTAL

O sistema experimental é conduzido em uma bancada de testes e compreende uma série de componentes-chave que desempenham funções essenciais em todo o processo de avaliação.

O núcleo do sistema é um motor elétrico de 1/4 de cavalo-vapor (Cv), fabricado pela renomada empresa Weg. Este motor é responsável por fornecer a energia motriz necessária para o funcionamento do sistema. A Weg é amplamente reconhecida pela excelência na produção de motores elétricos, e o motor de 1/4 CV atesta sua qualidade e confiabilidade.

Para transmitir o torque gerado pelo motor para a carga em teste, é utilizado um acoplamento de mandíbula. Este componente desempenha um papel crucial na transferência de energia mecânica, garantindo uma conexão sólida e eficaz entre o motor e os elementos de teste. O acoplamento de mandíbula é um componente robusto projetado para suportar as demandas do processo de avaliação. A Figura 25 apresenta a bancada de testes utilizada.

Figura 25. Bancada experimental



Fonte: Autoria Própria

Para controlar a velocidade do motor e, por conseguinte, o sistema de teste, utiliza-se um inversor de frequência do modelo CFW 08. A sustentação do eixo do sistema é assegurada por dois mancais, cada um equipado com rolamentos modelo 22205 Ek da SKF. Os Ensaios se desenvolveram no mancal 1 (à esquerda da bancada). O acelerômetro foi posicionado no mancal 1 conforme ilustra a figura 26.

Figura 26. Acelerômetro fixado por parafuso no Mancal 1



Fonte: Autoria Própria

6.2. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

A configuração experimental utilizada para conduzir os ensaios que avaliaram as bases magnéticas em estudo foi composta pela bancada experimental completa, pelo acelerômetro Dynalogger HF+ da Dynamox e pelas bases, sendo estas diferentes em cada composição das fases de estudo conforme apresentado anteriormente.

Os estímulos vibracionais aplicados são referentes ao funcionamento da bancada e buscam criar um ambiente representativo e simular condições operacionais reais. Em todos os estudos a rotação de trabalho foi de 900 RPM. O mancal de rolamento foi devidamente lubrificado.

Os ensaios foram realizados sob as mesmas condições na bancada balanceada e sem interferências alternadas entre os ensaios. Dessa forma, para garantir confiabilidade e validade dos resultados, fundamentais para conclusões significativas.

O procedimento inicial foi a configuração dos acelerômetros com os parâmetros apropriados. O range de frequência foi estabelecido em 13kHz, assegurando que os dispositivos capturassem dados de vibração na faixa de interesse, dentro da qual se desejava avaliar o comportamento do sistema. Os parâmetros definidos na máxima configuração permitida do sensor e de acordo com seu posicionamento foram:

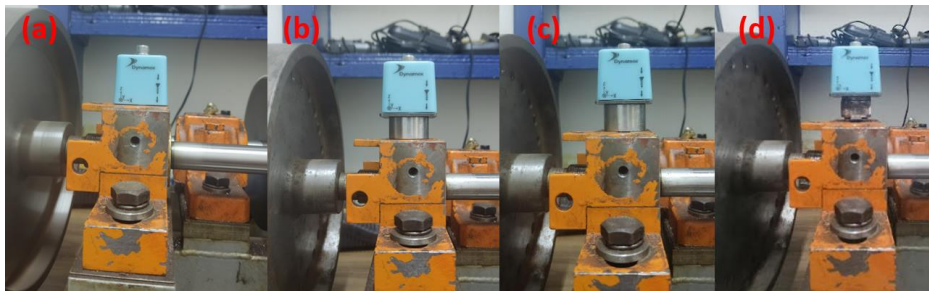
- Eixos de posicionamento: x, y e z
- Tempo de coleta: 2,49 s
- Range de frequência dinâmica: 4g
- Métrica: Velocidade e Aceleração

Os testes iniciaram com a fixação do acelerômetro no mancal com a primeira fixação de cada fase do estudo, de modo a assegurar uma captação eficiente das vibrações e acelerações. Em seguida, os dados são coletados. Após isso, o procedimento é repetido para cada uma das fixações. Foi dada atenção especial à conexão segura e estável dos acelerômetros aos mancais, garantindo que não houvesse movimentação ou desalinhamento durante os testes.

Os testes conforme as 4 Fases apresentadas. As próximas etapas irão descrever os procedimentos realizados em cada fase para compor os requisitos necessários para o estudo anteriormente apresentados.

A Figura 27 mostra as formas de fixação utilizadas, onde (a) com parafuso foi utilizada de referência ao comportamento das bases, (b) base MagTeK 3120, (c) base UNF Male 3011 e (e) base 30MH115.

Figura 27. Bases magnéticas posicionadas



Fonte: Autoria Própria

6.3. PROCEDIMENTO DE AQUISIÇÃO DOS SINAIS

A execução do procedimento de coleta dos sinais realizada com sensor DynaLogger HF + foi realizada em dois dias de coleta de dados. Para realização dos dados foi seguido o procedimento citado anteriormente para garantia da precisão e assegurar a qualidade dos dados coletados.

A Tabela 1 apresenta os ensaios realizados.

Tabela 1. Ensaio das Bases

Tipos de bases		
Dia	Fixação	Horário dos ensaios
20/nov	Parafuso	15h27 à 15h35
20/nov	MagTek 3120	15h43 à 15h52
20/nov	UNF Male 3011	15h58 à 16h10
20/nov	30MH115-2A	16h18 à 16h30

Para realização desse procedimento as bases foram colocadas uma a uma na bancada após isso, o motor foi acionado e foi esperada um intervalo de 3 minutos para regularização do sistema. Após isso, o sensor foi posicionado da mesma forma em todos os ensaios. Dessa forma, evitando que ocorram alterações no resultado devido a posicionamento. Portanto, o sensor foi cuidadosamente posicionado no ponto indicado. A coleta de dados ocorreu em condições controladas, e com sensor calibrado. O ambiente foi mantido livre de interferências externas, proporcionando um conjunto de dados inicial para comparação.

Durante o procedimento de coleta, a rastreabilidade e documentação detalhada foram mantidas como pilares essenciais. Cada ponto foi fotografado e documentado, incluindo configurações dos equipamentos, posicionamento dos sensores, condições ambientais e qualquer modificação realizada nas bases. Na ocorrência de quaisquer possíveis interferências os ensaios seriam repetidos. Os procedimentos foram replicados em todas as fases do estudo. Essa abordagem sistemática possibilita a validação dos resultados e a replicação precisa dos experimentos.

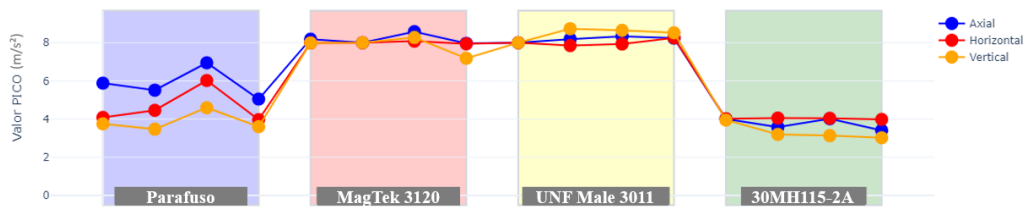
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 ANÁLISE COMPARATIVA

Como dito anteriormente, foi realizada a análise comparativa.

❖ Valor de Pico

Figura 28. Valor de Pico



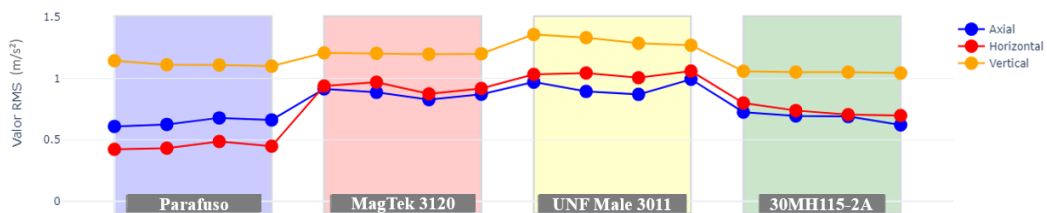
Fonte: Autoria Própria

O primeiro critério a ser analisado foi o valor de pico. Nesse parâmetro foi observado que as bases circulares planas e a atingiram picos mais elevados enquanto a base de trilho duplo apresentou os menores picos, até mesmo que o parafuso prisioneiro. Essa análise inicial com relação aos valores de pico não é possível retirar conclusões do comportamento das bases.

❖ RMS Global

A figura 29 apresenta o valor RMS obtido para este caso

Figura 29. Valor RMS



Fonte: Autoria Própria

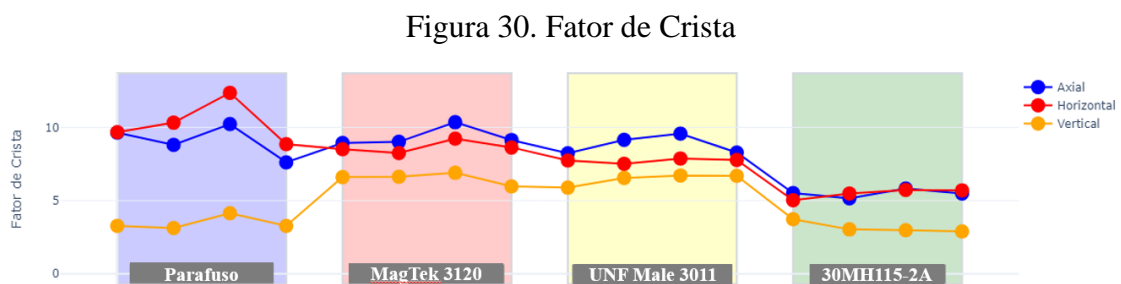
Os resultados do RMS global revelaram distinções entre as formas de fixação magnética. De uma forma geral é possível observar que as bases magnéticas causaram uma amplificação do RMS global. A amplificação global do sinal, evidenciada pelas bases magnéticas, sugere uma resposta menos aderente à superfície em comparação com a fixação parafusada. Esse aumento na amplitude pode ser interpretado como um indicativo da menor

eficácia da fixação magnética em manter o sensor firmemente acoplado ao equipamento. Além disso, esse aumento ocorreu ainda mais no eixo horizontal o que, mostra claramente que a fixação por base magnética é menos aderente à superfície que a fixação parafusada.

A observação de uma amplificação mais pronunciada no eixo horizontal é particularmente significativa. Essa tendência aponta para uma menor estabilidade e aderência lateral nas fixações magnéticas. Entretanto é importante considerar não apenas a amplitude global, mas também a direção e a estabilidade da fixação ao escolher o método apropriado.

❖ Fator de Crista

O Fator de Crista é uma métrica particularmente sensível a eventos transientes e picos agudos nos sinais de vibração.



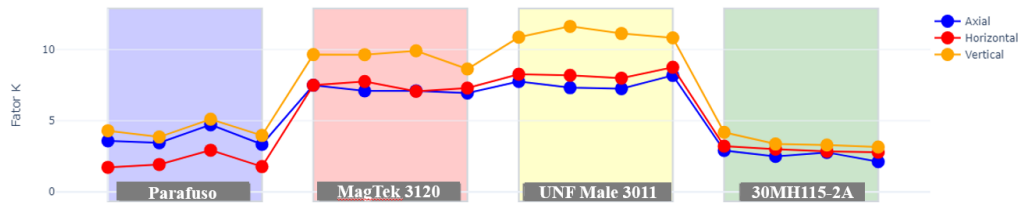
Fonte: Autoria Própria

Conforme a Figura 30, pode ser observado um Fator de Crista menor nas bases magnéticas, especialmente na base 30MH115-2A que possui trilho duplo. Esse resultado sugere que, em comparação com a fixação parafusada, as fixações magnéticas podem atenuar a intensidade dos picos nas vibrações.

Uma causa provável dos resultados é a menor aderência lateral, que por natureza a fixação magnética apresenta. Isso resulta em uma resposta menos sensível a eventos transientes. Essa aderência reduzida afeta a flexibilidade da fixação o que é diretamente ligado a um acoplamento menos rígido em comparação com a fixação parafusada. Além disso, essa flexibilidade pode contribuir para uma resposta menos intensa a picos de vibração. Outra causa provável é a características de transmissão de energia, uma vez que as propriedades de transmissão de energia das fixações magnéticas podem introduzir uma resposta amortecida em relação aos picos. Essas observações sugerem que a fixação magnética apresenta limitações na transmissão eficaz de eventos transientes.

❖ Fator K

Figura 31. Fator K



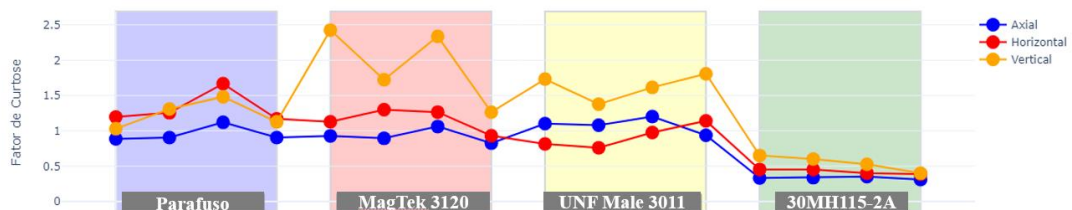
Fonte: Autoria Própria

Observou-se que nas bases planas (MagTeK 3120 e UNF Male 3011), o Fator K foi significativamente maior, enquanto na base de trilho duplo (30MH115-2^a), o Fator K foi apenas ligeiramente superior ao da fixação parafusada, como pode ser observado na Figura 39. Essas diferenças nos valores entre as bases magnéticas sugerem que as características específicas de cada tipo de base têm uma influência significativa na relação entre a intensidade dos picos e a média do sinal.

Com uma superfície de maior contato, como nas bases planas, pode resultar em uma transmissão mais eficiente da energia vibracional, o que leva a um aumento mais pronunciado no Fator K, indicando uma relação mais acentuada entre picos e médias. A base de trilho duplo, por outro lado, pode apresentar limitações na transmissão eficiente de vibrações devido à sua estrutura. Além disso, observou-se que a fixação por parafuso apresentou um Fator K menor em comparação com as bases magnéticas planas. Esse acontecimento pode ser justificado pela fixação por parafuso ser mais rígida e estável. Além disso, devido ao contato magnético entre as bases magnéticas e a estrutura da máquina, podem-se introduzir características dinâmicas adicionais, o que justifica o Fator K mais acentuado.

❖ Curtose

Figura 32. Curtose



Fonte: Autoria Própria

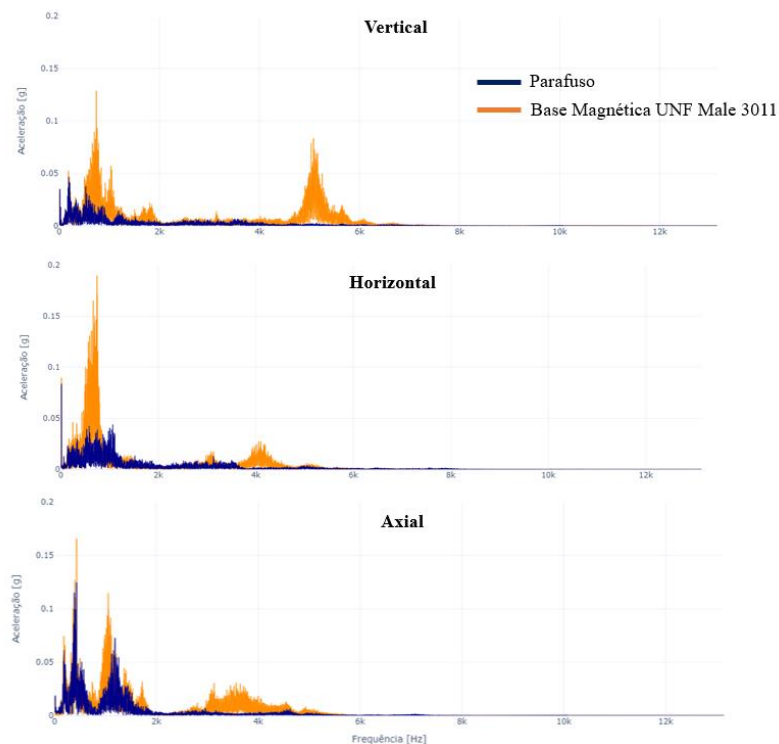
Na curtose, mostrada na Figura 32, foi observado que as bases magnéticas planas apresentaram uma curtose mais alta, porém ligeiramente irregular entre medições. Esse acontecimento pode ser atribuído à sensibilidade dessas bases à geometria específica do equipamento ou a características dinâmicas do equipamento.

A base de trilho duplo obteve uma curtose muito baixa, inclusive mais baixa que a fixação por parafuso. Isso sugere uma resposta mais suave na distribuição das vibrações. Isso pode estar relacionado a natureza do trilho duplo, que pode introduzir amortecimento ou restrições na transmissão de vibrações, resultando em uma distribuição menos propensa a eventos extremos.

❖ Transformada de Fourier

Os Espectros de frequência foram posicionados sobrepostos pelo espectro do parafuso para que seja feita uma comparação visual. Além disso, a análise foi dividida em função dos eixos para compreender quais fenômenos estão ocorrendo em cada eixo.

Figura 33. Espectro de Frequência da base UNF Male 3011



Fonte: Autoria Própria

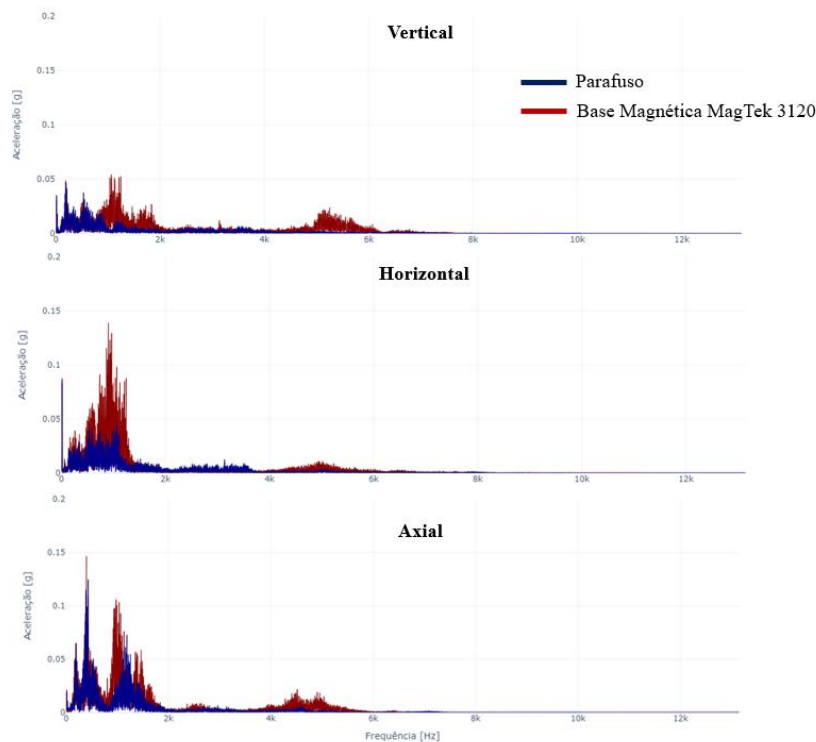
Com relação a essa base no eixo vertical, foi observado picos distintos em torno de 800 Hz e 5,5 kHz. A amplitude nessas frequências foi medida em aproximadamente 0,14g e 0,6g,

respectivamente (Figura 33). Esses resultados indicam que a base possui modos vibracionais específicos nessas faixas de frequência, com uma contribuição significativa em 5,5 kHz, sugerindo possíveis características dinâmicas da base nessa faixa.

No eixo horizontal foram observados picos notavelmente elevados em 800 Hz, alcançando amplitudes de até 1,8g. Além disso, há também amplitudes pouco elevadas em torno de 4 kHz. Esses resultados sugerem uma resposta dinâmica específica nessas frequências, indicando possíveis modos vibracionais ou ressonâncias relacionadas às características da base.

Na axial a base apresentou os resultados mais próximos ao parafuso. Porém, observaram-se apenas amplitudes aparentes na faixa de 2,5 kHz a 4,2 kHz, e foi notado um deslocamento para a esquerda das amplitudes na faixa de 1,3 kHz. Esse deslocamento pode ser atribuído a características específicas de absorção ou amplificação da base.

Figura 34. Espectro de Frequência da base MagTek 3120



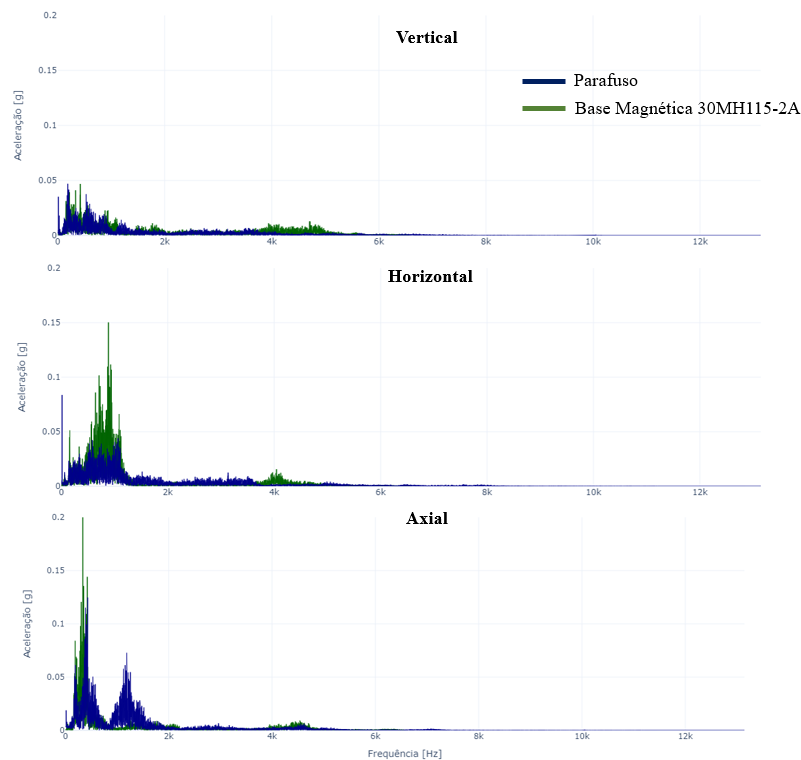
Fonte: Autoria Própria

Como mostra a Figura 34, base MagTek 3120 revelou picos em aproximadamente 1 kHz e 5,5 kHz, com amplitudes medidas em cerca de 0,05g e 0,023g, respectivamente. A presença de picos em frequências semelhantes à base UNF Male 3011 sugere comportamentos vibratórios comparáveis, porém em menor amplitude o que indicam uma melhor fixação.

Na horizontal houve amplitudes elevadas na faixa de 500 a 1500 Hz e ligeiramente maiores em 5 kHz. No entanto, uma atenuação foi observada na faixa de 2 kHz a 3 kHz. Isso indica que a base maior possui modos vibracionais específicos nessas frequências.

Entretanto, na axial a MagTek 3120 mostrou resultados semelhantes ao parafuso prisioneiro. Porém, com amplitudes mais elevadas, principalmente na faixa de 4,1 kHz a 5,8 kHz. Além disso, houve um deslocamento para a esquerda das amplitudes na faixa de 1,3 kHz. Esse deslocamento pode refletir características específicas da base. Apesar disso, a semelhança aos resultados do parafuso indica uma resposta axial consistente.

Figura 35. Espectro de Frequência da base 30MH115-2A



Fonte: Autoria Própria

A análise vertical da base 30MH115-2A mostrou amplitudes mais próximas se comparado com as outras bases, porém apresentou perda de sinal em algumas frequências. A perda de sinal foi particularmente mais evidente na faixa de 0 a 2 kHz. Isso sugere que a base de trilho duplo pode ter restrições ou menor eficácia na transmissão de vibrações nessas frequências específicas, o que pode ter implicações dependendo das características vibratórias do sistema em questão. Na horizontal também ocorreram picos elevados, na faixa de 500 a 1,2 kHz, especialmente em 1 kHz. Além disso, observou-se uma redução geral nas amplitudes em

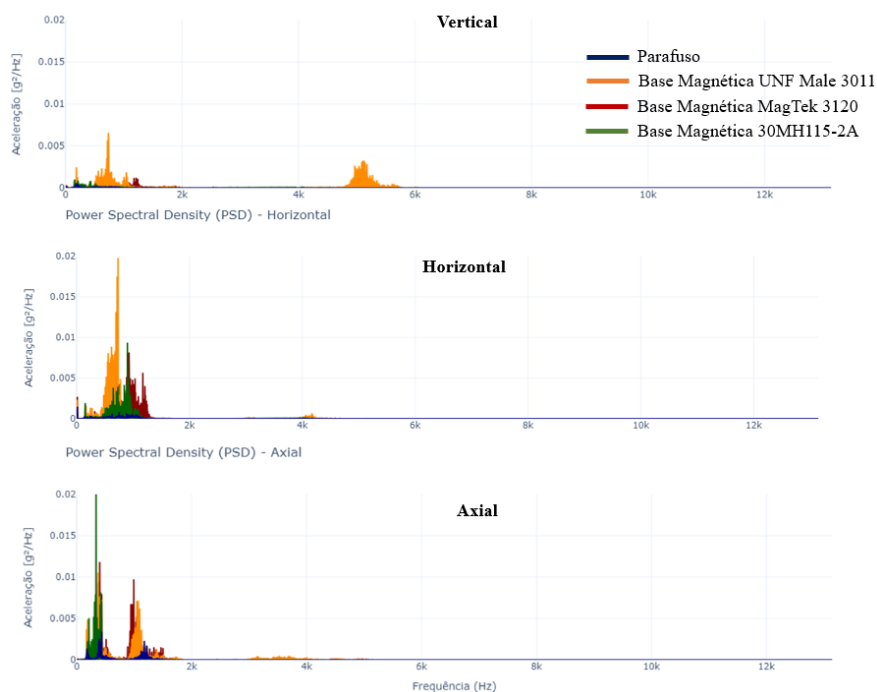
diversas faixas, principalmente de 1,5 kHz a 2,5 kHz. Isso demonstra imitações em transmitir vibrações em certas faixas (Figura 35).

Na análise do eixo axial, a base apresentou resultados coerentes em relação ao parafuso. No entanto, uma grande faixa de frequência de 1 kHz a 2,3 kHz foi perdida em termos de captura de sinal. Além disso, em frequências abaixo de 1 kHz, as amplitudes foram muito mais elevadas em relação ao parafuso. Essa redução na captura de sinais pode ser atribuída a diversos fatores relacionados ao design específico da base ser de trilho duplo.

Uma possível explicação para a perda de sinal em determinadas frequências pode envolver ressonâncias ou modos vibracionais específicos do sistema de fixação, como distribuição de massas e rigidez, que podem influenciar a eficácia na transmissão de vibrações em diferentes frequências resultando em cancelamento ou interferência de ondas em certas faixas de frequência.

❖ Power Spectral Density (PSD)

Figura 36. Power Spectral Density



Fonte: Autoria Própria

Como citado anteriormente, o PSD é uma ferramenta na análise de vibrações que mostra como a energia é distribuída ao longo das diversas frequências em um sinal. Com isso, é

possível identificar áreas de maior concentração de energia e padrões que proporcionam informações valiosas sobre o comportamento dinâmico de máquinas. A Figura 36 ilustra o PSD do sinal obtido.

No eixo vertical, foi observado que a base UNF Male 3011 exibiu picos mais evidentes em torno de 800 Hz e 5,2 kHz. Os picos sugerem a presença de uma ressonância ou modo vibracional específico associado à base. A frequência natural dessa base pode coincidir com as vibrações inerentes ao sistema, resultando em uma resposta mais acentuada nessa frequência.

Na análise de PSD no eixo horizontal todas as três bases apresentaram picos por volta de 1 kHz em comparação com o parafuso prisioneiro. A presença desses picos pode indicar uma frequência crítica associada às propriedades dinâmicas do sistema. Essa frequência pode representar uma ressonância ou modo vibracional. A base UNF Male 3011 apresentou maiores picos de até 0,02 na faixa de 800 Hz. Esses picos podem estar relacionados a uma ressonância específica dessa base nessa frequência. A rigidez, massa e amortecimento da base menor podem favorecer a amplificação de vibrações nessa faixa.

Ainda na horizontal, a base MagTek 3120 apresentou as menores amplitudes, por volta de 0,005 na faixa de 1,1 kHz. Isso pode indicar que essa base está mais aderente à superfície da máquina que as demais bases, dessa forma ocorreram respostas vibracionais menos pronunciadas, o que pode ser desejável em termos de estabilidade do sistema. Isto é, não ocorreram respostas extras devido a resposta da falta de aderência da fixação na máquina.

No eixo axial a análise de PSD revelou observações importantes em relação aos picos de frequência. A base UNF Male 3011 apresentou os menores picos em 1 kHz quando comparada às demais, o que é positivo, pois o parafuso também apresentou um PSD menor que todas as bases. A base MagTek 3120 também apresentou picos nessa faixa com amplitudes levemente maiores o que indica a presença de mais energia concentrada nessas faixas. Isso ocorre provavelmente devido à maior massa do sistema.

A base 30MH115-2A atingiu o pico mais proeminente na faixa de 500 Hz, de 0,02XX. Isso pode ter ocorrido devido a configuração particular dessa base, trilho duplo, onde a distribuição de massas e a rigidez da configuração específica do sistema podem resultar em uma fixação menos aderente que favorecem o surgimento de vibração residual mais intensa nessa frequência.

8. CONCLUSÃO

Em conclusão, no estudo foi observado que as bases magnéticas apresentam uma menor aderência em comparação com a fixação parafusada. Além disso a base MagTeK 3120 obteve o melhor resultado em comparação com as demais bases magnéticas. Embora as bases magnéticas tenham apresentado uma menor aderência, um efeito ainda mais pronunciado no eixo horizontal, indicando uma menor estabilidade e aderência lateral. A base MagTeK 3120 mostrou manter-se mais aderente a superfície. Essa observação mostra que a holding force obteve um impacto significativo na aderência à superfície.

Com relação à superfície da base, percebeu-se que as características específicas de cada tipo de base influenciam nas características do sinal de vibração. Isto é, as bases planas oferecem melhor fixação em superfícies planas e, entre elas a base de maior força de atração ofereceu o melhor desempenho. A análise do PSD permitiu identificar padrões de distribuição de energia vibracional ao longo das diversas frequências em cada base magnética. Os resultados revelaram ressonâncias específicas, modos vibracionais e a eficácia na transmissão de vibrações em diferentes faixas de frequência e orientações. Além disso, os dados do valor de pico mostraram que as fixações por base magnética apresentam mais picos, indicando uma instabilidade devido ao contato entre a superfície da máquina e a superfície da base magnética.

A contribuição efetiva deste trabalho para a comunidade científica é uma análise comparativa detalhada das bases magnéticas para fixação de acelerômetros, oferecendo informações valiosas para profissionais e pesquisadores interessados em otimizar práticas de manutenção preditiva e melhorar a precisão das medições de vibração em ambientes industriais, destacando a importância de considerar múltiplas métricas para uma avaliação abrangente.

8.1. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Investigação das características dinâmicas específicas de cada tipo de base magnética e sua influência na distribuição de energia;
- Desempenho das bases magnéticas em condições ambientais variadas e em diferentes tipos de equipamentos industriais para obter uma compreensão mais abrangente de seu potencial e limitações.
- Estudo da relação da geometria e altura da base com a capacidade de captura de sinais.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Fabrício César Lobato de. **Diagnóstico automático de falhas em grupos geradores hidroelétricos utilizando técnicas preditivas de manutenção e redes neurais artificiais**, 2008.

ALMEIDA, Paulo Samuel de. **Manutenção mecânica industrial: conceitos básicos e tecnologia aplicada**. São Paulo: Érica, 2016.

AS 2775-2004. **Mechanical vibration and shock** - Mechanical mounting of accelerometers from SAI Global.

BARKOV, Alexej; BARKOVA, Natalja; MITCHELL, John S. **Condition assessment and life prediction of rolling element bearings-part 1**. SV, Sound and Vibration, v. 29, n. 6, p. 10-17, 1995.

BARRETO, Lucas D. T., ROSA, Rodrigo K., SILVA, Danilo, BRAGA, Danilo. **Fault detection for rotating machinery based on vibration data using machine learning**. In Anais do XX Encontro Nacional de Inteligência Artificial e Computacional, pp. 242-256. SBC, 2023.

BARILLI, Rodrigo Jorge de Castilho. **Análise de falhas em mancais de rolamento utilizando a técnica do envelope**, 2013.

BEZERRA, Roberto. **Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, 2004.

BLAQUEZ, R. & BARBOSA, J.C. **Manutenção preditiva por análise de vibrações**, 2015.

BOWERS, S. V.; PIETY, K. R.; PIETY, R. W. **Real-world mounting of accelerometers for machinery monitoring**. Sound and Vibration, v. 25, pp. 14–23, 1991.

BRÜEL e KJAER. **Measuring Vibration**. Nærum, Denmark, 1982.

BRÜEL e KJAER. **Mechanical Vibration and Shock Measurements**. Denmark, 1984.

BROCH, J. **Mechanical Vibration and Shock Measurements**. 2nd ed. Denmark, 1984.

COCCONCELLI, Marco; SPAGGIARI, Andrea. **Mounting of Accelerometers with Structural Adhesives: Experimental Characterization of the Dynamic**, 2015.

Collection CTC. **Vibration Analysis hardware for Portable Data**, 2022.

CROCKER, M. **Handbook of Noise and Vibration Control**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2007.

DE SILVA, Clarence W. (Ed.). **Vibration and shock handbook**. CRC press, 2005.

DYTRAN INSTRUMENTS, I. N. C. Accelerometer Mounting Considerations.

ESCALER, X. et al. **Detection of cavitation in hydraulic turbines**. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 20, n. 4, pp. 983–1007, 2006.

EZRA, Oren. **Achieving Manufacturing Excellence with Predictive Maintenance and Machine Learning**. In: Industry 4.0 Insights, [S.I.], 2018.

GUO, H., JACK, L. B., NANDI, A. K. **Feature generation using genetic programming with application to fault classification**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), v. 35, n. 1, pp. 89-99, 2005.

HARRIS, C., PIERSOL, A., PAEZ, T. Harris' shock and vibration handbook. (*No title*), 2002.

ISO 5348: **Mechanical vibration and shock** - Mechanical mounting of accelerometers. Geneva: ISO, 1998.

ISO 10816-3: **Mechanische Schwingungen-Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nichtrotierenden Teilen-Teil 3**: Industrielle Maschinen mit einer Nennleistung über 15 kW und Nenndrehzahlen zwischen 120 min⁻¹ und 15000 min⁻¹ bei Messungen am Aufstellungsort, Berlin, 2009.

JARDINE, A., Tsang, A. **Maintenance, Replacement, and Reliability**: Theory and Applications. 2nd ed. United Kingdom: Taylor & Francis, 2013.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção**: função estratégica. 3.ed. Rio de Janeiro: Ed. Qualitymark, 2009.

KAPLUN, Dmitry et al. **Optimal estimation of wavelet decomposition level for a matching pursuit algorithm**. Entropy, v. 21, n. 9, p. 843, 2019.

KLUCZYK, Marcin; GRZAÐZIELA, Andrzej. **Vibration diagnostics of the naval propulsion systems**. Maritime Technical Journal, v. 208, n. 1, pp. 15-29, 2017.

LENZI, A. **Revisão Bibliográfica sobre Técnicas de Diagnóstico de Defeitos em Máquinas**. Relatório Parcial I e II, 1991.

MAGALHÃES, Mateus Cardozo. **Sistema de aquisição de sensores ópticos baseados em redes de Bragg para análise de vibração em máquinas elétricas**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MARSEGUERRA, M.; ZIO, E. **Optimizing maintenance and repair policies via a combination of genetic algorithms and monte carlo simulation**. Reliability Engineering and System Safety, United Kingdom, v. 68, n. 1, p. 69–83, 2000.

MARÇAL, R. F. **Gestão da Manutenção**. Ponta Grossa: Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção (PPGEP). Notas de aula, 2004.

MIRSHAWKA, V.; OLMEDO, N.L. **Manutenção - Combate aos Custos da Não-Eficácia: A Vez do Brasil**. São Paulo: Makron Books do Brasil Editora Ltda., 1993.

MILLER, Aaron; SBURLATI, Dominic; DUSCHLBAUER, Dominik. **Accelerometer mounting: comparison of stud and magnetic mounting methods**. Hear to Listen: Acoust, 2018.

MONCHY, F. **A Função Manutenção: Formação para a Gerência da Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Durban, 1989.

Montagem Industrial: **Diretrizes para a Montagem de Acelerômetros de Teste**, 2018.

MOUBRAY, J. **Reliability-centered Maintenance**. 2nd ed. United States: Industrial Press, 2001.

NBR 5462: 1994. **Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

SAINI, J., MEHRA, R. (2015). **Power spectral density analysis of speech signal using window techniques**. International Journal of Computer Applications, 131(14), 33-36.

SALGADO, M. F. P. **Aplicação de Técnicas de Otimização à Engenharia de Confiabilidade**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SECO, Sónia Maria Pereira. **Sistema massa-mola**. Dissertação de Mestrado, 2012.

SERRIDGE, Mark; LICHT, Torben R. **Piezoelectric accelerometers and vibration preamplifiers: theory and application handbook**. 1987.

SINHA, J.K. **Vibration Analysis, Instruments, and Signal Processing**. T. & Francis Group, 2015.

ROBINSON, J.C.; ARLINGTON, S. **Considerations for Accelerometer Mounting on Motors**. Depew, New York: IMI Sensors, 2018.

ROQUE, A.A. **Introdução à Manutenção Condicionada e Análise de Vibrações**.

SEQUERIA, C. **Sensores para medições de vibrações Mecânicas – Acelerômetros**. Revista Manutenção, 2013.

WILCOXON SENSING TECHNOLOGIES. **Installation of Vibration Sensors**. Gaithersburg: Wilcoxon Sensing Technologies, 2019.