

**MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO**

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
PROPULSÃO NAVAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DIAGNÓSTICO DE FALHAS UTILIZANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM
MÁQUINAS ROTATIVAS DA MARINHA DO BRASIL**



PRIMEIRO-TENENTE MICHAEL FONSECA FROUFE

Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE MICHAEL FONSECA FROUFE

DIAGNÓSTICO DE FALHAS UTILIZANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM
MÁQUINAS ROTATIVAS DA MARINHA DO BRASIL

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval.

Orientadores:

CC (RM1-EN) Carlos Alfredo Orfão Martins

CC (EN) Renato Bodanese

Prof. Ulisses A. Monteiro, D. Sc – COPPE/UFRJ

PRIMEIRO-TENENTE MICHAEL FONSECA FROUFE

DIAGNÓSTICO DE FALHAS UTILIZANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM
MÁQUINAS ROTATIVAS DA MARINHA DO BRASIL

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial
à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval.

Aprovada em _____

Banca Examinadora:

Renato Bodanese, CC (EN) – AMRJ

Ulisses A. Monteiro, D. Sc – COPPE/UFRJ

Carlos Alberto Órfão Martins, CC (RM1-EN), M. Sc. – CIAA

CIAA
Rio de Janeiro
2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meu sincero agradecimento a todas as pessoas que tornaram possível a conclusão do meu trabalho de conclusão de curso. Em especial, quero agradecer ao mestre Ulisses, meu orientador, professor de termodinâmica, turbina e vibrações, cuja orientação e conhecimento foram fundamentais para o sucesso deste projeto. Sua metodologia, que se destaca por sempre fixar o conteúdo dos alunos, foi crucial para o aprendizado e o desenvolvimento deste trabalho.

Também quero estender meus agradecimentos ao Coordenador do curso de Propulsão Naval, Capitão de Corveta (RM1 - EN) Carlos Alberto Órfão Martins, que sempre lutou pela nossa turma, demonstrando excelência como professor, notável senso de justiça e cuja brilhante carreira e formação, justificam a sua excepcional qualidade como educador.

Além disso, agradeço ao Capitão de Corveta (EN) Renato Bodanese, cuja contribuição técnica e fornecimento de subsídios da sua área de atuação, foi inestimável para o desenvolvimento do trabalho.

Não posso deixar de mencionar o apoio inestimável dos meus pais, Edilânia e Eduardo, e a inspiração contínua das minhas filhas, Milena e Maria Clara, que me motivaram a ser melhor a cada dia. E, é claro, um agradecimento especial à minha esposa, Mariane, que não apenas me apoiou incondicionalmente, mas também desempenhou um papel fundamental nesta jornada, proporcionando amor, compreensão e suporte emocional e físico ao longo de todo o processo.

Todas essas contribuições e apoios foram essenciais para a realização deste trabalho, e sou profundamente grato a cada um de vocês. Obrigado.

“Se enxerguei mais longe, foi porque me apoiei sobre os ombros de gigantes.”

Isaac Newton

DIAGNÓSTICO DE FALHAS UTILIZANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM MÁQUINAS ROTATIVAS DA MARINHA DO BRASIL

RESUMO

Este trabalho aborda a análise de vibrações como uma ferramenta fundamental no ambiente naval. Vibrações são comuns em navios, provenientes de diversas fontes, como movimentos oceânicos e operações de máquinas. Essas vibrações têm implicações diretas na segurança, supervisão estrutural e eficiência operacional das embarcações. Falhas prematuras e desgaste acelerado de equipamentos críticos são exemplos de problemas associados às vibrações.

A análise de vibrações baseia-se na ideia de que problemas mecânicos geram vibrações em frequências específicas, tornando possível identificar e diagnosticar problemas com precisão. Este estudo concentra-se na análise de vibrações em duas bombas de incêndio no Arsenal da Marinha do Rio de Janeiro, uma principal e outra auxiliar. Especificamente abordando a metodologia de emprego para uma compreensão mais aprofundada dos sinais e a identificação de possíveis falhas. Destacando a importância da implementação da análise de vibrações como uma técnica de manutenção preditiva, especialmente em equipamentos críticos em embarcações, contribuindo significativamente para aprimoramento da eficiência, segurança e desempenho operacional da Marinha do Brasil.

PALAVRAS-CHAVES: Vibrações mecânicas; análise de frequência; bombas de incêndio, manutenção preditiva; Marinha do Brasil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Exemplo de filtragem de sinal.....	21
Figura 2 -	Conversão de um sinal no espectro temporal para o da frequência	23
Figura 3 -	Espectro da frequência característica motor-bomba com desalinhamento.....	25
Figura 4 -	Comportamento do espectro e forma de onda de desbalanceamento.....	26
Figura 5 -	Bomba vertical diagnosticada com desbalanceamento.....	26
Figura 6 -	Comportamento característico do espectro de empenamento de eixo.....	27
Figura 7 -	Fenômeno de ressonância ocorrendo na Ponte Tacoma Narrows em 1940.....	29
Figura 8 -	Espectro de frequência e temporal característico de folgas.....	30
Figura 9 -	Exemplo de uma alta vibração presente na bomba, indicando cavitação	31
Figura 10 -	Sinais temporais de vibração da bomba de incêndio.....	36
Figura 11 -	Sinais temporais de vibração do mancal nº1.....	36
Figura 12 -	Sinais temporais de vibração do mancal nº4.....	36
Figura 13 -	Sinais temporais de vibração do mancal nº8.....	37
Figura 14 -	Sinais temporais após filtro de vibração da bomba de incêndio.....	37
Figura 15 -	Sinais temporais após filtro de vibração do mancal nº1.....	38
Figura 16 -	Sinais temporais após filtro de vibração do mancal nº4.....	38
Figura 17 -	Sinais temporais após filtro de vibração do mancal nº8.....	38
Figura 18 -	RMS = 14.774 mm/s e 9.100 mm/s para a bomba de incêndio.....	39
Figura 19 -	RMS = 27.860 mm/s e 25.034 mm/s para o mancal nº1.....	39
Figura 20 -	RMS = 14.643 mm/s e 13.865 mm/s para o mancal nº4.....	40
Figura 21 -	RMS = 4.591 mm/s e 0.792 mm/s para o mancal nº8.....	40
Figura 22 -	Técnica de Janelamento.....	41
Figura 23 -	Integração na frequência para a bomba de incêndio.....	42
Figura 24 -	Integração na frequência para o mancal nº1.....	42
Figura 25 -	Integração na frequência para o mancal nº4.....	42
Figura 26 -	Integração na frequência para o mancal nº8.....	43

Figura 27 -	Código análise temporal dos sinais.....	47
Figura 28 -	Código filtragem de sinal.....	47
Figura 29 -	Código integração de sinal.....	48
Figura 30 -	Código análise no espectro da frequência.....	49
Figura 31 -	Código análise integrada no espectro da frequência.....	49
Figura 32 -	Limite de velocidade de vibração conforme norma ISO.....	50

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
ISO	<i>Organization for Standardization</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>

LISTAS DE SÍMBOLOS

ω_0	Frequência Natural de Ressonância
V_{RMS}	Valor Eficaz de Tensão
$\sum_{i=1}^n -$	Somatório
$\int_0^T f(x)$	Integral Definida
K	Ganho no sistema
s	Variável Complexa no Domínio da Frequência
Q	Fator de Qualidade
dt	Derivada de t
T	Período(tempo)
$H(s)$	Função de Transferência no Tempo
$v(t)$	Sinal de Tensão no Domínio do Tempo
$X(f)$	Transformada de Fourier de x(t) no Domínio da Frequência
$a(t_i)$	Função no Domínio do Tempo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	16
1.2 PROBLEMATIZAÇÃO	17
2 OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVOS GERAIS.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
3.1 TRATAMENTO DE SINAIS	20
3.1.1 Filtro Bandpass Butterworth.....	20
3.1.2 Integração de Sinais e Velocidade RMS	21
3.1.3 Transformada Rápida de Fourier (FFT)	22
3.1.4 Técnica de Janelamento na Análise de Frequência.....	23
3.2 FALHAS DE ORIGEM MECÂNICA.....	24
3.2.1 Desalinhamento.....	24
3.2.1 Desbalanceamento.....	25
3.2.3 Empenamento do eixo	27
3.2.4 Fundações e Ressonância	28
3.2.5 Folgas	29
3.2.6 Cavitação e Recirculação.....	30
4 METODOLOGIA	31
4.1 IMPORTAÇÃO E PREPARAÇÃO DOS DADOS	32
4.2 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS	32
4.3 FILTRAGEM NA FAIXA DE FREQUÊNCIA INDICADA	33
4.4 INTEGRAÇÃO DOS SINAIS	33
4.5 ANÁLISE ESPECTRAL	34
4.6 COMPARAÇÃO COM OS LIMITES DA NORMA	34
5 RESULTADOS	35
5.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS	35
5.2 FILTRAGEM NA FAIXA DE FREQUÊNCIA INDICADA	37
5.3 INTEGRAÇÃO DOS SINAIS.....	39
5.4 TÉCNICA DE JANELAMENTO	40
5.5 ANÁLISE ESPECTRAL.....	41

6 CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
ANEXO A	47
ANEXO B	50

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A operação eficiente e confiável das máquinas rotativas a bordo de navios de guerra é de extrema importância para as Marinhas em todo o mundo. Essas máquinas desempenham um papel vital, garantindo o funcionamento adequado de sistemas críticos, como sistemas propulsores e auxiliares, que desempenham um papel fundamental na segurança das operações navais. No entanto, devido às condições adversas enfrentadas em ambientes marítimos e à complexidade desses sistemas, falhas podem ocorrer, comprometendo a eficácia e colocando em risco tanto a tripulação quanto o sucesso das operações. Nesse contexto, a análise das vibrações emerge como uma ferramenta essencial para a prevenção de falhas e a manutenção proativa das máquinas rotativas da Marinha do Brasil (Leite, 2020).

As vibrações são indicadores críticos do desempenho e da condição dessas máquinas rotativas. Elas podem ser causadas por uma série de fatores, como desalinhamento de eixos, desequilíbrio de componentes, folga excessiva em rolamentos e outras anomalias mecânicas. Essas vibrações podem manifestar-se em diversas frequências e amplitudes, exigindo uma abordagem precisa e abrangente para seu monitoramento (Da Silva, 2018).

A monitoração das vibrações envolve a utilização de sensores e sistemas de aquisição de dados estrategicamente posicionados nas máquinas rotativas e sua estrutura, para capturar as vibrações geradas durante seu funcionamento. Esses sensores transmitem os dados coletados para um sistema de monitoramento centralizado, que os processa e interpreta, possibilitando uma avaliação precisa do estado das máquinas e a detecção precoce de possíveis falhas (Diniz, 2017).

A análise das vibrações é realizada por meio de técnicas avançadas de processamento de sinais, tais como análise espectral e análise de componentes principais. Essas técnicas permitem identificar padrões, tendências e anomalias nas vibrações, fornecendo informações valiosas sobre a condição das máquinas rotativas (Costa, 2017).

Este trabalho se propõe a conduzir uma pesquisa científica, com o intuito de explorar a

identificação de falhas em equipamentos por meio da análise de sinais vibratórios. Os dados de vibração fornecidos para esta pesquisa constituem uma peça fundamental do estudo. Compreendem seis sinais provenientes de uma bomba de incêndio auxiliar e dois sinais de uma bomba de incêndio principal. Para a aquisição desses dados, foram empregados acelerômetros, os quais se encontravam conectados a um coletor e analisador de sinais do modelo VIBXPERT II. Este dispositivo é reconhecido por sua capacidade de capturar e registrar de forma precisa as variações vibratórias em equipamentos industriais.

O processo de análise foi subsequente à aquisição dos dados, tendo sido desenvolvido em linguagem de programação Python, utilizando o ambiente interativo de código aberto, como Jupyter Notebook. Esta aplicação oferece uma plataforma flexível que simplifica a criação, importação, processamento, visualização e análise de dados no domínio da frequência, aprimorando assim a detecção de possíveis problemas. Os registros de vibração foram formatados em arquivos no formato .CSV, contendo informações de tempo e aceleração. Esta padronização facilita a manipulação e tratamento dos dados, além de se alinhar às melhores práticas de documentação e armazenamento de informações de monitoramento de condição.

A relevância desta pesquisa repousa na necessidade premente de manter a integridade e eficiência operacional de máquinas rotativas, fundamentais em diversas indústrias ao identificar padrões e tendências nas vibrações desses equipamentos, é possível antecipar e mitigar potenciais falhas, aumentando a confiabilidade e segurança operacional.

Dessa forma, o estudo não somente se concentra na aplicação prática da análise de sinais de vibração, mas também ressalta a sua importância na preservação da integridade e eficiência dos sistemas mecânicos, contribuindo com o aumento da disponibilidade operacional e a otimização dos recursos da Marinha do Brasil, fortalecendo, assim, sua capacidade de defesa e projeção de poder nos mares.

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

Segundo Godinho (2019), um obstáculo significativo reside na avaliação da confiabilidade da análise de vibração como uma medida preditiva para problemas das máquinas rotativas, onde embora as vibrações sejam comumente reconhecidas como indicativas de mau funcionamento, identificar a origem e a intensidade precisas dessas vibrações pode ser um desafio. A experiência em análise de vibração, juntamente com o acesso a tecnologias avançadas de processamento de sinal, é necessária para uma interpretação adequada dos dados coletados. Portanto, é fundamental priorizar a formação dos técnicos responsáveis pelo

monitoramento e prover os recursos necessários para a implantação bem-sucedida de sistemas eficazes e precisos.

A seleção adequada dos pontos de monitoramento e o entendimento das frequências e amplitudes consideradas críticas são outros fatores importantes a serem considerados, uma vez que cada máquina rotativa possui seus próprios padrões vibratórios distintos. Isso torna vital identificar os locais sensíveis e estratégicos para a colocação de sensores de monitoramento (Da Silveira Brizon, 2012). Adicionalmente, devem ser estabelecidos padrões e critérios claros para avaliar as vibrações, distinguindo entre ocorrências normais e anormais, e esses critérios também devem levar em consideração os vários tipos de navios de guerra, cada um com seus atributos exclusivos e necessidades operacionais.

Quando se trata de implementar o monitoramento de vibração, vários fatores logísticos e técnicos devem ser levados em consideração. Um dos desafios é instalar sensores em áreas de difícil acesso e em componentes que estão em constante movimento, como eixos e hélices. Além disso, é crucial garantir que a transmissão e o processamento de dados tenham a infraestrutura e os sistemas de comunicação necessários. As marinhas devem investir em tecnologias avançadas de aquisição e transmissão de dados, bem como em sistemas de monitoramento centralizados que ofereçam análise em tempo real e armazenamento seguro das informações.

Ao considerar a implementação do monitoramento de vibração, é crucial levar em consideração o custo-benefício. Embora essa medida proativa tenha o potencial de evitar grandes avarias e melhorar a disponibilidade das máquinas rotativas, as despesas envolvidas na aquisição, instalação e manutenção de sistemas de monitoramento podem ser substanciais. Por isso, é necessária uma análise minuciosa para avaliar as vantagens previstas em termos de segurança, eficiência operacional e redução dos custos de manutenção. Essa análise deve incluir uma comparação desses benefícios com os investimentos necessários para estabelecer e manter esses sistemas.

A segurança e a privacidade dos dados coletados por meio do monitoramento de vibração levantam preocupações éticas e legais significativas. As máquinas rotativas das embarcações navais são particularmente sensíveis, pois podem conter informações classificadas referentes a tecnologias militares e estratégias operacionais. Como resultado, é crucial implementar medidas de segurança robustas para proteger esses dados contra acesso não autorizado e possíveis vazamentos.

Para resumir, a utilização da análise de vibração como meio de prevenir falhas em máquinas rotativas de navios de guerra é uma grande promessa. No entanto, sua execução

enfrenta uma série de obstáculos intrigantes. Esses obstáculos envolvem questões técnicas, logísticas, de capacitação e de custo-benefício que devem ser superados para garantir a eficiência e confiabilidade desses sistemas. Além disso, é de extrema importância enfrentar preocupações éticas e legais relativas à segurança e privacidade dos dados coletados. Ao adotar uma abordagem abrangente e cuidadosa para enfrentar esses desafios, as forças navais poderão capitalizar totalmente as vantagens oferecidas pela análise de vibração. Isso, por sua vez, garantirá a prontidão operacional, a segurança e o triunfo de suas missões navais.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como propósito principal conduzir uma pesquisa científica voltada para a identificação de falhas em máquinas rotativas por meio da análise de sinais de vibração.

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo primordial do estudo é realizar uma análise minuciosa dos sinais de vibração provenientes de uma bomba de incêndio auxiliar e uma bomba de incêndio principal.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Essa meta será alcançada por meio dos seguintes passos:

1. Importação e Preparação dos Dados;
2. Filtragem na Faixa de Frequência Indicada;
3. Tratamento dos sinais;
4. Integração dos Sinais;
5. Análise Espectral; e
6. Avaliação Conforme as Normas.

Ao cumprir esses objetivos, o estudo visa proporcionar uma avaliação precisa da condição dos equipamentos rotativos, contribuindo para a manutenção preditiva, prevenção de falhas e aprimoramento do desempenho operacional. Ademais, busca-se demonstrar a importância da análise de sinais de vibração como uma ferramenta fundamental na manutenção e monitoramento de máquinas rotativas, com foco na identificação precoce de anomalias e potenciais falhas, evitando assim a necessidade de reparos mais complexos e dispendiosos. Como resultado, os navios de guerra podem experimentar uma notável redução nos custos

operacionais e de manutenção. Ao adotar essa abordagem proativa e baseada em dados, a Marinha do Brasil pode otimizar a disponibilidade dos meios, garantindo sua operação contínua e prontidão para enfrentar os desafios atuais e futuros.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção oferece uma revisão abrangente das principais abordagens utilizadas na análise de vibrações mecânicas para detecção e diagnóstico de falhas em equipamentos rotativos. Inicialmente, é abordado o processo de tratamento de sinais, destacando as técnicas e métodos empregados na preparação e interpretação dos dados de vibração.

Posteriormente, será realizada uma análise detalhada das falhas de origem mecânica mais comuns, fornecendo uma visão minuciosa de cada uma delas e discutindo seus impactos nas máquinas rotativas.

3.1 TRATAMENTO DE SINAIS

Aqui serão abordados de forma sucinta os tópicos essenciais empregados neste trabalho para o processamento e análise de sinais aleatórios adquiridos empiricamente. Esta etapa é crucial para estabelecer as bases teóricas e técnicas necessárias para a compreensão e interpretação dos dados coletados, permitindo uma análise precisa e informativa das características desses sinais.

3.1.1 Filtro Bandpass Butterworth

De acordo com Butterworth (1930, p.1) “Um filtro ideal não só deve rejeitar completamente as frequências indesejadas, mas também deve ter sensibilidade uniforme para as frequências desejadas.”

O filtro passa-banda Butterworth é um tipo de filtro que permite a passagem de um intervalo específico de frequências, enquanto atenua as frequências fora desse intervalo. Sua função de transferência $H(s)$ pode ser expressa na forma geral como:

$$H(s) = \frac{K}{(s^2 + s \cdot \omega_0 \cdot Q + \omega_0^2)} \quad (1)$$

O filtro passa-banda Butterworth é particularmente relevante neste estudo de análise de vibrações mecânicas. Ele desempenha um papel fundamental na preparação dos dados, permitindo que apenas as frequências de interesse, indicadas pelas normas aplicáveis, sejam isoladas para análise. Essa filtragem específica é crucial para identificar padrões e tendências associadas a possíveis falhas em equipamentos rotativos.

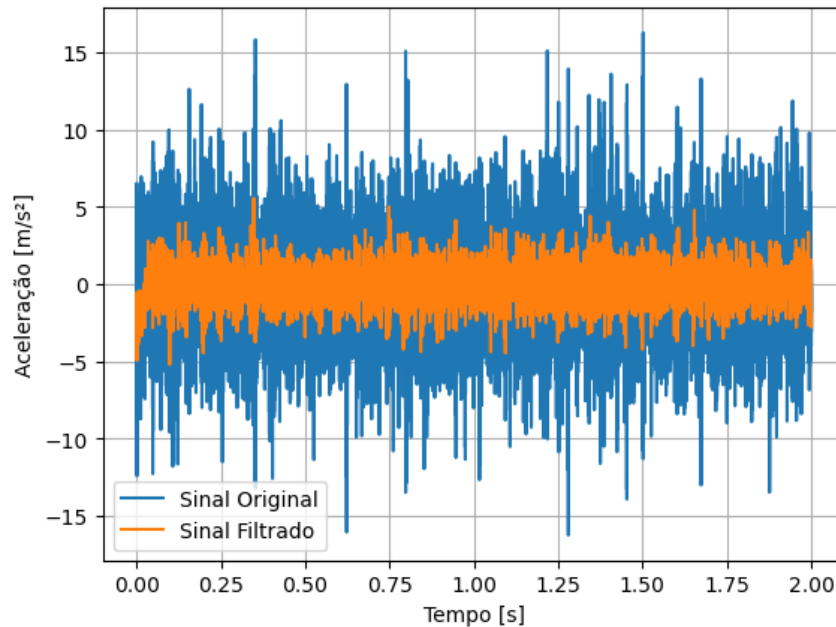


Figura 1: Exemplo de filtragem de sinal.

Fonte: Autores

3.1.2 Integração de Sinais e Velocidade RMS

A integração da aceleração para obter a velocidade é crucial na análise de vibrações. Uma abordagem numérica comumente utilizada é a regra do trapézio, que estima a área sob a curva do sinal de aceleração. Esta técnica é expressa como:

$$v(t) \approx \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (a(t_i) + a(t_{i-1})) (t_i - t_{i-1}) \quad (2)$$

A integração permite compreender a relação entre aceleração e velocidade, proporcionando insights sobre o comportamento dinâmico dos sistemas mecânicos. Isso é essencial para a detecção de falhas e análise de vibrações.

Segundo Rocha (2014, p.34) “O RMS é uma média global da vibração, representa a quantidade de energia contida em uma vibração. É indicada para vibrações de média e baixa frequência relacionadas a dinâmica da máquina.”

A velocidade RMS, abreviação de *Root Mean Square* (em português, Valor Quadrático Médio), é uma medida estatística que representa a amplitude eficaz de uma grandeza variável, como a velocidade em um sinal de vibração, com a seguinte equação:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (3)$$

A velocidade RMS, desempenha um papel crítico na avaliação de vibrações mecânicas, sendo um parâmetro fundamental para verificar a conformidade com as normas estabelecidas. A norma ISO 10816-7 especifica que “A quantidade de medição a ser utilizada para a vibração das partes não rotativas de bombas roto-dinâmicas é a velocidade de vibração *root-mean-square* (RMS) em mm/s.”

Este valor desempenha um papel-chave na identificação de possíveis falhas em equipamentos rotativos. Ele fornece uma medida eficaz da amplitude das vibrações, sendo crucial para determinar a condição operacional dos componentes mecânicos e avaliar a necessidade de intervenções preventivas ou corretivas. Portanto, a análise da velocidade RMS é um aspecto central na investigação de condições de operação seguras e eficazes em máquinas rotativas.

3.1.3 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Como visto no Guia de Diagnóstico de Vibração (2000, p. 24) “Se um problema na máquina existe, os espectros da FFT fornecem informações para ajudar a determinar a localização do problema, a causa do problema e, com análise de tendências, quanto tempo até que o problema se torne crítico.”

A análise do espectro de frequência desempenha um papel crucial na caracterização de sinais de vibração mecânica. Uma das ferramentas mais fundamentais para essa análise é a Transformada Rápida de Fourier (FFT), que permite a conversão de um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência de maneira eficiente.

A FFT é uma implementação algorítmica da Transformada de Fourier, um conceito matemático essencial em processamento de sinais. Ela permite a decomposição de um sinal

complexo em suas componentes de frequência individuais. A fórmula da FFT pode ser expressa como:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (4)$$

Para Silva (2013, p.8) “A Transformada de Fourier se tornou a ferramenta mais importante no processamento de sinais devido ao uso amplo e consolidado do espectro de frequências para análise de um sinal”.

A utilidade da FFT neste contexto reside na capacidade de identificar e analisar as diferentes frequências presentes nos sinais de vibração. Isso é crucial para a detecção de padrões associados a possíveis falhas em equipamentos rotativos. Através da FFT, é possível determinar a frequência de ressonância e outros componentes modulantes que podem indicar anomalias no sistema mecânico.

No âmbito deste trabalho, a aplicação da FFT é de importância central, pois fornece uma base sólida para a análise de sinais de vibração. Ela permite uma representação clara e precisa das características de frequência dos dados coletados, contribuindo significativamente para a identificação precoce de potenciais falhas em equipamentos rotativos. Portanto, a utilização da FFT é fundamental para atingir os objetivos deste estudo.

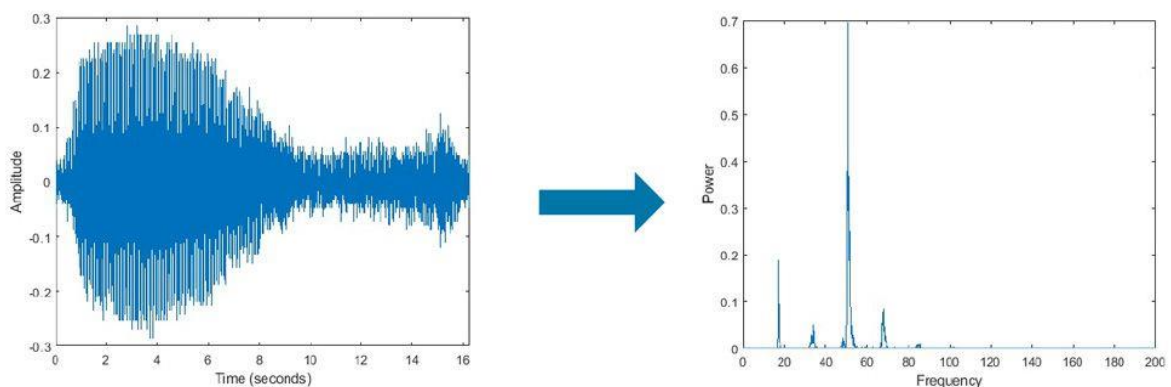


Figura 2: Conversão de um sinal no espectro temporal para o da frequência.

Fonte: Mathworks, <https://fr.mathworks.com/discovery/fft.html>

3.1.4 Técnica de Janelamento na Análise de Frequência

A técnica de janelamento é uma estratégia crucial na análise de sinais no domínio da frequência, especialmente quando se utiliza a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Ela consiste em multiplicar a série temporal original por uma função de janela, que tem o efeito de reduzir as bordas abruptas do sinal e minimizar o vazamento espectral.

A operação de janelamento é realizada multiplicando-se a série temporal pelo vetor de janela. Após o janelamento, a FFT é aplicada à série temporal janelada, resultando em um espectro de frequência que representa as diferentes componentes de frequência presentes no sinal. As amplitudes e as frequências correspondentes são então calculadas.

Além disso, a implementação dessa técnica permite a especificação de limites de frequência para a escala do eixo x, o que facilita a visualização de faixas de interesse específicas. A técnica de janelamento é crucial nesta abordagem, pois ajuda a mitigar o vazamento espectral, melhorando a precisão na identificação das frequências relevantes. Isso é essencial para a detecção e diagnóstico de possíveis falhas em equipamentos rotativos, contribuindo para uma análise mais precisa e confiável dos dados de vibração.

3.2 FALHAS DE ORIGEM MECÂNICA

É fundamental compreender os conceitos de falhas de origem mecânica neste trabalho, pois são essenciais para a identificação e diagnóstico preciso de potenciais problemas em máquinas elétricas rotativas. Nesta seção, serão abordados de forma concisa e exemplificada diversos problemas comuns encontrados em máquinas elétricas rotativas.

Entre os tópicos a serem discutidos estão: desbalanceamento, desalinhamento, empenamento de eixos, folgas, fundação e ressonância, cavitação e recirculação. Cada um desses problemas será brevemente analisado, proporcionando uma compreensão abrangente dos potenciais origens de falhas em equipamentos rotativos.

3.2.1 Desalinhamento

Como dito por Almeida (2018, p.14) “Geralmente em todos os tipos de montagens, o desalinhamento pode impor forças sobre os mancais suportes, que reduzirão a vida útil da unidade.”

O desalinhamento é uma falha comum em máquinas rotativas e ocorre quando os eixos de duas máquinas acopladas apresentam um deslocamento angular ou paralelo. Isso pode

acontecer quando o centro de um dos mancais não está alinhado com os demais, ou quando um dos mancais está inclinado em relação aos demais.

O desalinhamento pode ser causado por erros de montagem, recalque de fundações, dilatação térmica, deformação da estrutura ou travamento do acoplamento. Existem dois tipos principais de desalinhamento: o paralelo, que ocorre quando as linhas de centro dos eixos se cruzam formando um ângulo entre elas, e o angular, onde as linhas de centro dos eixos são paralelas, mas apresentam um deslocamento. Identificar e corrigir o desalinhamento é essencial para garantir a operação eficiente e prolongar a vida útil dos equipamentos rotativos.

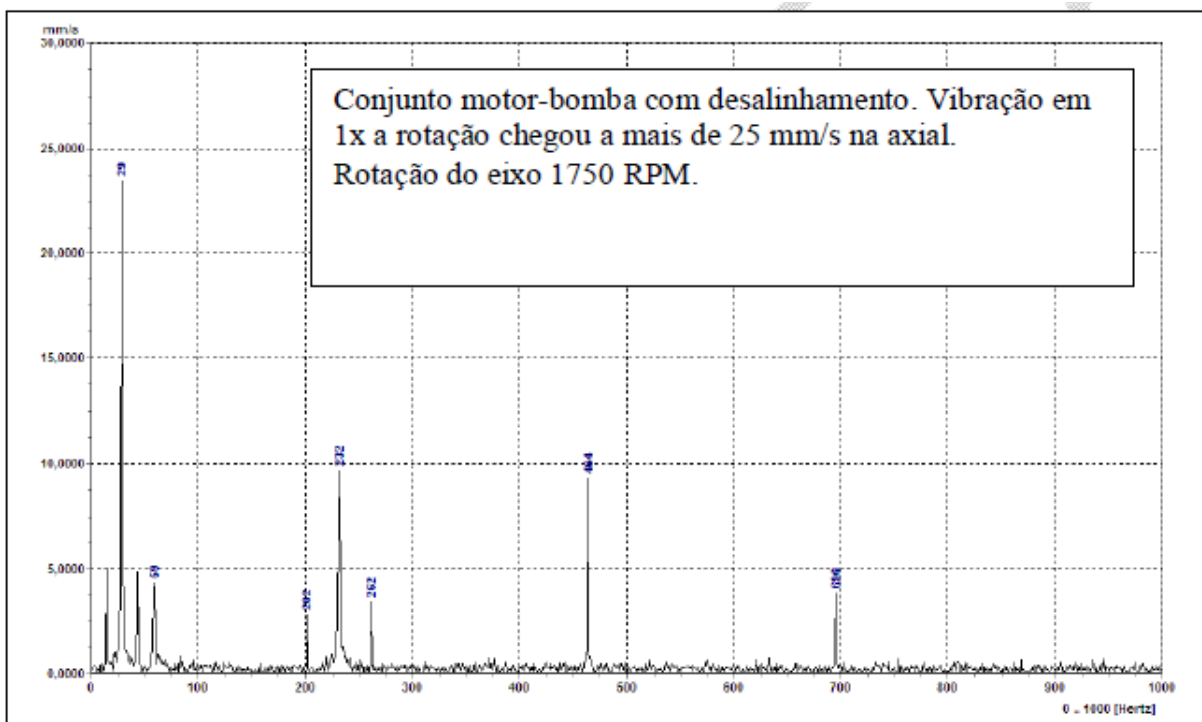


Figura 3: Espectro da frequência característico de motor-bomba com desalinhamento.

Fonte: Almeida (2018).

3.2.1 Desbalanceamento

Segundo Almeida (2018, p.27) “Bombas são excitadas, principalmente por desbalanceamento e desalinhamento. Os desgastes abrasivos, resíduos de produtos ou sujeira, são as principais causas do desbalanceamento durante a operação.”

O desbalanceamento é uma das falhas mecânicas mais comuns em máquinas rotativas. Ele ocorre quando a distribuição de massa ao redor do eixo de rotação não é uniforme, resultando em uma carga excêntrica durante a operação. Isso gera vibrações excessivas que podem levar a danos nos componentes da máquina e reduzir sua eficiência operacional.

O desbalanceamento pode ser causado por diversos fatores, como erros de montagem, incrustações, desgaste, ruptura ou perda de componentes. Na prática, é virtualmente impossível instalar um rotor perfeitamente balanceado. Sendo assim, identificar e corrigir desbalanceamentos é crucial para manter a integridade e eficiência operacional das máquinas rotativas.

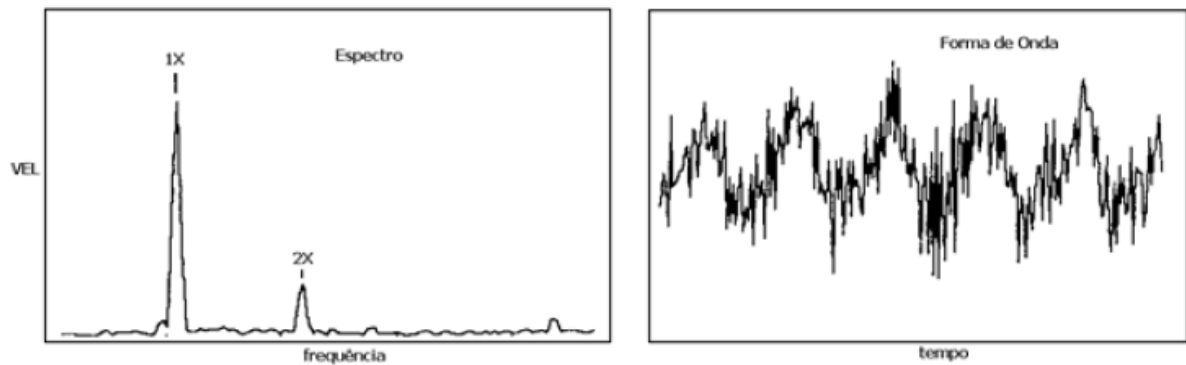


Figura 4: Comportamento do espectro e forma de onda de desbalanceamento.

Fonte: Emerson (2006).



Figura 5: Bomba vertical diagnosticada com desbalanceamento.

Fonte: Almeida (2018).

3.2.3 Empenamento do eixo

O empenamento de eixo, segundo Rocha (2014, p.46), “[...] pode provocar elevada vibração, sendo um problema comumente confundido com desbalanceamento e desalinhamento. A execução de um balanceamento poderá reduzir a vibração provocada, porém raramente irá eliminá-la.”.

De acordo também com Almeida (2018, p.15) “Quando o rotor bombeia fluidos com altas temperaturas, pode haver um empenamento do eixo, que causa uma alta vibração axial análoga ao desalinhamento”.

O empenamento de eixos ocorre quando há uma deformação ou curvatura no eixo da máquina. Isso pode ser causado por diversos fatores, como má montagem, estocagem inadequada de eixos e rotores, ou pelo aquecimento localizado do eixo, especialmente em máquinas térmicas e motores elétricos. O empenamento compromete a precisão do alinhamento e a operação suave da máquina, levando a vibrações excessivas e aumentando o desgaste dos componentes.

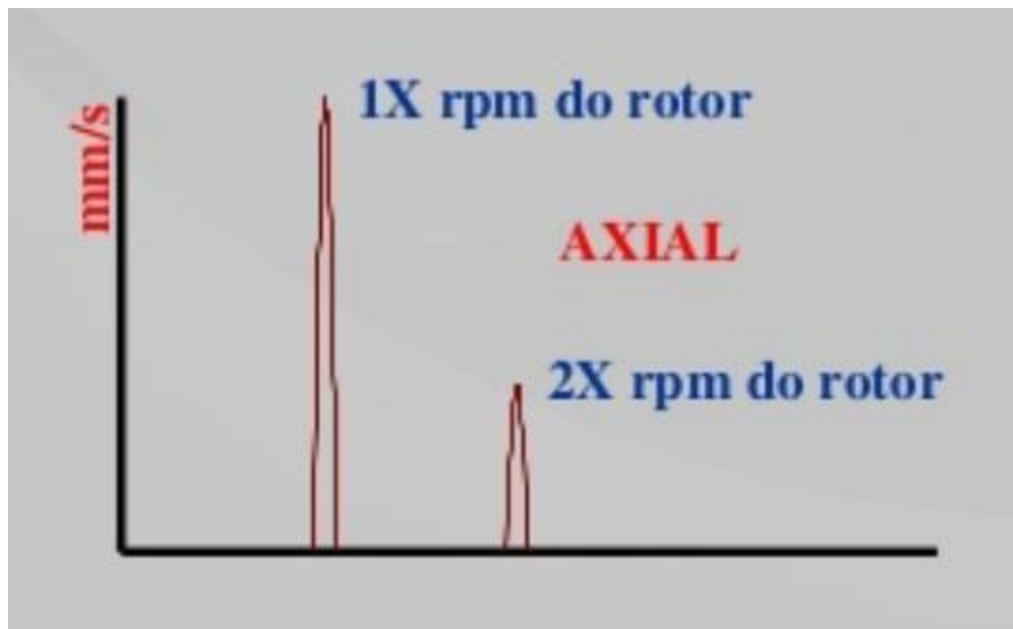


Figura 6: Comportamento característico do espectro de empenamento de eixo.

Fonte: CT VIBRAÇÕES (2017).

3.2.4 Fundações e Ressonância

Como expressado por Almeida (2018, p.15), “Algumas vezes, economias na construção da base resultam em um suporte inadequado, e torna-se difícil obter e manter um bom alinhamento.”

A importância de uma base estrutural adequada para o funcionamento eficiente e estável de um conjunto de bomba/motor não pode ser subestimada. Essa base serve como o alicerce crucial que sustenta as unidades, garantindo não apenas a estabilidade, mas também a integridade do alinhamento entre a bomba e o motor. Seja construída em aço ou em concreto armado, a estrutura suporte desempenha um papel fundamental na absorção e distribuição das cargas e vibrações geradas durante a operação.

Ao fornecer um suporte sólido e nivelado, ela contribui diretamente para o desempenho confiável e prolongado do conjunto mecânico, reduzindo assim o desgaste excessivo e os potenciais problemas de vibração associados. Portanto, investir na construção de uma base estrutural bem projetada é uma etapa crucial na garantia da operação eficiente e duradoura de um sistema de bomba/motor.

Almeida (2018, p.45) também diz na mesma seção “Uma ressonância de fundação pode ocorrer se a estrutura tem uma frequência natural próxima da velocidade de operação da bomba.”

A ressonância é um fenômeno vibratório que ocorre quando uma força externa é aplicada a um sistema mecânico em uma frequência natural específica, levando a amplificações significativas de amplitude de vibração. Esse é um fenômeno perigoso em máquinas rotativas, pois pode resultar em danos graves e até mesmo falhas catastróficas.

Quando uma máquina opera perto de sua frequência natural, a ressonância pode ocorrer, fazendo com que as amplitudes de vibração se elevem drasticamente. Isso pode levar à fadiga prematura de componentes, desalinhamento, empenamento de eixos e, em casos extremos, até mesmo à ruptura de peças. Além disso, a ressonância também pode gerar ruídos excessivos e comprometer a segurança dos trabalhadores que operam ou estão próximos à máquina.

É crucial identificar e evitar condições de ressonância em sistemas mecânicos. Isso pode ser feito através de análises detalhadas de vibração e modelagem estrutural, garantindo que as frequências operacionais estejam bem afastadas das frequências naturais do sistema. Também é importante considerar amortecimento adequado e implementar medidas de segurança, como isolamento de vibração ou reforço estrutural, quando necessário. A compreensão e gestão da ressonância são fundamentais para manter a integridade e a segurança das máquinas rotativas.

Um exemplo clássico de ressonância é a ponte Tacoma Narrows, em que por uma falha de engenharia, a frequência natural da ponte por um instante se igualou a frequência das rajadas do vento. Como apresentado na icônica figura, esse acontecimento pode ser, e nesse caso foi, catastrófico. Ao vibrarem em sintonia, a ponte começa a deformar violentamente, até que no final se colapsa.



Figura 7: Fenômeno de ressonância ocorrendo na Ponte Tacoma Narrows em 1940.

Fonte: Structure Magazine, <https://www.structuremag.org/?p=19995>.

3.2.5 Folgas

As folgas de fixação representam um problema comum em máquinas rotativas e podem ter um impacto significativo no comportamento vibratório. Essas folgas ocorrem quando há espaço excessivo ou movimento indesejado em componentes de fixação, como parafusos ou encaixes.

Geralmente, as altas vibrações associadas a folgas de fixação são mais pronunciadas na direção da fixação, comumente na vertical, e podem ser observadas em múltiplos de duas vezes a rotação por minuto ($2x$ RPM) da máquina, acompanhados por harmônicos adicionais. Segundo Almeida (2018, p.15) “Quando há folgas excessivas de fixação também pode aparecer um componente sub-harmônico com frequência igual $(1/2)RPM$, bem como inter-harmônicos $(1,5 - 2,5 - 3,5)RPM$ ”.

É importante ressaltar que as folgas muitas vezes coexistem com outros problemas mecânicos, como desbalanceamento e desalinhamento. Essa interação pode tornar a identificação e o diagnóstico preciso das causas das vibrações mais desafiadores. Portanto, ao analisar as vibrações em máquinas rotativas, é essencial considerar a possibilidade de folgas de

fixação e avaliar a integridade dos componentes de fixação como parte do processo de manutenção preditiva.

A mitigação das folgas de fixação pode envolver medidas como a inspeção regular e a substituição de componentes desgastados, a aplicação de técnicas de fixação mais robustas e o monitoramento contínuo das vibrações para detectar sinais de folgas em estágios iniciais. Isso ajuda a evitar danos mais graves e a manter a operação eficiente e segura da máquina.

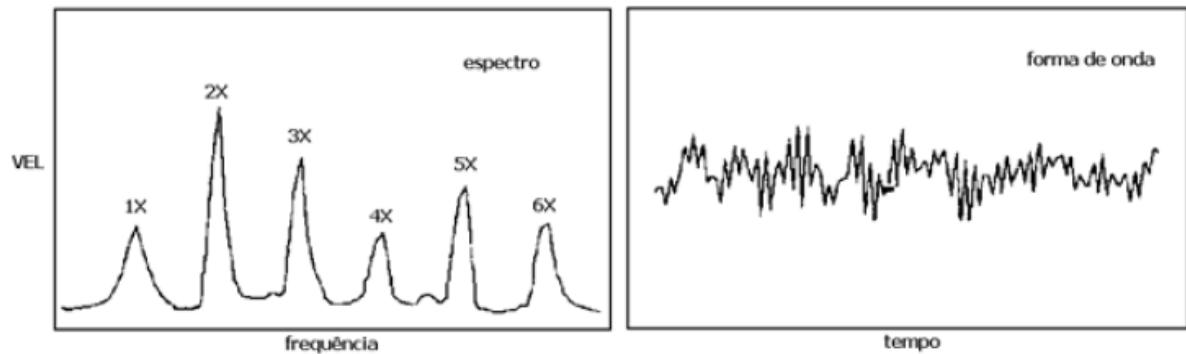


Figura 8: Espectro de frequência e temporal característico de folgas.

Fonte: Emerson (2006).

3.2.6 Cavitação e Recirculação

Por mais que não seja uma falha mecânica, a cavitação é um fenômeno hidrodinâmico que pode ocorrer em bombas e outros equipamentos mecânicos que manipulam fluidos. Ela se manifesta quando a pressão local de um líquido cai abaixo da sua pressão de vapor, levando à formação de bolhas de vapor. Segundo Almeida (2018, p.19) “No processo de cavitação, as bolhas de ar implodem violentamente criando ondas de pressão, que chegam às estruturas gerando vibrações.”

Esse processo pode resultar em danos sérios nas superfícies das peças, levando à erosão e à degradação do material. A cavitação é particularmente prejudicial em bombas, onde pode causar desgaste prematuro das pás do rotor, causando perda de eficiência e aumento de vibrações. Além disso, a presença de bolhas de vapor no fluido pode interferir na operação normal da bomba, diminuindo sua capacidade de transporte e gerando ruído excessivo.

Para prevenir a cavitação, é essencial projetar e operar os equipamentos adequadamente. Isso inclui a seleção adequada do tipo de bomba, dimensionamento correto para a aplicação, manutenção regular e monitoramento contínuo das condições operacionais. A inspeção visual das pás e a análise de vibração também são métodos comuns para detectar os primeiros sinais de cavitação.

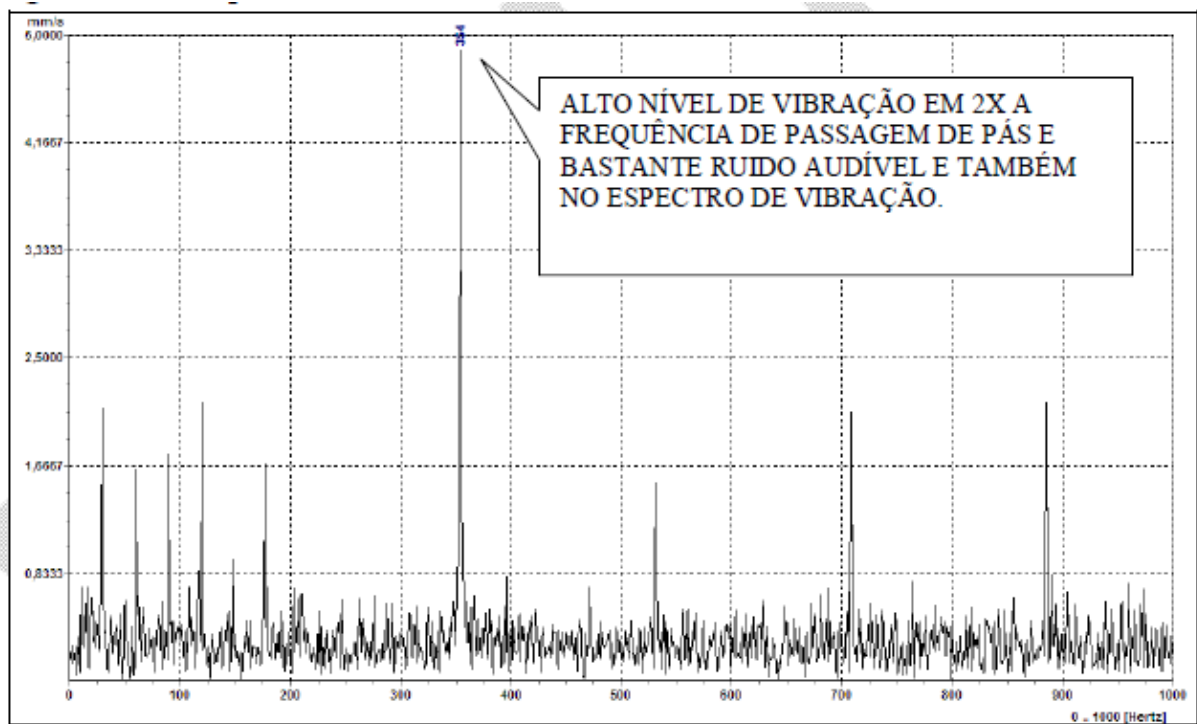


Figura 9: Exemplo de uma alta vibração presente na bomba, indicando cavitação.

Fonte: Almeida (2018).

A recirculação também é um fenômeno hidrodinâmico, porém, diferente da cavitação, ele ocorre em sistemas de bombeamento quando parte do fluido bombeado retorna à entrada da bomba, em vez de ser direcionado ao seu destino final. Isso pode ocorrer devido a diversos fatores, como um desenho inadequado do sistema, velocidades muito altas ou baixas do fluido, ou alterações abruptas na direção do fluxo.

Segundo Almeida (2018, p.20) “A recirculação geralmente ocorre quando a máquina está operando com baixa capacidade ou alta pressão de sucção. Nesse caso, o fluido retorna da espiral de saída para o rotor.”

A recirculação é problemática pois pode resultar em desgaste excessivo nas pás e no rotor da bomba, levando à diminuição da eficiência e à ocorrência de vibrações anormais. Além disso, o aumento da temperatura e a formação de turbulência causada pela recirculação podem levar a uma redução na vida útil da bomba.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo visa conduzir uma análise abrangente dos sinais de vibração provenientes de oito diferentes pontos de medição. Dois desses pontos correspondem à bomba de incêndio principal, enquanto os seis restantes são relativos aos mancais da bomba auxiliar. Cada sinal de vibração foi obtido em duas direções: horizontal e vertical.

As análises foram realizadas com códigos desenvolvidos pelos próprios autores em Python, os quais estão disponíveis no Anexo A para referência e replicação do estudo. Esta abordagem permite uma compreensão detalhada das características vibracionais dos equipamentos em estudo, proporcionando insights valiosos para a identificação de possíveis falhas e aprimoramento da confiabilidade operacional.

4.1 IMPORTAÇÃO E PREPARAÇÃO DOS DADOS

Os sinais de vibração foram inicialmente importados a partir dos arquivos .CSV fornecidos. Cada arquivo foi submetido a uma análise para assegurar que os dados estivessem corretamente estruturados, incluindo um cabeçalho contendo informações de tempo e aceleração.

4.2 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

A etapa de análise exploratória dos dados é fundamental para compreender a natureza dos sinais de vibração adquiridos. Ela consiste em uma investigação inicial que nos fornece informações valiosas sobre as características gerais dos sinais e pode revelar padrões ou comportamentos incomuns.

Durante esta etapa, examinamos as séries temporais dos sinais de vibração em ambos os eixos (horizontal e vertical) para todos os oito pontos de medição. Isso nos permite observar a variabilidade ao longo do tempo e identificar possíveis tendências, ciclos ou eventos discretos que podem ser indicativos de comportamentos anômalos.

Além disso, a análise exploratória nos ajuda a identificar a presença de ruídos ou interferências nos sinais, os quais podem ser eliminados ou mitigados por meio de técnicas de filtragem adequadas. Ela também nos dá uma primeira impressão da amplitude das vibrações e se estas estão dentro das expectativas para o tipo de equipamento e aplicação em questão.

Em resumo, a análise exploratória dos dados é a primeira linha de investigação na interpretação dos sinais de vibração. Ela proporciona uma visão inicial das características dos

dados e orienta as etapas subsequentes da análise, incluindo a filtragem na faixa de frequência indicada e a integração para obtenção da velocidade.

4. 3 FILTRAGEM NA FAIXA DE FREQUÊNCIA INDICADA

Para assegurar a precisão e confiabilidade da análise de vibrações, foi aplicada uma etapa crucial de filtragem dos sinais adquiridos. Conforme prescrito pela ISO 10816-7, a instrumentação de medição deve estar em conformidade com os requisitos estabelecidos na ISO 10816-7. “Esta instrumentação deve ser capaz de medir a velocidade eficaz (r.m.s.) de vibração em uma ampla faixa de frequência, que abrange no mínimo de 10 Hz a 1 000 Hz, e deve estar de acordo com os requisitos especificados na ISO 2954”.

Dado que a frequência de amostragem dos sinais é de 32768 Hz, a filtragem foi realizada por meio de um filtro de banda (*bandpass*) com parâmetros determinados pela ISO 10816-7. Esse tipo de filtro é especialmente projetado para reter as frequências de interesse, rejeitando aquelas fora da faixa relevante para a análise.

A aplicação deste filtro garante que os componentes de frequência relevantes para a avaliação da condição das máquinas rotativas sejam preservados, enquanto ruídos e frequências indesejadas sejam atenuados. Essa abordagem é essencial para assegurar que apenas os dados pertinentes à análise de vibração sejam considerados, proporcionando resultados mais precisos e confiáveis. Esta etapa de filtragem prepara os sinais para as análises subsequentes, incluindo a integração para obtenção da velocidade e a análise espectral.

4. 4 INTEGRAÇÃO DOS SINAIS

Nesta etapa, procedemos com a integração dos sinais de aceleração para obter os valores de velocidade, um parâmetro essencial na análise de vibrações mecânicas. Antes de prosseguir com a descrição do processo de integração, é fundamental compreender o conceito de Valor Eficaz Quadrático Médio (RMS).

A integração dos sinais de aceleração é realizada numericamente para obter os valores de velocidade. Este processo é crucial porque a velocidade é um parâmetro-chave na avaliação de vibrações, sendo diretamente relacionada às forças dinâmicas e potenciais danos nos componentes mecânicos. A integração é realizada tanto para os dados na direção horizontal quanto na vertical, permitindo uma análise completa das vibrações em todas as orientações.

Ao obter os valores de velocidade, estamos em posição de avaliar com precisão o nível de vibração experimentado pelos pontos de medição, proporcionando informações valiosas para a identificação de possíveis falhas ou desgaste excessivo nos equipamentos. Esta etapa é crucial para a manutenção preditiva e a segurança operacional dos sistemas mecânicos em questão.

4.5 ANÁLISE ESPECTRAL

A análise espectral é uma etapa crítica na avaliação de sinais de vibração, pois nos permite decompor o sinal no domínio da frequência, revelando as diferentes componentes de frequência que contribuem para a vibração do sistema. Para realizar essa análise, empregamos a Transformada Rápida de Fourier (FFT), uma técnica poderosa e amplamente utilizada em processamento de sinais.

Transformada Rápida de Fourier (FFT): A FFT é um algoritmo eficiente para calcular a Discreta Transformada de Fourier (DFT) de uma sequência de dados. Em essência, ela transforma um sinal de domínio temporal em seu equivalente no domínio da frequência.

Esta etapa é realizada após a filtragem dos sinais na faixa de frequência indicada pela ISO 10816-7. A resolução espectral é determinada pelo comprimento da série temporal e pela frequência de amostragem. A análise espectral nos fornece um espectro de frequência que destaca as frequências predominantes nos sinais de vibração.

A importância desta etapa reside na capacidade de identificar as frequências dominantes presentes nos sinais de vibração. Cada componente de frequência pode indicar características operacionais específicas ou condições anômalas nas máquinas rotativas. Por exemplo, a presença de determinadas frequências pode ser indicativa de desbalanceamento, falhas em rolamentos ou problemas de alinhamento.

O procedimento consistiu na preparação dos sinais através da filtragem, isolando as frequências de interesse. Em seguida, a FFT foi aplicada a cada sinal de vibração, resultando em um espectro de frequência para cada ponto de medição e direção. Os espectros de frequência foram então analisados para identificar as componentes de frequência significativas.

Essa análise espectral proporciona uma visão detalhada das características de frequência dos sinais de vibração, permitindo a detecção de padrões ou comportamentos que possam indicar falhas ou desgaste nos componentes mecânicos. Essas informações são cruciais para a tomada de decisões informadas sobre a manutenção e operação dos equipamentos.

4.6 COMPARAÇÃO COM OS LIMITES DA NORMA

A última etapa da análise de vibrações consiste na comparação dos resultados obtidos com os limites estabelecidos pela norma ISO 10816-7, apresentada no Anexo B, além da análise minuciosa dos gráficos no espectro de frequência. Nessa análise, busca-se identificar qualquer anomalia por meio da detecção de amplitudes em frequências específicas que possam se assemelhar a padrões previamente reconhecidos. Referente a norma, ela fornece critérios para avaliar os níveis de vibração em máquinas rotativas e estabelece limites para diferentes tipos de equipamentos e condições de operação.

A comparação é essencial para determinar se os níveis de vibração nos pontos medidos estão dentro dos parâmetros aceitáveis. Caso os valores de vibração estejam acima dos limites especificados, isso pode indicar a presença de falhas ou condições de operação adversas que requerem atenção imediata.

Os valores de RMS da aceleração e da velocidade, obtidos após a integração dos sinais, são os parâmetros utilizados para esta comparação. Eles representam medidas quantitativas da amplitude das vibrações e são fundamentais na avaliação da condição dos equipamentos.

Esta etapa finaliza a análise de vibrações, fornecendo uma avaliação clara e objetiva da condição dos equipamentos rotativos. A comparação com os limites da norma permite determinar se os equipamentos estão operando dentro dos parâmetros aceitáveis ou se apresentam desvios que possam indicar falhas ou desgaste excessivo. Essa informação é crucial para a manutenção preditiva e a segurança operacional dos sistemas mecânicos em questão.

5 RESULTADOS

Com o auxílio do código Python, apresentado no Anexo A, desenvolvido para a análise de vibrações, obteve-se os resultados das diversas etapas do processo. A integração dos sinais de aceleração proporcionou os valores de velocidade em ambas as direções, essenciais para a avaliação da vibração.

Em seguida, a aplicação da FFT nos permitiu identificar as componentes de frequência predominantes nos sinais. Por fim, a comparação dos valores obtidos com os limites da norma ISO 10816-7, apresentada no Anexo B, oferece uma primeira avaliação da condição operacional das máquinas rotativas estudadas.

5.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

A etapa de análise exploratória dos dados proporcionou uma visão inicial das características dos sinais de vibração. As Figuras 10 a 13 apresentam as séries temporais dos sinais de vibração para cada ponto de medição e direção. Essas representações visuais são fundamentais para identificar padrões, tendências ou eventos anômalos nos dados.

A observação cuidadosa dessas figuras fornece insights valiosos sobre o comportamento vibratório das máquinas rotativas, preparando o terreno para as análises subsequentes. As figuras a seguir seguem o padrão de medição horizontal à esquerda e medição vertical à direita.

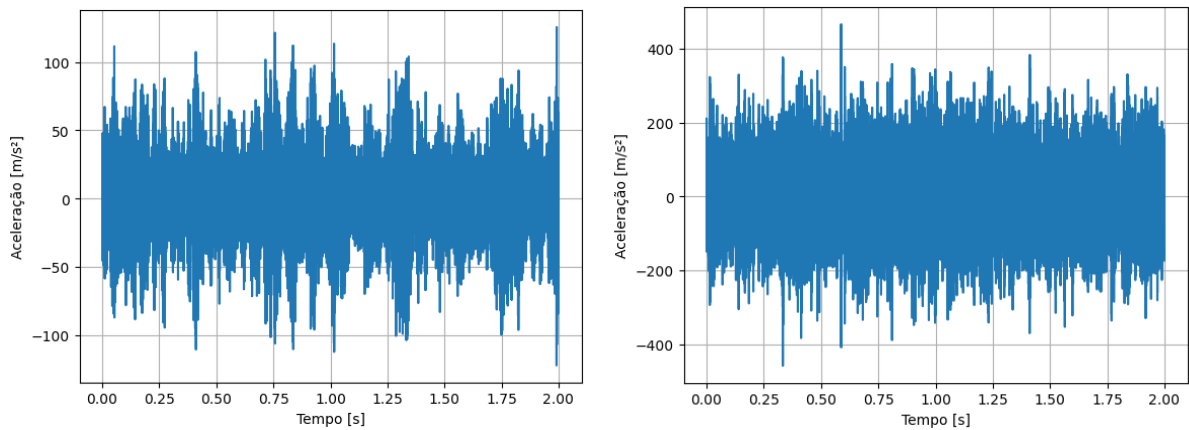


Figura 10: Sinais temporais de vibração da bomba de incêndio.

Fonte: Autores

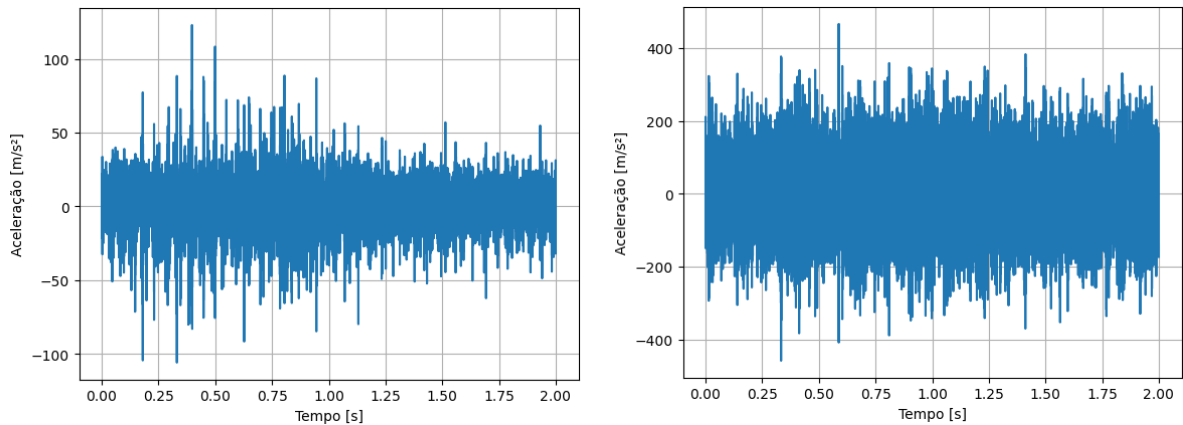


Figura 11: Sinais temporais de vibração do mancal nº1.

Fonte: Autores

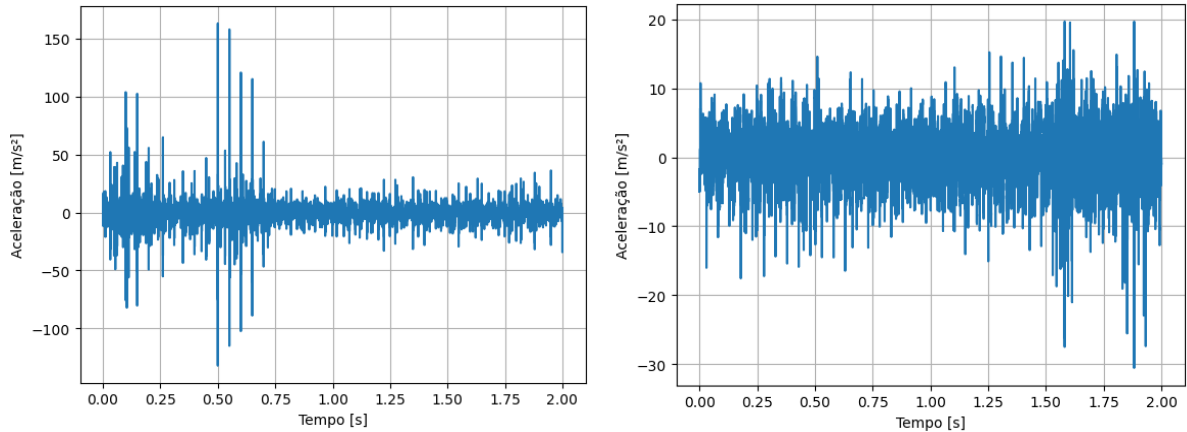


Figura 12: Sinais temporais de vibração do mancal n°4.

Fonte: Autores

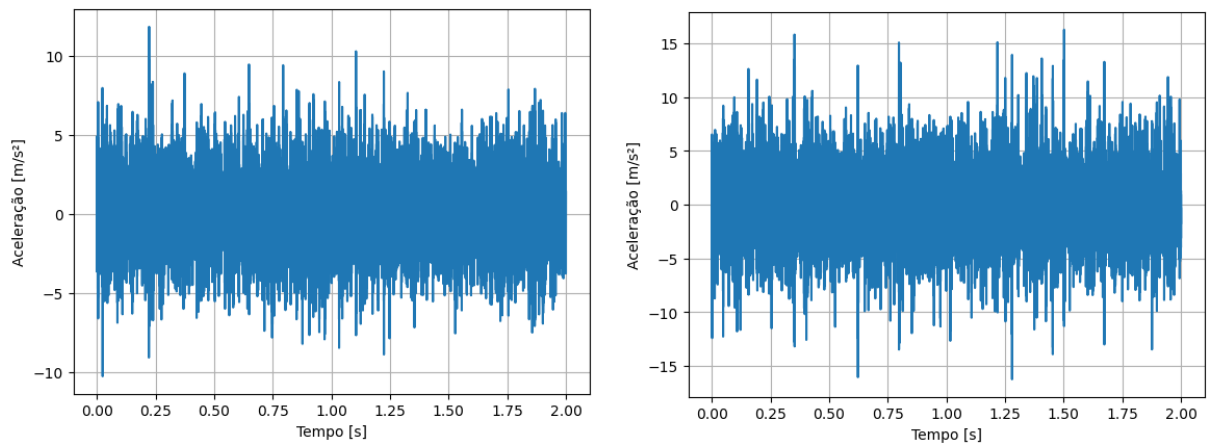


Figura 13: Sinais temporais de vibração do mancal n°8.

Fonte: Autores

5. 2 FILTRAGEM NA FAIXA DE FREQUÊNCIA INDICADA

A aplicação do filtro de banda para isolar as frequências de interesse é evidenciada nas Figuras 14 a 17. Estas figuras representam as séries temporais dos sinais de vibração após a filtragem na faixa de frequência recomendada pela norma ISO 10816-7. Observa-se claramente a concentração das frequências relevantes, ressaltando os componentes vibratórios de maior significância para a análise. Essa filtragem é essencial para preparar os dados para análises subsequentes, permitindo a identificação precisa das características de vibração associadas aos equipamentos estudados.

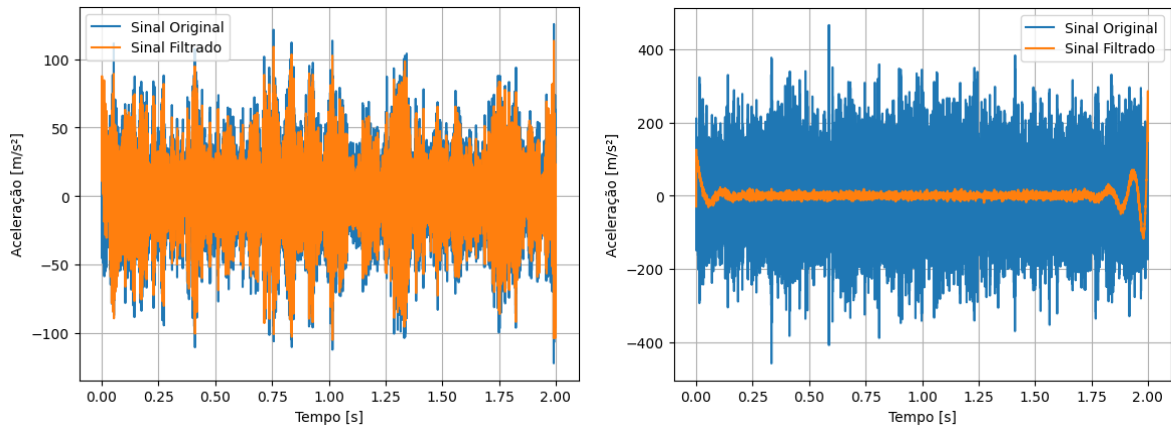


Figura 14: Sinais temporais após filtro de vibração da bomba de incêndio.

Fonte: Autores

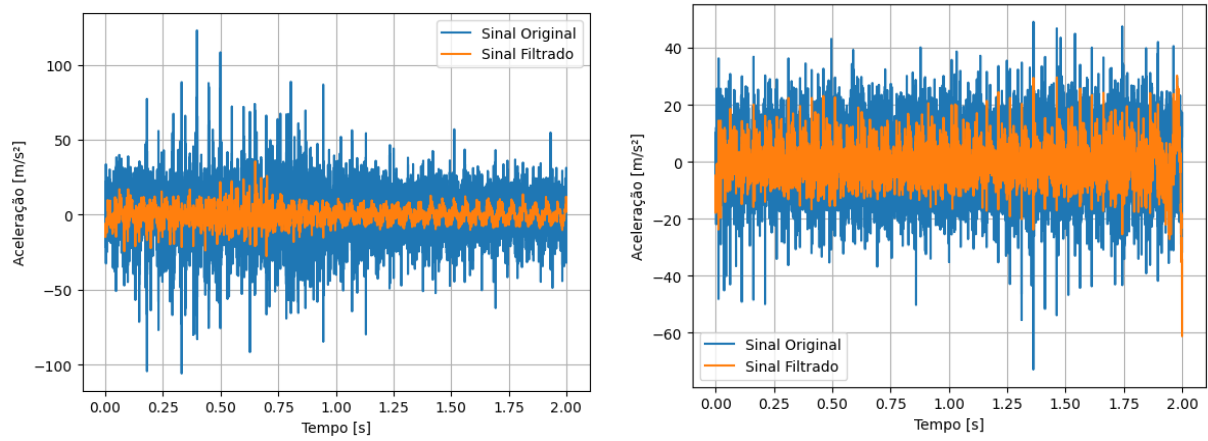


Figura 15: Sinais temporais após filtro de vibração do mancal nº1.

Fonte: Autores

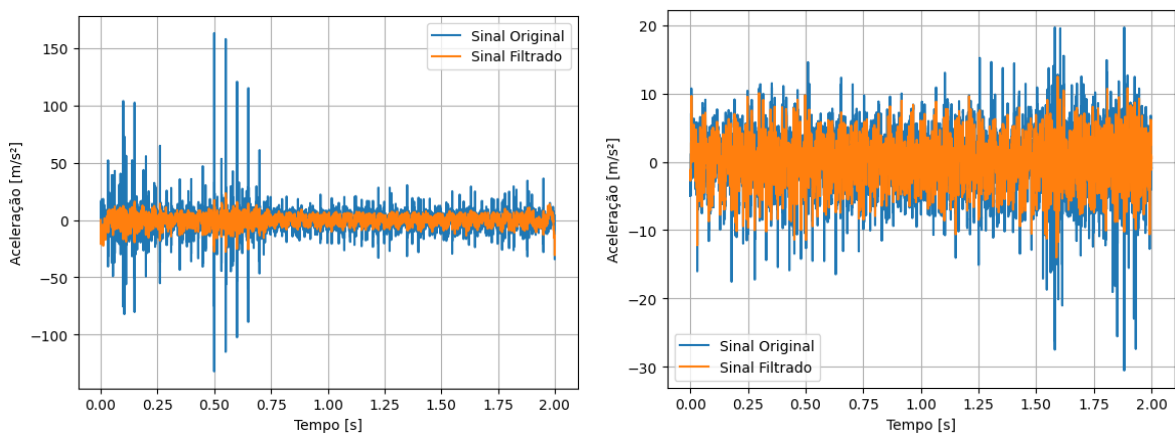


Figura 16: Sinais temporais de vibração do mancal nº4.

Fonte: Autores

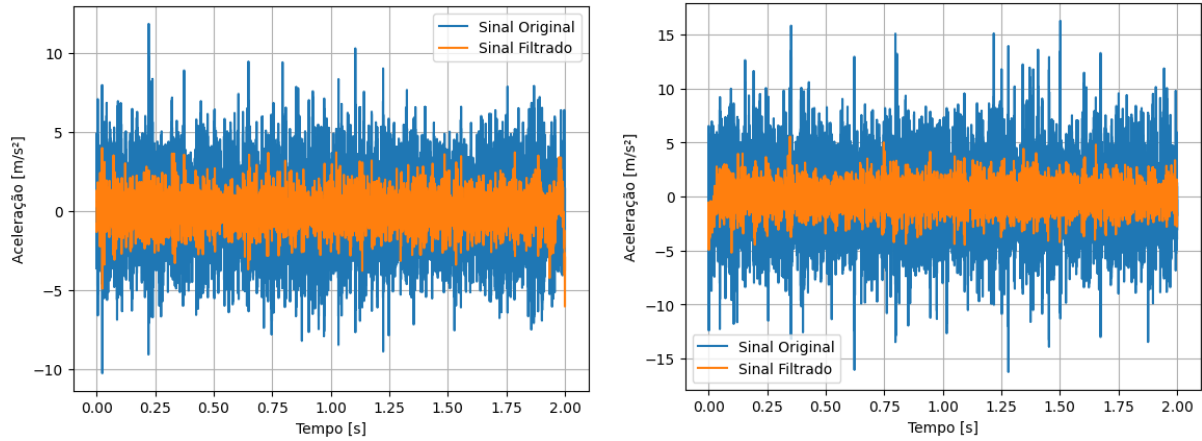


Figura 17: Sinais temporais de vibração do mancal nº8.

Fonte: Autores

5.3 INTEGRAÇÃO DOS SINAIS

Nesta etapa, os sinais de aceleração foram integrados para obter os valores de velocidade, fornecendo uma visão mais abrangente do comportamento vibratório dos equipamentos. Além das séries temporais das velocidades apresentadas nas Figuras 18 a 21, também é disponibilizado o valor do Root Mean Square (RMS) para cada direção e ponto de medição. O RMS é uma métrica crucial para avaliar a amplitude das vibrações e é essencial na identificação de possíveis falhas nos componentes mecânicos.

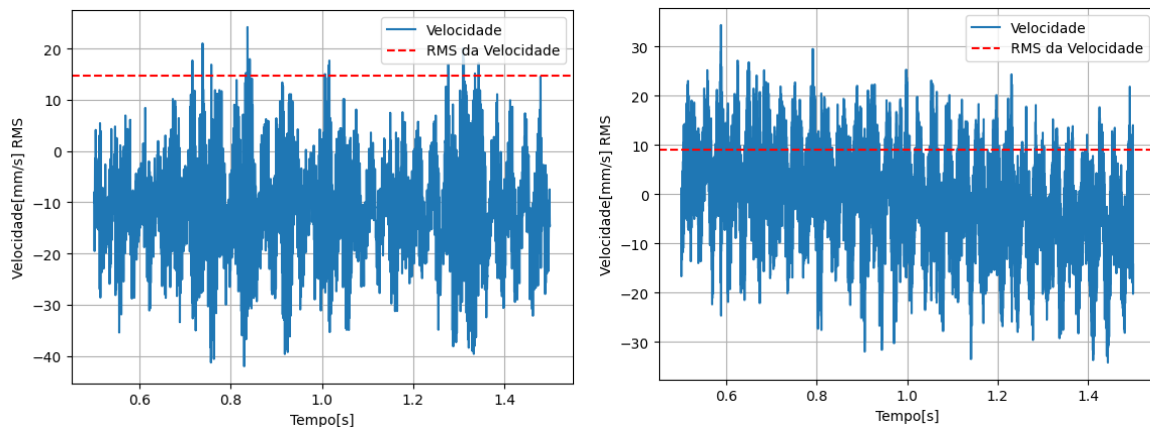


Figura 18: RMS = 14.774 mm/s e 9.100 mm/s para a bomba de incêndio.

Fonte: Autores

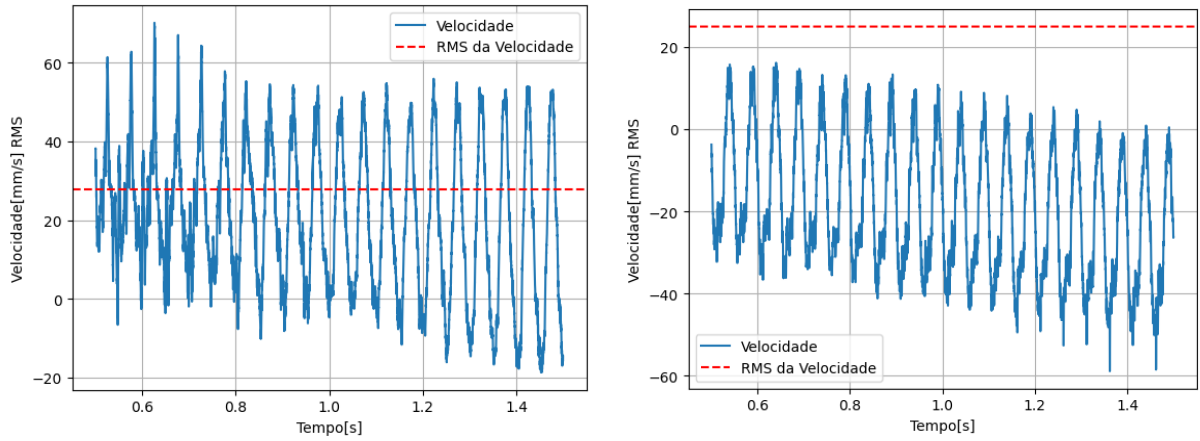


Figura 19: RMS = 27.860 mm/s e 25.034 mm/s para o mancal nº1.

Fonte: Autores

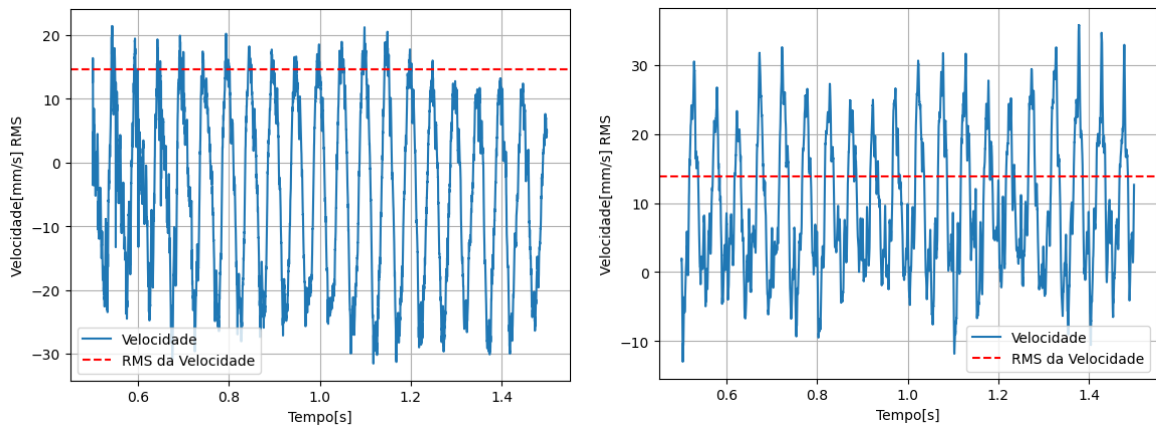


Figura 20: RMS = 14.643 mm/s e 13.865 mm/s para o mancal nº4.

Fonte: Autores

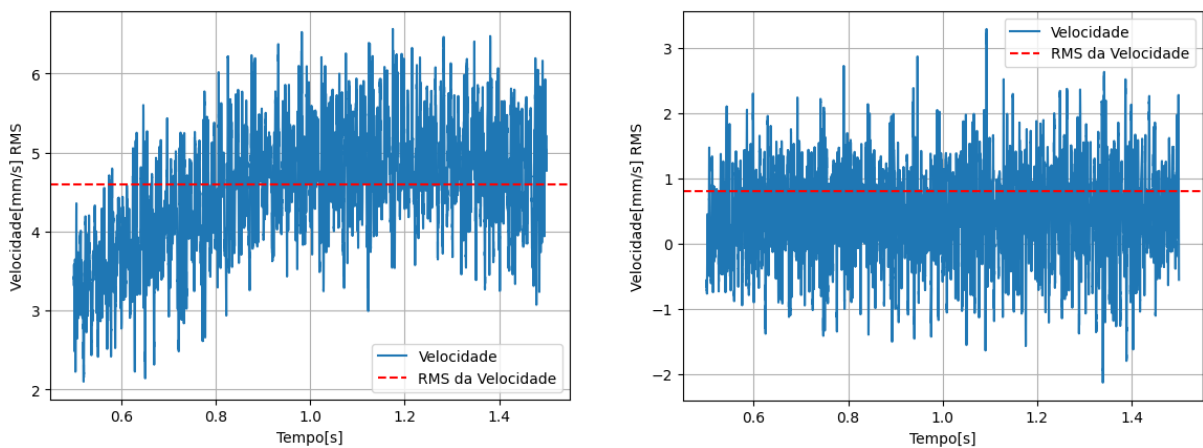


Figura 21: RMS = 4.591 mm/s e 0.792 mm/s para o mancal nº8.

Fonte: Autores

5.4 TÉCNICA DE JANELAMENTO

A técnica de janelamento desempenha um papel fundamental no processo de preparação dos sinais de vibração. Através da Figura 22, podemos observar a aplicação e a comparação com o sinal normal já filtrado. Isso destaca claramente a relevância do janelamento na redução de ruídos, garantindo que os dados estejam prontos para análise espectral.

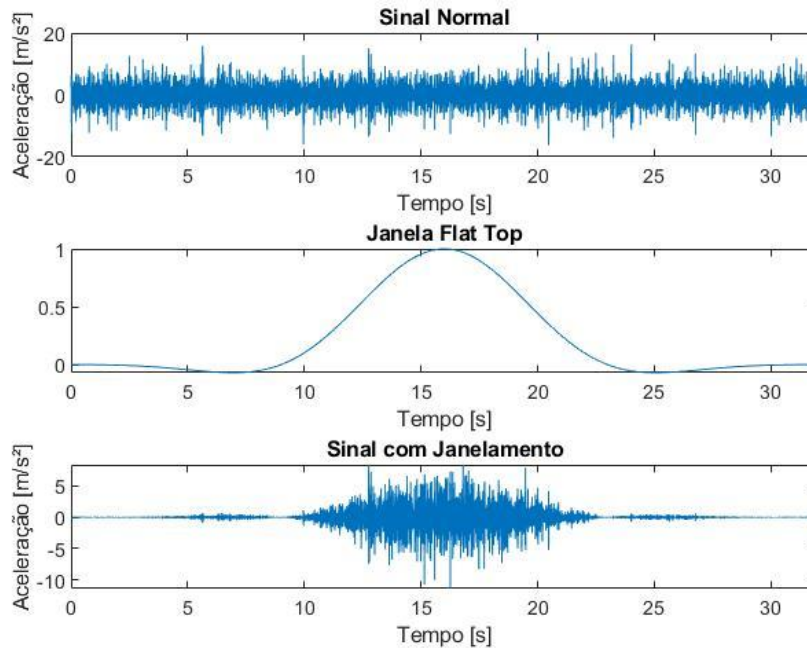


Figura 22: Sinal com Janelamento.

Fonte: Autores

5.5 ANÁLISE ESPECTRAL

A Análise Espectral revela as características de frequência dos sinais de vibração, fornecendo insights cruciais para a identificação de possíveis falhas. Após a transformada de Fourier é aplicada a integração na frequência, para melhor identificação de padrões específicos nas vibrações. As Figuras 23 a 26 apresentam os espectrogramas dos sinais de vibração destacando as frequências predominantes em cada ponto de medição e direção.

Essa representação gráfica é essencial para identificar modos de vibração, ressonâncias e outras características espectrais que podem indicar desalinhamentos, desbalanceamentos ou outras anomalias no sistema. A Análise Espectral é uma ferramenta poderosa para a identificação precisa das fontes de vibração e para orientar as próximas etapas da avaliação de falhas.

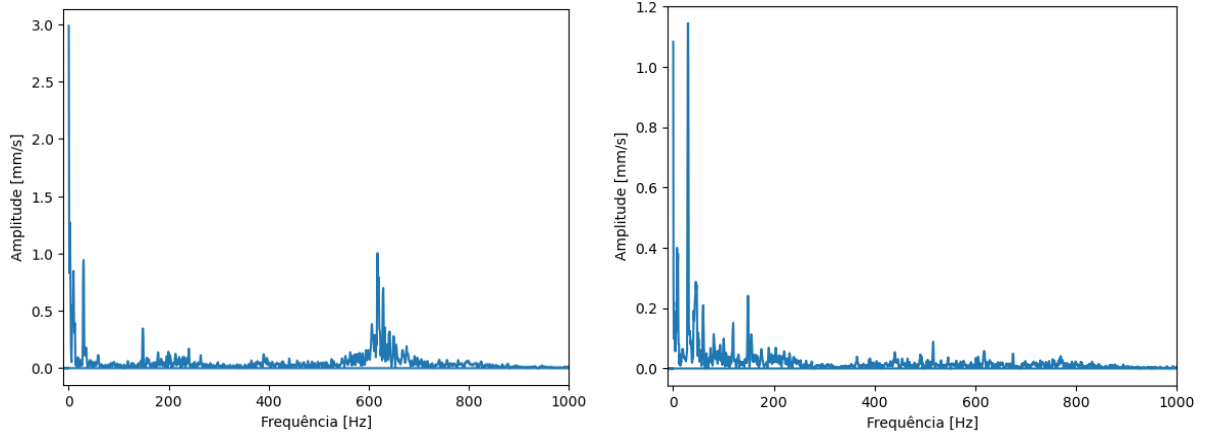


Figura 23: Integração na frequência para a bomba de incêndio.

Fonte: Autores

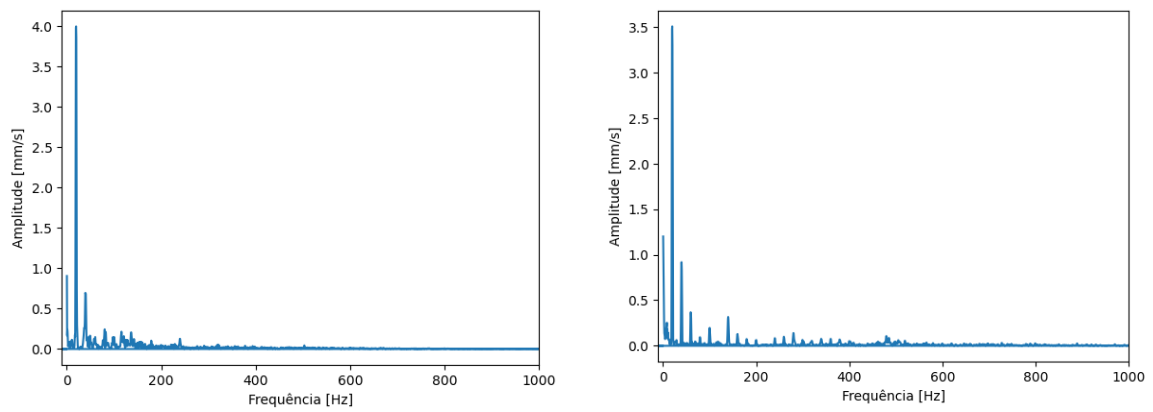


Figura 24: Integração na frequência para o mancal nº1.

Fonte: Autores

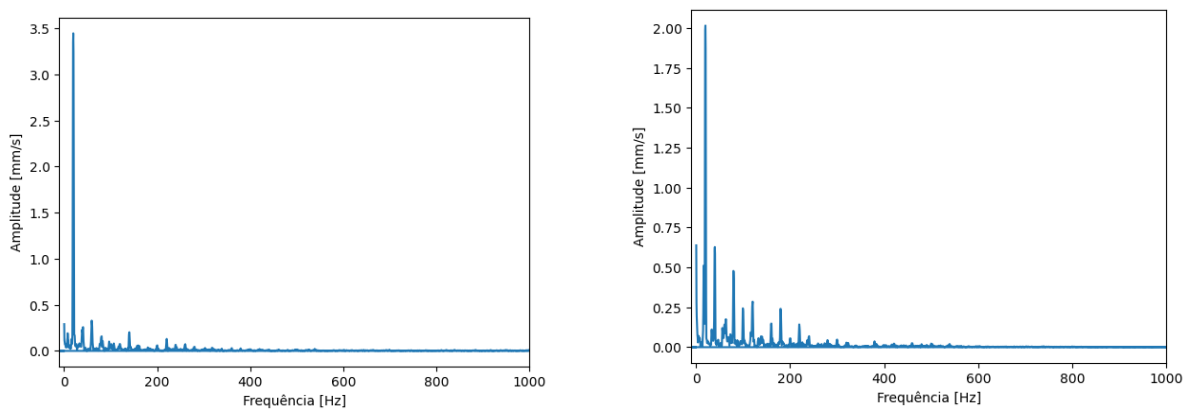


Figura 25: Integração na frequência para o mancal nº4.

Fonte: Autores

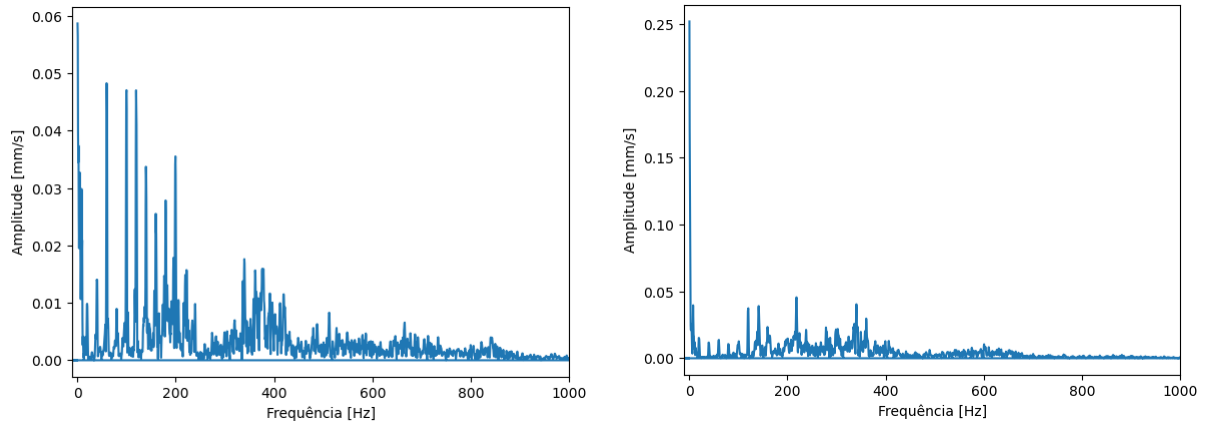


Figura 26: Integração na frequência para o mancal nº8.

Fonte: Autores

6 CONCLUSÃO

O presente estudo representou uma abordagem abrangente na análise de vibrações em máquinas rotativas, visando a identificação de possíveis falhas e anomalias nos equipamentos estudados. Por meio de uma meticulosa aplicação de técnicas de processamento de sinais e análise espectral, foi possível obter uma visão detalhada do comportamento vibratório das bombas de incêndio auxiliar e principal, assim como dos mancais associados.

Ao comparar os valores de Root Mean Square (RMS) com os critérios estabelecidos na norma ISO 10816-7, observamos que os valores de RMS para a bomba de incêndio, mancal nº1 e nº4 excedem os limites aceitáveis. Esta observação indica a presença de problemas significativos nestes equipamentos, requerendo intervenção imediata para evitar danos mais graves.

Uma análise mais aprofundada foi conduzida ao examinar o espectro de frequência da amplitude em [mm/s], revelando comportamentos alinhados com as diretrizes do guia de diagnóstico de vibração (SKF RELIABILITY SYSTEMS,2000), utilizado também como referência neste estudo. Especificamente, identificamos desbalanceamento da bomba principal, além de sintomas de recirculação de fluido. Quanto à bomba auxiliar, foram detectadas indicações de folga nos mancais 1 e 4, enquanto o mancal 8 demonstrou um funcionamento dentro dos padrões esperados.

Os resultados obtidos nesta análise de vibrações oferecem uma base sólida para a implementação de medidas corretivas e preventivas nos equipamentos em questão. A abordagem adotada demonstrou ser uma ferramenta valiosa na manutenção preditiva e na

identificação proativa de falhas em máquinas rotativas, contribuindo significativamente para a confiabilidade operacional e a segurança dos sistemas mecânicos dos meios da Marinha do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. T. et al. "Análise de Vibrações no Conjunto Motor-Bomba Centrífuga". Itajubá: Instituto de Vibração MTA, 2018.

Butterworth, S. "On the Theory of Filter Amplifiers". *Experimental Wireless and the Wireless Engineer*, (1930).

COSTA, David Alexandre Germano. **Técnicas avançadas de análise de vibração no âmbito do controlo de condição**. 2017. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

DA SILVA, Carlos André Lopes. Aspectos do desenvolvimento dos monitores na Guerra da Tríplice Aliança. *Navigator*, v. 14, n. 27, p. 19-30, 2018.

DA SILVEIRA BRIZON, Carla Julio. Metodologia para avaliação e determinação de índices de conforto acústico em engenharia automobilística. 2012.

DINIZ, Rodnei. Manutenção aeronáutica: monitoramento da condição e utilização em helicópteros, através da análise de vibrações. 2017.

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

GODINHO, Keila Ingrid dos Santos. Inteligência artificial em bibliotecas: Bibliotecária Informativa Automatizada (BIA) da divisão de bibliotecas e documentação da PUC-RIO. 2019.

Harris, C. M., *Shock and Vibration Handbook*. McGraw-Hill, 2002.

ISO 10816-7. Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts, 2009.

LEITE, José Pedro Pereira. Estado da Arte e Análise Comparativa de Sistemas de Propulsão de Emissões RED. 2020. Tese de Doutorado.

Rao, Singiresu S. Vibrações Mecânicas. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

ROCHA, Diego Lilargem. Análise de Vibrações em Equipamentos Rotativos de uma Indústria Alimentícia. IFF, 2014.

SILVA, Derick Henrique de Jesus. Processamento de Sinais para Monitoramento de Vibrações em Unidades Geradoras Hidrelétricas. UFMG, 2013.

SKF RELIABILITY SYSTEMS. Vibration diagnostic guide. EUA: SKF Reliability Systems, 2000. 28p.

ANEXO A

Os códigos desenvolvidos em Python são apresentados nas figuras a seguir.

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from scipy.signal import *
import scipy.io
from scipy.fftpack import fft, rfft, ifft, fftfreq, fftshift
from scipy.signal import detrend
from scipy.integrate import cumtrapz
from datetime import datetime
import csv
import xlrd
import pandas as pd
```

```
dados = pd.read_csv('CN1809/manca18_v.csv',header=None)
dados = dados.iloc[7:, :]
dados = dados[0].str.split('; ', expand=True)
tempo = dados[0].astype(float)
aceleracao = dados[1].astype(float)

# Passo 1: Criar o gráfico de séries temporais
plt.figure()
plt.plot(tempo, aceleracao)
#plt.title('Séries Temporais de Vibração')
plt.xlabel('Tempo [s]')
plt.ylabel('Aceleração [m/s²]')
plt.grid(True)
plt.show()
```

Figura 27: Código análise temporal dos sinais.

Fonte: Autores.

```
# Função para criar filtro passa-banda
def butter_bandpass(lowcut, highcut, fs, order=4):
    nyquist = 0.5 * fs
    low = lowcut / nyquist
    high = highcut / nyquist
    b, a = butter(order, [low, high], btype='band')
    return b, a

# Função para aplicar o filtro
def butter_bandpass_filter(data, lowcut, highcut, fs, order=4):
    b, a = butter_bandpass(lowcut, highcut, fs, order=order)
    y = filtfilt(b, a, data)
    return y

# Definindo frequências de corte
lowcut = 10.0 # Frequência mínima de corte (em Hz)
highcut = 1000.0 # Frequência máxima de corte (em Hz)
Delta = 0.000030517578125
fs = 1/Delta # Frequência de amostragem (em Hz)

# Aplicando o filtro à aceleração
aceleracao_filtrada = butter_bandpass_filter(aceleracao, lowcut, highcut, fs, order=4)

# Plotando os sinais original e filtrado
plt.figure()
plt.plot(tempo, aceleracao, label='Sinal Original')
plt.plot(tempo, aceleracao_filtrada, label='Sinal Filtrado')
#plt.title('Séries Temporais de Vibração')
plt.xlabel('Tempo [s]')
plt.ylabel('Aceleração [m/s²]')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

Figura 28: Código filtragem de sinal.

Fonte: Autores.

```

# Chame a função para obter a velocidade
def integrate_signal(signal, dt):
    # Calcula o número de elementos na matriz do sinal
    n = len(signal)

    # Cria uma matriz vazia para armazenar os valores integrados
    integrated_signal = np.zeros(n)

    # Realiza a integração do sinal usando o método dos trapézios
    integrated_signal[0] = 0.5 * signal[0] * dt # Valor inicial

    for i in range(1, n):
        integrated_signal[i] = integrated_signal[i-1] + 0.5 * (signal[i] + signal[i-1]) * dt

    return integrated_signal

# velocidade = integrate_signal(acceleracao_filtrada*1000, Delta)

velocidade = cumtrapz(acceleracao*1000, dx=Delta, initial=0)
rms_velocidade = np.sqrt(np.mean(velocidade[int(0.5//Delta):int(1.5/Delta)]**2))
print(rms_velocidade)

# Agora, você pode plotar a velocidade com a linha do RMS
plt.figure()
plt.plot(tempo[int(0.5//Delta):int(1.5/Delta)], velocidade[int(0.5//Delta):int(1.5/Delta)], label='Velocidade')
plt.axhline(y=rms_velocidade, color='r', linestyle='--', label='RMS da Velocidade') # Adiciona linha do RMS
plt.xlabel('Tempo[s]')
plt.ylabel('Velocidade[mm/s] RMS')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

```

Figura 29: Código integração de sinal.

Fonte: Autores.

```

def plot_fft_custom_frequency_range(serie_temporal, taxa_amostragem, limite_inferior=None, limite_superior=None):
    # Definir o vetor de janela Flattop manualmente
    t = np.linspace(0, 1, len(serie_temporal))
    a0, a1, a2, a3, a4 = 1, 1.93, 1.29, 0.388, 0.028
    janela = a0 - a1*np.cos(2*np.pi*t) + a2*np.cos(4*np.pi*t) - a3*np.cos(6*np.pi*t) + a4*np.cos(8*np.pi*t)

    # Aplica o janelamento Flattop
    serie_temporal_janelada = serie_temporal * janela

    # Realiza a FFT
    fft_resultado = np.fft.fft(serie_temporal_janelada)

    # Calcula as amplitudes
    amplitudes = 2 * (np.abs(fft_resultado)) / ((2 ** 0.5) * len(serie_temporal_janelada)*4.18)

    # Calcula as frequências em hertz
    frequencias = np.fft.fftfreq(len(serie_temporal_janelada), 1.0 / taxa_amostragem)

    # Aplica os limites de frequência para a escala do eixo x
    if limite_inferior is not None:
        plt.xlim(limite_inferior, plt.xlim()[1])
    if limite_superior is not None:
        plt.xlim(plt.xlim()[0], limite_superior)

    # Calcula o valor de pico da FFT
    valor_max = max(amplitudes)

    # Plota o resultado da FFT
    plt.plot(frequencias, amplitudes)
    plt.xlabel('Frequência [Hz]')
    plt.ylabel('Amplitude [m/s²]')
    plt.show()

    return valor_max

serie_temporal = aceleracao_filtrada # Substitua pela sua série temporal
taxa_amostragem = fs # Substitua pela taxa de amostragem adequada dos seus dados
limite_inferior = 0 # Limite inferior de frequência em Hz (opcional)
limite_superior = 1000 # Limite superior de frequência em Hz (opcional)
energia_total = plot_fft_custom_frequency_range(serie_temporal, taxa_amostragem, -10, limite_superior)

print('Valor do pico:', energia_total)

```

Figura 30: Código análise no espectro da frequência.

Fonte: Autores.

```

def integrate_fft(serie_temporal, taxa_amostragem, limite_inferior=None, limite_superior=None):
    # Aplica o janelamento Flattop
    t = np.linspace(0, 1, len(serie_temporal))
    a0, a1, a2, a3, a4 = 1, 1.93, 1.29, 0.388, 0.028
    janela = a0 - a1 * np.cos(2 * np.pi * t) + a2 * np.cos(4 * np.pi * t) - a3 * np.cos(6 * np.pi * t) + a4 * np.cos(8 * np.pi * t)
    serie_temporal_janelada = serie_temporal * janela

    # Realiza a FFT
    fft_resultado = np.fft.fft(serie_temporal_janelada)

    # Calcula as amplitudes
    amplitudes = 2 * (np.abs(fft_resultado)) / ((2 ** 0.5) * len(serie_temporal_janelada)*4.18)

    # Calcula as frequências em hertz
    frequencias = np.fft.fftfreq(len(serie_temporal_janelada), 1.0 / taxa_amostragem)

    # Aplica os limites de frequência para a escala do eixo x
    if limite_inferior is not None:
        plt.xlim(limite_inferior, plt.xlim()[1])
    if limite_superior is not None:
        plt.xlim(plt.xlim()[0], limite_superior)

    # Calcula as integrações da FFT
    integracoes = 1000 * abs(amplitudes) / (2 * np.pi * frequencias)

    # Ajusta a escala do eixo Y para não exibir valores negativos
    integracoes_positivas = np.maximum(integracoes, 0)

    # Plota o resultado das integrações da FFT
    plt.plot(frequencias, integracoes_positivas)
    plt.xlabel('Frequência [Hz]')
    plt.ylabel('Amplitude [mm/s]')
    #plt.title('Integração na frequência (A/2πf)')
    plt.show()

    # Calcula a energia espectral total
    energia_total = np.sum(amplitudes ** 2)

    return energia_total

serie_temporal = aceleracao_filtrada # Substitua pela sua série temporal
taxa_amostragem = fs
limite_inferior = 0 # Limite inferior de frequência em Hz (opcional)
limite_superior = 1000 # Limite superior de frequência em Hz (opcional)
energia_total = integrate_fft(serie_temporal, taxa_amostragem, -10, limite_superior)

```

Figura 31: Código análise integrada no espectro da frequência.

Fonte: Autores.

ANEXO B

A tabela apresentada na norma ISO 10816-7:2009 utilizada como referência primordial para análise falhas é apresentada a seguir:

Zone	Description (see 5.2 for details of zone definitions)	Vibration velocity limit r.m.s. value mm/s			
		Category ^a I		Category ^a II	
		≤ 200 kW	> 200 kW	≤ 200 kW	> 200 kW
A	Newly commissioned machines in preferred operating range	2,5	3,5	3,2	4,2
B	Unrestricted long-term operation in allowable operating range	4,0	5,0	5,1	6,1
C	Limited operation	6,8	7,6	8,5	9,5
D	Risk of damage	> 6,8	> 7,6	> 8,5	> 9,5
Maximum ALARM limit (= 1,25 times the upper limit of zone B) ^b		5,0	6,3	6,4	7,6
Maximum TRIP limit (= 1,25 times the upper limit of zone C) ^b		8,3	9,5	10,6	11,9
<i>In situ</i> acceptance test	Preferred operating range	2,5	3,5	3,2	4,2
	Allowable operating range	3,4	4,4	4,2	5,2
Factory acceptance test	Preferred operating range	3,3	4,3	4,2	5,2
	Allowable operating range	4,0	5,0	5,1	6,1
For all acceptance tests in the preferred operating range (see 3.4), each of the filtered values ^c for rotational frequency (f_n) and blade-passing frequency ($f_n \cdot z$) should be		≤ 2	≤ 2	≤ 3	≤ 3
^a For definition, see 5.1. ^b Recommended values. The vibration magnitudes should be above these limits for about 10 s before an ALARM or TRIP is released to avoid false alarms and trips. ^c For acceptance tests in the allowable but outside the preferred operating range, the filtered values for rotational frequency (f_n) and blade-passing frequency ($f_n \cdot z$) may be expected to be higher (1,3 times) than the values for the preferred operating range.					

Figura 32: Limite de velocidade de vibração conforme norma ISO.

Fonte: Norma ISO 10816-7 (2009).