



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

**Análise de um plano para implementação de manutenção preditiva
baseada na análise de vibração em máquinas-ferramentas nas oficinas
do DEMA da UEM**

Autor:

Ugembe, Ilídio Romão

Supervisor:

Eng. Roberto David

Maputo, Julho de 2025



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

**Análise de um plano para implementação de manutenção preditiva
baseada na análise de vibração em máquinas-ferramentas nas oficinas
do DEMA da UEM**

Autor:

Ugembe, Ilídio Romão

Supervisor:

Eng. Roberto David

Maputo, Julho de 2025

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Ilídio Romão Ugembe, declaro, sob palavra de honra, que o presente trabalho de licenciatura com o tema: Análise de um plano para implementação de manutenção preditiva baseada na análise de vibração em máquinas-ferramentas nas oficinas do DEMA da UEM, que apresento para o cumprimento dos requisitos para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Mecânica, foi por mim realizado, com base nos recursos que no mesmo se faz referência.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus todo-poderoso por me ter ajudado na saúde para que a mesma fosse consolidada e por proporcionar a oportunidade de ingressar na UEM.

Ao meu pai, Romão Ugembe e às minhas duas mães, Anita Nharre e Marta Penga pela educação, dedicação, carinho e exemplos depositados em mim. Certamente sem eles como pilares da minha fundação como indivíduo, eu não estaria apto a concluir esse objectivo.

Ao meu irmão gémeo e melhor amigo Nélio Ugembe, que em todas as fases da minha vida desde antes até de nascer está do meu lado. Aos meus irmãos, Bento, Osvaldo, Rodrigues, Otília, Adérito, Elsa, Santos e a pequena Laila Ugembe, e a toda minha família pelo apoio incondicional que sempre me deram, sem eles tudo teria sido mais difícil.

Ao meu professor e supervisor Eng^o Roberto David, pelas valiosas contribuições dadas durante toda a trajectória académica e pelos conhecimentos fornecidos para a minha pesquisa, pelos valiosos conselhos e cuidadosas revisões.

Agradecer aos meus amigos Mário Matola, Boris Vilanculos, Simião Mabombe, Rúben Levy, Chelton Macauzo, Richete Macamo e Benedito Manhique, com quem compartilho experiências de vida desde o ensino primário e secundário, e durante a jornada tornaram-se minha família.

Aos meus colegas-amigos Ednaldo Tembe, Miguel Júnior, Casimiro Bimbe, Adelino Cumbe, Tiago Cossa, Shaad Muteto e Artiel Rungo, por todo o seu companheirismo, cumplicidade e amizade sempre demonstrada desde o início da Faculdade.

A todos, o meu Obrigado!

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho com muita gratidão à Deus e à minha mãe Marta Julião Penga, que infelizmente já não está entre nós, mas que sempre estará no meu coração, honrando os seus ensinamentos.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo voltado à análise e proposta de um plano de manutenção preditiva baseado na análise de vibração, com aplicação específica às oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMA) da Universidade Eduardo Mondlane. A pesquisa está fundamentada na crescente demanda por estratégias de manutenção eficientes no ambiente acadêmico, visando garantir a disponibilidade e confiabilidade das máquinas-ferramentas utilizadas nas práticas laboratoriais. O estudo é dividido em quatro etapas: revisão teórica sobre manutenção preditiva e análise de vibrações; desenvolvimento de uma ferramenta computacional em *Python* capaz de processar sinais vibratórios e identificar falhas; elaboração de um plano conceitual de manutenção preditiva; e análise da viabilidade da sua implementação. Foram simulados sinais de falhas como desbalanceamento, desalinhamento, folga mecânica e defeitos em rolamentos, os quais permitiram validar a eficácia da ferramenta proposta. Ao final, o trabalho propõe um modelo replicável para oficinas acadêmicas, unindo fundamentos de engenharia de manutenção com soluções práticas baseadas em tecnologia acessível.

Palavras-chave: Manutenção preditiva, Análise de vibração, Máquinas-ferramentas, Python

ABSTRACT

This work presents a study focused on the analysis and proposal of a predictive maintenance plan based on vibration analysis, with specific application to the workshops of the Department of Mechanical Engineering at Eduardo Mondlane University. The research is grounded in the increasing demand for efficient maintenance strategies in academic environments, aiming to ensure the availability and reliability of machine tools used in laboratory practices. The study is structured in four stages: a theoretical review of predictive maintenance and vibration analysis; development of a Python-based computational tool capable of processing vibration signals and identifying failures; formulation of a conceptual predictive maintenance plan; and evaluation of its implementation feasibility. Failures signals such as unbalance, misalignment, mechanical looseness, and bearing defects were simulated, which allowed validating the effectiveness of the proposed tool. In conclusion, the study presents a replicable model for academic workshops, combining maintenance-engineering principles with practical low-cost technological solutions.

Keywords: Predictive maintenance, Vibration analysis, Machine tools, Python

Índice Geral

DECLARAÇÃO DE HONRA	I
AGRADECIMENTOS	II
DEDICATÓRIA	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
Capítulo I – Introdução	1
1.1. Formulação do problema	2
1.2. Objectivos	2
1.2.1. Objectivo geral	2
1.2.2. Objectivos específicos	2
1.3. Metodologia	3
Capítulo II – Revisão Bibliográfica	4
2.1. História da manutenção	6
2.1.1. A Primeira Geração	6
2.1.2. A Segunda Geração	6
2.1.3. A Terceira Geração	7
2.1.4. A Quarta Geração	7
2.2. Importância da manutenção Industrial	9
2.3. Tipos de manutenção	10
2.4. Descrição das máquinas-ferramentas de estudo	13
2.5. Torno mecânico	14
2.5.1. Tipos de tornos	14
2.6. Fresadora	16
2.6.1. Tipos de fresadoras	17
2.7. Fundamentos da análise de vibração	19
2.7.1. Análise da vibração	19
2.7.2. Princípios da manutenção preditiva baseada na vibração	19
2.8. Técnicas de processamento de sinais de vibração	23
2.8.1. Descrição no domínio do tempo	23
2.8.2. Descrição no Domínio da Frequência	25
2.8.3. Curtose espectral	28
2.8.4. Filtragem do sinal	28

2.8.5. Cepstrum	29
2.9. Equipamento para medição da vibração	30
2.9.1. Transdutor	30
2.9.2. Condicionador/Amplificador	33
2.9.3. Sistema de Conversão Analógico/Digital	34
2.9.4. Microcomputador e software de aquisição.....	35
2.9.5. Analisadores de vibração.....	36
2.10. Análise pelo nível global de vibrações	36
2.10.1. Níveis de severidade	37
2.10.2. Medidor global de vibração.....	39
2.10.3. Caneta de medição global de vibração.....	40
2.11. Problemas de origem mecânica.....	40
2.11.1. Desbalanceamento.....	40
2.11.2. Desalinhamento.....	42
2.11.3. Folgas.....	43
2.11.5. Falha em rolamentos.....	44
Capítulo III – Contextualização.....	46
Capítulo IV – Método Proposto.....	48
4.1. Colecta de dados.....	48
4.2. Processamento e diagnóstico de dados.....	49
4.3. Características da plataforma de análise da vibração	51
4.4. Cronograma de monitoramento.....	54
4.5. Benefícios Técnicos e Operacionais	54
4.6. Valorização Académica e Pedagógica	55
Capítulo V – Apresentação, Análise e Discussão de Resultados.....	56
5.1. Resultados no domínio do tempo.....	56
5.2. Análise espectral (domínio da frequência)	56
5.3. Interpretação dos Resultados e Classificação.....	57
5.4. Análise comparativa entre o estado actual e a situação projectada	57
5.5. Estudo dos Custos para a Implementação do Plano de Manutenção	59
Capítulo VI – Conclusões e Recomendações	61
6.1. Conclusões.....	61
6.2. Recomendações.....	62
7. Referências bibliográficas.....	63

Apêndices.....	67
Apêndice A - Códigos Python	68
Código 1 – Aplicativo Web para Visualização de Dados Vibracionais	68
Código 2 – Diagnóstico de Condição com Base em Indicadores Temporais e Espectrais.....	72
Código 3 – Análise Espectral via Transformada Rápida de Fourier (FFT)	73
Código 4 – Geração de Gráficos e Relatórios Automatizados dos Sinais de Vibração	74
Apêndice B.....	75
Cronograma do plano de Manutenção.....	75
Anexos	77
Anexo A – Informação técnica do Acelerômetro HS-100.....	78
Anexo B – Informação técnica do DAQ DI-2108.....	79

Índice de figuras

Figura 1: Resultado da FFT	4
Figura 2: Resultado do método do PeakVue na identificação das frequências de falhas em rolamentos	5
Figura 3: Resultado do método da FFT e Cepstrum	5
Figura 4: Comparação entre os tipos de manutenção	12
Figura 5: Variação do custo da manutenção com o tempo	12
Figura 6: Torno de Bancada	14
Figura 7: Torno Vertical	14
Figura 8: Torno Paralelo	15
Figura 9: Torno Revólver	15
Figura 10: Torno Semi-automático	16
Figura 11: Torno CNC	16
Figura 12: Fresadora Vertical	17
Figura 13: Fresadora Horizontal	18
Figura 14: Fresadora Universal	18
Figura 15: Grandezas de Análise de Vibrações	21
Figura 16: Sinais no domínio do tempo e da frequência	22
Figura 17: Técnicas de extracção de características de sinais de vibração	23
Figura 18: Valores globais de medida de vibração para um sinal complexo.	25
Figura 19: Sinal de vibração no domínio da frequência.....	26
Figura 20: Processo de obtenção do espectro do envelope.....	28
Figura 21: Exemplo de um Curtograma.....	28
Figura 22: Tipos de bandas de passagem	29
Figura 23: Relação entre o espectro e o Cepstrum	30
Figura 24: Cadeia de medição utilizada para aquisição do sinal de vibração	30
Figura 25: Acelerômetros	31
Figura 26: Acelerômetro Piezoeléctrico	31
Figura 27: Acelerômetro Electromagnético.....	32
Figura 28: Sensor Electrodinâmico de velocidade.....	33
Figura 29: Dispositivo de aquisição de dados - DAQ produktbild	34
Figura 30: Computador para Análise de Dados.....	35
Figura 31: Analisador de vibração PRUFTECHNIK VIBXPART II	36
Figura 32: Medidor de vibração modelo UT315A 600x600	39

Figura 33: Caneta de medição de vibração modelo PCE-VT 1100	40
Figura 34: Espectro característico de desbalanceamento	41
Figura 35: Forma de onda característica de desbalanceamento	42
Figura 36: Representação dos tipos de desalinhamento – paralelo e angular	43
Figura 37: Espectro da vibração axial para o desalinhamento angular e paralelo.....	43
Figura 38: Espectro e onda caraterísticos de folgas.....	44
Figura 39: Espectro característico das folgas.....	44
Figura 40: Espectro e onda caraterísticos de falhas no rolamento.....	45
Figura 41: Torno Paralelo 1224 B.....	46
Figura 42: Hierarquia da gestão dos laboratórios do DEMA	47
Figura 43: Planos de medidas	49
Figura 44: Página inicial da aplicação web.....	51
Figura 45: Secção de upload com o botão visível antes do upload.....	51
Figura 46: Gráfico do sinal no domínio do tempo	52
Figura 47: Espectro de frequência FFT	53
Figura 48: Área de diagnóstico com a falha identifica	53

Lista de siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
CF – Factor de Crista (do Inglês: *Creast Factor*);
CNC – Controle Numérico Computarizado (do Inglês: *Computer Numerical Control*);
CSV – *Comma-Separated Values*;
DAQ – sistema de aquisição de dados (do Inglês: *Data Acquisition System*);
DEMA – Departamento de Engenharia Mecânica;
DFT – Transformada Discreta de Fourier (do Inglês: *Discrete Fourier Transform*);
DIN – Instituto Alemão de Normatização (do Alemão: *Deutsches Institut für Normung*);
FENG – Faculdade de Engenharia;
FFT – Transformada Rápida de Fourier (do Inglês: *Fast Fourier Transform*);
HFRT – Ressonância de Alta Frequência (do Inglês: *High Frequency Resonance Technique*);
ISO – Organização Internacional de Padronização (do inglês: *International Organization for Standardization*);
PDF – Documento em Formato Portátil (do Inglês: *Portable Document Format*);
RCM – Manutenção Centrada na Confiabilidade (do Inglês: *Reliability Centered Maintenance*);
RMS – Raiz Média Quadrada, (do Inglês: *Root Mean Square*);
RPM – Rotações por minuto (do Inglês *Rotations per minute*);
SK – Curtose espectral (do Inglês: *Spectral Kurtosis*);
STFT – *Short Time Fourier Transform*;
UEM – Universidade Eduardo Mondlane;
USB – Padrão de Comunicação Digital (do Inglês: *Universal Serial Bus*);
WT – Transformada de Wavelet (do inglês: *Wavelet Transform*).

Nomenclatura

x - deslocamento [*mícron*];
 v - velocidade [*mm / s*];
 a - aceleração [*m / s²*];
 A - amplitude [*mm*];
 ω - velocidade angular em [*rad / s*];
 t - tempo [*segundos*];
 f - frequência [*Hz*];

$x(n)$ - é o vector de dados do sinal coletado;

N - número total de amostras;

μ - média das amostras;

σ - desvio padrão;

$f(x)$ - função no domínio original;

$F(\omega)$ - transformada de Fourier de $f(x)$ (sinal no domínio da frequência);

$x(t)$ - dados originais no domínio do tempo;

P - valor principal de Cauchy;

$z(t)$ - sinal complexo associado a $x(t)$;

$y(t)$ - transformada de Hilbert do sinal $x(t)$;

F^{-1} - inversa da FFT;

$X(\omega)$ - resultado da FFT.

Capítulo I – Introdução

A manutenção de máquinas e equipamentos tem evoluído de estratégias reactivas para abordagens mais sofisticadas, baseadas em monitoramento contínuo e previsão de falhas. No contexto académico, especialmente nas oficinas dos cursos de engenharia, a confiabilidade das máquinas-ferramentas é um factor crítico para garantir a continuidade e a qualidade do ensino prático. Entretanto, muitas dessas oficinas carecem de um plano estruturado de manutenção, o que pode resultar em interrupções inesperadas, aumento dos custos operacionais e comprometimento da aprendizagem dos estudantes.

Diante dessa realidade, este trabalho propõe a análise e estruturação de um plano de manutenção preditiva baseado na análise de vibração, com foco em máquinas-ferramentas convencionais como tornos e fresadoras. A escolha da técnica de vibração justifica-se pela sua sensibilidade na detecção precoce de falhas mecânicas e pela possibilidade de implementação com tecnologias acessíveis. Utilizando modelos matemáticos e simulações computacionais em Python, foi desenvolvida uma ferramenta que permite diagnosticar, de forma automática, diferentes tipos de falhas com base em sinais vibratórios.

O estudo toma como referência o torno paralelo Shye Sheng 1224 B e a fresadora universal Milko 35r, ambos equipamentos presentes nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Eduardo Mondlane. A análise dessas máquinas permitiu compreender os principais factores que influenciam seu comportamento vibracional e identificar os pontos críticos para o monitoramento. Com isso, foi possível propor um plano aplicável à realidade do DEMA, contribuindo para o fortalecimento das práticas de manutenção, redução de falhas, e para o aprimoramento da formação técnica dos estudantes.

1.1. Formulação do problema

A manutenção industrial tem evoluído significativamente nas últimas décadas, passando de abordagens correctivas para estratégias mais eficientes, como a manutenção preditiva. No contexto das máquinas-ferramentas, a análise de vibração tem se destacado como um método eficaz para detectar falhas antes que causem danos severos, reduzindo custos e tempo de inactividade.

Nas oficinas académicas, como as do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Eduardo Mondlane, a preservação dos equipamentos é essencial para garantir a qualidade do ensino prático. No entanto, a ausência de um plano estruturado de manutenção preditiva pode levar ao desgaste acelerado das máquinas-ferramentas, resultando em falhas inesperadas que comprometem as actividades académicas.

Diante desse cenário, este trabalho busca analisar um plano para implementação de manutenção preditiva baseada na vibração. O foco será nas máquinas-ferramentas, como tornos e fresadoras, visando estruturar directrizes que possam ser aplicadas para monitoramento e prevenção de falhas nesses equipamentos.

1.2. Objectivos

1.2.1. Objectivo geral

- Avaliar a implementação da manutenção preditiva baseada na análise de vibração nos equipamentos oficiais do DEMA da UEM.

1.2.2. Objectivos específicos

- Descrever os parâmetros físicos das vibrações relevantes para o monitoramento de falhas em máquinas ferramentas;
- Desenvolver uma ferramenta computacional para análise de vibração e identificação de falhas;
- Desenvolver um plano para implementação da manutenção preditiva baseada na análise de vibração;
- Avaliar a viabilidade do plano proposto.

1.3. Metodologia

O trabalho foi realizado em quatro etapas, a primeira etapa concentra-se numa breve apresentação das principais referências e conceitos para o tema proposto, que trata da análise de vibrações mecânicas como técnica de manutenção preditiva, em que aborda o processamento e análise de sinais e a interpretação destes para o diagnóstico da condição de máquinas rotativas.

A segunda etapa traz as informações relacionadas ao desenvolvimento de uma ferramenta computacional em linguagem *Python* capaz de processar sinais ou dados de vibração e identificar possíveis modos de falhas com base em análises no domínio do tempo e da frequência. Uma breve introdução aos tipos e funcionamento das máquinas em questão e de seus principais modos de falha é feita e em seguida apresentar-se-ão as técnicas de análise de vibrações adotadas e suas contribuições para a detecção das características vibracionais. Os sinais de vibração utilizados na validação da ferramenta foram gerados por simulação computacional, com base em modelos matemáticos representativos do comportamento vibracional típico de máquinas rotativas em diferentes condições de operação (normal e com falhas). Essa abordagem foi adotada devido à indisponibilidade de sensores reais no momento da pesquisa, sendo uma alternativa válida e amplamente utilizada na literatura para testes preliminares e validações de sistemas de monitoramento e diagnóstico. A simulação permitiu a representação de diferentes padrões de falha, como desbalanceamento, desalinhamento, folga mecânica e defeitos em rolamentos, viabilizando a análise do desempenho da ferramenta proposta.

A terceira etapa inclui a elaboração de um plano estruturado de manutenção preditiva e estudo de sua viabilidade para implementação nas oficinas do DEMA da UEM.

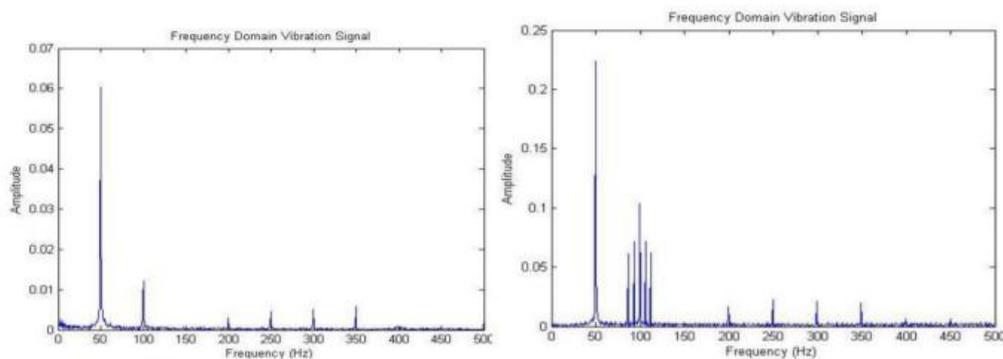
A quarta etapa compreende as conclusões obtidas ao longo do trabalho, com base nos resultados alcançados e na comparação com estudos de referência.

Capítulo II – Revisão Bibliográfica

Muitos trabalhos desenvolvidos em torno do tema de manutenção preditiva abordam a perspectiva do uso de dados de vibração no diagnóstico e monitoramento de falhas em equipamentos rotativos.

Karma e Maheshwari (2016) realizaram o estudo de defeitos de corrosão alveolar (*Pitting*) em dentes de engrenagens através da análise de vibrações no domínio da frequência. A técnica adoptada foi a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e os dados foram colectados das engrenagens de um redutor de velocidades de dois estágios. Essa técnica possibilitou gerar as componentes de frequência do sinal cujos resultados obtidos mostraram que os defeitos nos dentes da engrenagem produzem picos e bandas laterais, que foram correctamente detectados após a aplicação da FFT, mas sem a possibilidade de indicar o nível de degradação dos mesmos, a figura 1 apresenta os espectros resultados do estudo.

Figura 1: Resultado da FFT

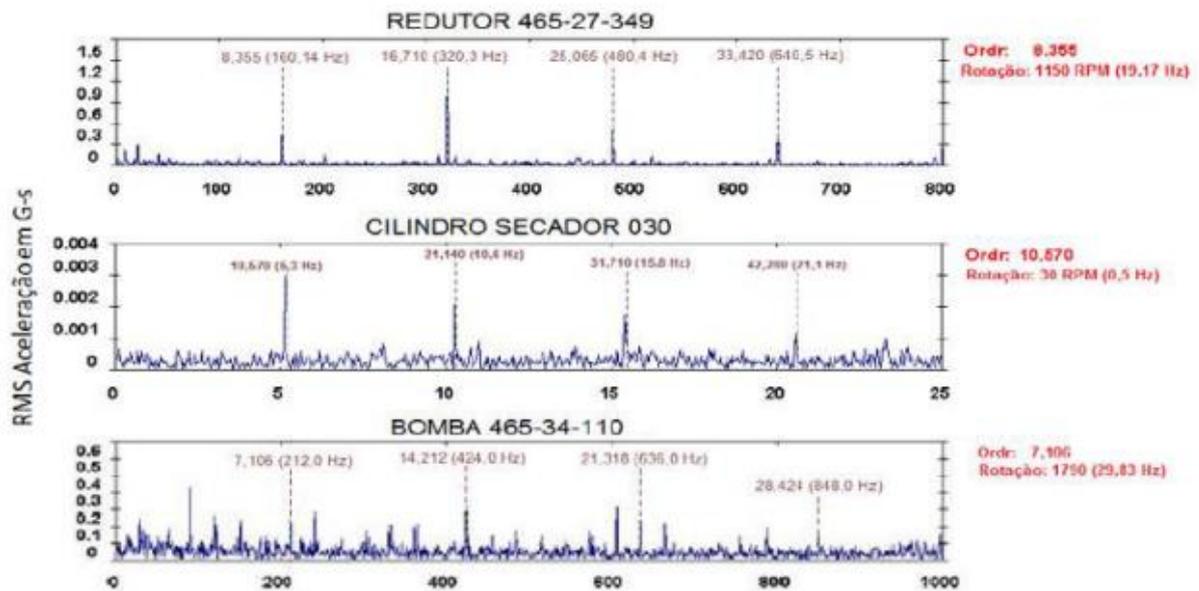


Fonte: Karma e Maheshwari (2016)

Já Nichterwitz (2013) apresenta um estudo comparativo entre os métodos do Valor de Pico (*PeakVue*) e da Demodulação (Envelope) na detecção de falhas em rolamentos de diversas máquinas distintas.

O estudo comparou as duas técnicas e concluiu que a técnica do valor de pico obteve resultados superiores devido a capacidade de detectar defeitos em baixas rotações (30 RPM), enquanto para médias rotações (entre 1000 e 2500 RPM) as duas técnicas obtiveram resultados equivalentes, conforme ilustra a Figura 2.

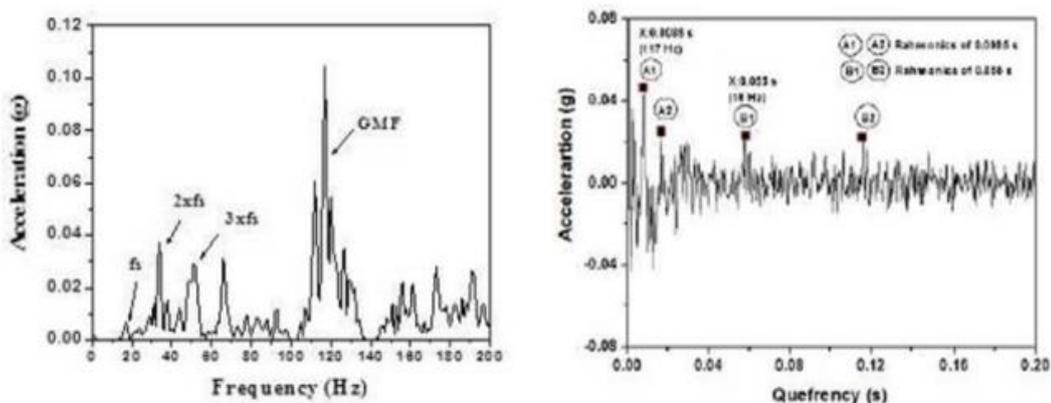
Figura 2: Resultado do método do PeakVue na identificação das frequências de falhas em rolamentos



Fonte: Nichterwitz (2013)

Vernekar, Kumar e Gangadharan (2015) apresentam um estudo de detecção de falhas em engrenagens por meio das técnicas da Transformada Rápida de Fourier (FFT) e do Cepstrum, em que foram realizados testes em bancada utilizando-se uma engrenagem defeituosa e outra em bom estado sob uma rotação de eixo de 1100 RPM (18 Hz). O estudo concluiu que ambas as técnicas são eficientes para identificar e distinguir as frequências de falha, sendo a técnica da FFT mais favorável para a detecção das características das frequências fundamentais e a técnica do Cepstrum para a detecção de periodicidades no espectro, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3: Resultado do método da FFT e Cepstrum



Fonte: Vernekar, Kumar e Gangadharan (2015)

2.1. História da manutenção

A expressão manutenção surge mais intensivamente no vocabulário a partir de 1930, através das unidades militares e tinha como objectivo manter nas unidades de combate e em geral todo o material num nível aceitável de funcionamento e de conservação. Esta actividade passou por várias mudanças, podendo ser dividida em três (3) gerações.

2.1.1. A Primeira Geração

A primeira geração abrange o período antes da Segunda Guerra Mundial, quando a indústria era pouco mecanizada, os equipamentos eram simples e, na sua grande maioria, superdimensionados.

Aliado a tudo isto, devido a conjuntura económica da época, a questão da produtividade não era prioritária. Consequentemente, não era necessária uma manutenção sistematizada; apenas serviços de limpeza, lubrificação e reparo corretivo não planejado, apenas após a quebra (KARDEC & NASCIF, 2009, p. 2).

2.1.2. A Segunda Geração

Ocorre após o fim da Segunda Guerra Mundial, entre os anos 50 e 70. Como consequência do aumento da demanda por todo o tipo de produtos, naquele período houve um forte aumento da mecanização e da complexidade das instalações industriais.

As necessidades de maior disponibilidade e confiabilidade começam a evidenciar-se na busca de maior produtividade; a indústria estava dependente do bom funcionamento das máquinas. Isto levou a ideia de que falhas nos equipamentos poderiam e deveriam ser evitadas, o que resultou no conceito da manutenção preventiva.

“O custo da manutenção também começou a se elevar muito em comparação com outros custos operacionais. Este facto fez aumentar os sistemas de planejamento e controle de manutenção que, hoje, são parte integrante da manutenção moderna” (KARDEC & NASCIF, 2009, p. 2)

2.1.3. A Terceira Geração

A partir da década de 70 acelerou-se o processo de mudança nas indústrias. A paralisação da produção aumentou os custos e afectou a qualidade dos produtos, tornando-se uma preocupação generalizada.

O crescimento da automação e da mecanização passou a indicar que a confiabilidade e disponibilidade se tornaram pontos-chave em sectores como a saúde, processamento de dados, telecomunicações e gerenciamento de edificações.

Na terceira geração:

- Reforçaram-se as técnicas da manutenção preditiva (análise de vibração e termografia).
- O avanço da informática permitiu a utilização de computadores pessoais e o desenvolvimento de *softwares* para o planeamento, controle e acompanhamento dos serviços de manutenção.
- O conceito de confiabilidade começa a ser cada vez mais aplicado pela Engenharia e na Manutenção.
- O processo de manutenção centrada na confiabilidade (MCC ou RCM em inglês).
- Os novos projectos buscam uma maior confiabilidade, contudo a falta de interacção entre as áreas de engenharia, manutenção e operação, impossibilitava que os resultados fossem melhores e as taxas de falhas prematuras eram elevadas.

2.1.4. A Quarta Geração

Na década de 1980, a indústria adoptou a manutenção centrada na confiabilidade (RCM), um modelo que equilibra manutenção correctiva, preventiva e preditiva com base na criticidade dos equipamentos.

“A prática da análise de falhas é uma metodologia consagrada como uma prática capaz de melhorar a performance dos equipamentos e da empresa, por consequência” (KARDEC & NASCIF, 2009, p. 4)

Com objectivo de intervir cada vez menos na planta, as práticas de manutenção preditiva e monitoramento da condição de equipamentos e do processo são cada

vez mais utilizadas. Em consequência, há uma tendência de redução na aplicação da manutenção preventiva ou programada, já que esta provoca paralisação dos equipamentos e sistemas, impactando negativamente a produção. O mesmo ocorre em relação a manutenção correctiva não planejada, que se torna um indicador da eficácia da Manutenção.

A tabela 1 fornece uma visão específica da evolução histórica da manutenção.

Tabela 1: Evolução histórica da manutenção em gerações

Evolução da Manutenção				
	Primeira geração	Segunda geração	Terceira Geração	Quarta geração
Ano				
	1940	1950	1960	1970 1980 1990 2000
Aumento das expectativas em relação à manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Conserto após a falha 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade crescente • Maior vida útil do equipamento 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Melhor relação custo-benefício • Preservação do meio ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior confiabilidade • Maior disponibilidade • Preservação do meio ambiente • Segurança • Influir nos resultados do negócio • Gestão de activos
Visão quanto a falha do equipamento	<ul style="list-style-type: none"> • Todos os equipamentos se desgastam com a idade e, por isso, falham 	<ul style="list-style-type: none"> • Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da taxa de falha 	<ul style="list-style-type: none"> • Existência de padrões de falhas (NOWLAN & HEAP, 1978) Capítulo 5 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzir falhas prematuras dos padrões A e F. (NOWLAN & HEAP, 1978) Capítulo 5

Mudança das técnicas de manutenção	<ul style="list-style-type: none"> Habilidades voltadas para o conserto 	<ul style="list-style-type: none"> Planejamento manual da manutenção Computadores grandes e lentos Manutenção preventiva (por tempo) 	<ul style="list-style-type: none"> Monitoramento da condição Manutenção preditiva Análise de risco Computadores pequenos e rápidos Softwares potentes Grupos de trabalho multidisciplinares Projectos voltados para a confiabilidade Contratação por mão de obra e serviços 	<ul style="list-style-type: none"> Aumento da manutenção preditiva e monitoramento da condição Minimização nas manutenções preventiva e correctiva não planejada Análise de falhas Técnicas de confiabilidade Manutenibilidade Engenharia de manutenção Projectos focados na manutibilidade no custo do ciclo de vida Contratação de resultados
------------------------------------	--	---	---	---

Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2009)

2.2. Importância da manutenção Industrial

A manutenção industrial desempenha um papel fundamental na garantia da confiabilidade, segurança e eficiência dos sistemas produtivos. Sua função vai além da simples reparação de falhas, envolvendo estratégias que asseguram o desempenho contínuo dos activos ao longo de seu ciclo de vida útil. Segundo (KELLY, 1997), a manutenção é uma actividade estratégica que visa maximizar a disponibilidade dos equipamentos e minimizar os custos operacionais, sendo essencial para a competitividade das organizações industriais. Complementarmente, Duffuaa et al. (2015) destacam que a manutenção bem estruturada contribui directamente para a produtividade, qualidade do produto e segurança no ambiente de trabalho. Para Moubrey (1997), a manutenção moderna deve ser encarada como uma ferramenta de gerência integrada à operação, apoiando-se em metodologias como a Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM). Já Coetzee (1999) ressalta que a manutenção é uma função empresarial crítica, essencial para a sustentabilidade da produção industrial. Em ambientes académicos, como oficinas universitárias, a manutenção é igualmente importante, pois garante o bom funcionamento dos equipamentos didácticos e proporciona aos estudantes condições reais de aprendizagem técnica. Dessa forma,

investir em práticas de manutenção adequadas é uma forma de preservar o património físico da instituição e promover o desenvolvimento de competências profissionais entre os alunos.

2.3. Tipos de manutenção

A maneira como é realizada a intervenção nos equipamentos, sistemas ou instalações caracteriza os tipos de manutenção. Algumas práticas básicas definem os tipos principais de manutenção, que são:

a) Manutenção Correctiva

“Manutenção correctiva é a atuação para a correção da falha ou do desempenho menor do que o esperado” (KARDEC & NASCIF, 2009, p. 38).

Do ponto de vista do custo de manutenção, a manutenção correctiva é a mais barata do que a prevenção das falhas nos equipamentos. Em compensação, também pode causar grandes perdas por interrupção da produção (XENOS, 2014, p. 39).

A manutenção correctiva pode ser subdividida em:

- ❖ **Correctiva não planejada:** quando o reparo acontece de forma emergencial, sem planejamento prévio.
- ❖ **Correctiva planejada:** quando a falha já foi identificada, mas a correção é programada para um instante adequado, minimizando os impactos na produção.

b) Manutenção preventiva

Manutenção preventiva é atuação realizada de forma a reduzir ou evitar a falha ou queda no desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo (KARDEC & NASCIF, 2009, p. 42).

Inversamente a política da manutenção correctiva, a manutenção preventiva procura evitar a ocorrência de falhas.

“(…) a manutenção preventiva é mais cara [...] em compensação, a frequência de ocorrência de falhas diminui, a disponibilidade dos equipamentos aumenta e também diminuem as interrupções inesperadas da produção” (XENOS, 2014, p. 41).

c) Manutenção preditiva

Também conhecida por manutenção sob condição ou manutenção com base no estado do equipamento.

“Trata-se da manutenção que prediz o tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos e as condições para que esse tempo de vida seja bem aproveitado” (WEBER & al, 2008, p. 22).

É a actuação realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática. Através das técnicas preditivas é feito o monitoramento da condição e a acção de correção, quando necessária, é realizada através de uma manutenção correctiva planejada (KARDEC & NASCIF, 2009, p. 45).

É a primeira grande quebra do paradigma na manutenção e intensifica o conhecimento tecnológico, seu objectivo é prevenir falhas nos equipamentos ou sistemas através de acompanhamento de parâmetros diversos, permitindo a operação continua do equipamento pelo maior tempo possível.

Quando o grau de degradação se aproxima ou atinge o limite previamente estabelecido, é tomada a decisão de intervenção. Esse tipo de acompanhamento permite a preparação prévia do serviço. Simplificando, pode se dizer que a manutenção preditiva é uma manutenção correctiva planejada.

Segundo Kardec & Nascif (2009) as condições básicas para se tomar a manutenção preditiva são as seguintes:

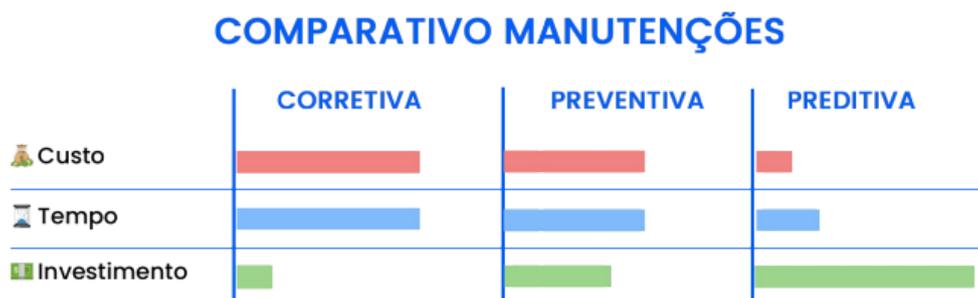
- ✓ O equipamento, sistema ou instalação devem permitir algum tipo de monitoramento/medição;
- ✓ O equipamento, sistema ou instalação devem merecer esse tipo de acção, em função dos custos envolvidos;
- ✓ As falhas devem ser oriundas de causas que possam ser monitoradas e ter sua progressão acompanhada;
- ✓ Seja estabelecido um programa de acompanhamento, análise e diagnóstico, sistematizado.

Para o monitoramento de falhas, a manutenção preditiva usa tecnologias como:

- ❖ Análise de vibração;
- ❖ Termografia;
- ❖ Ultrassom;
- ❖ Análise de óleo.

A figura a seguir ilustra comparativamente os tipos de manutenção, em relação ao custo e investimento para a sua implementação.

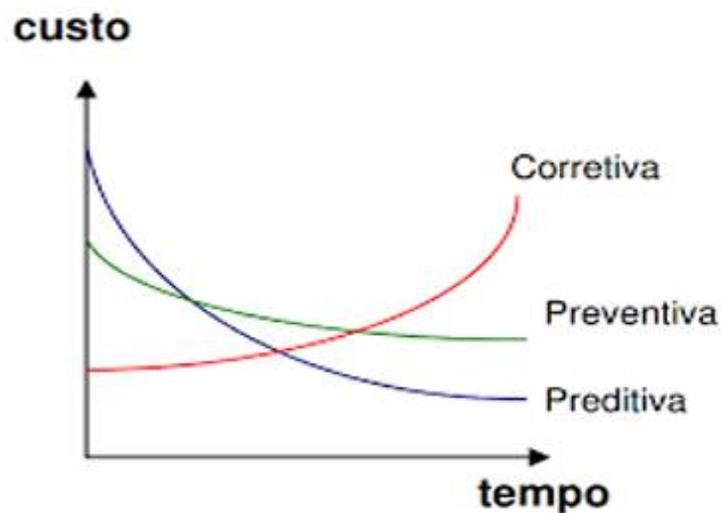
Figura 4: Comparação entre os tipos de manutenção



Fonte: Traction (2025)

A mesma análise pode ser feita graficamente, considerando o custo de cada forma de manutenção em relação ao tempo, conforme ilustra a figura 5.

Figura 5: Variação do custo da manutenção com o tempo



Fonte: Senai (2014)

Como observado nas figuras 4 e 5, a manutenção correctiva tem um custo aparentemente baixo relativamente as outras estratégias de manutenção. No entanto, a médio e longo prazo os custos se tornam muito maiores, o que a torna uma estratégia de manutenção não sustentável.

A escolha da manutenção preditiva em vez da correctiva ou preventiva se justifica, no contexto das oficinas académicas, pela sua capacidade de reduzir falhas inesperadas, garantir maior disponibilidade das máquinas-ferramenta e otimizar recursos limitados. Ao contrário da correctiva, que só intervém após a falha, ou da preventiva, que actua com base em intervalos fixos de tempo ou uso, a manutenção preditiva baseia-se em dados reais de condição dos equipamentos, permitindo diagnósticos antecipados e intervenções mais precisas. Isso é especialmente relevante em instituições de ensino, onde interrupções comprometem actividades práticas e onde os recursos para reposição ou manutenção emergencial são escassos. Além disso, essa abordagem oferece benefícios educacionais, pois possibilita o envolvimento dos estudantes com tecnologias modernas de monitoramento e análise, fortalecendo a integração entre teoria e prática.

2.4. Descrição das máquinas-ferramentas de estudo

As máquinas-ferramentas são equipamentos de manufactura, utilizados para moldar, cortar e dar acabamento a metais por meio de processos de usinagem. Elas permitem a produção de componentes com alta precisão para a área automotiva, aeroespacial e de bens de consumo.

Desde o início da revolução industrial quando surgiram as primeiras máquinas-ferramentas desenvolvidas segundo princípios modernos, até meados dos anos 70, as máquinas-ferramentas sempre evoluíram com base em soluções puramente mecânicas, no máximo incorporando elementos electrotécnicos básicos.

Em instituições de ensino técnico e superior, as máquinas ferramentas são essenciais para a formação prática dos estudantes. “Essas maquinas servem como ferramentas para a compreensão dos processos de fabricação e para o desenvolvimento das habilidades manuais e técnicas dos estudantes”. A experiência pratica adquirida no manuseio destes equipamentos prepara os alunos para os desafios reais do mercado de trabalho (CLARK MACHINE, 2025)

2.5. Torno mecânico

O torno é uma das máquinas mais antigas desenvolvidas pelo homem por meio da mesma nasceram e evoluíram outras de grande importância para a usinagem (VIANNA, 2002).

O torno mecânico é uma máquina-ferramenta utilizada na usinagem de peças cilíndricas e cônicas, funcionando através da rotação da peça de trabalho contra uma ferramenta de corte fixa. Esse processo remove material para dar forma à peça conforme necessário (CHERNOV, 1974, p. 132).

2.5.1. Tipos de tornos

- **Torno de bancada:** Ele é usado para produzir peças simples e em pequena escala. O torno convencional é mais adequado para trabalhos de reparo e manutenção (JMERSON, 2024).

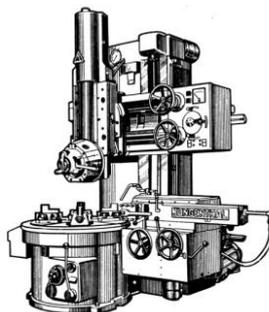
Figura 6: Torno de Bancada



Fonte: LF Máquinas e Ferramentas (2025)

- **Torno vertical:** com eixo de rotação vertical, são utilizados para tornear peças de grandes dimensões e de grande peso. Tornando-se mais facilmente montar as peças sobre uma plataforma horizontal (bucha) do que numa vertical (PERREIRA, 2012, p. 11).

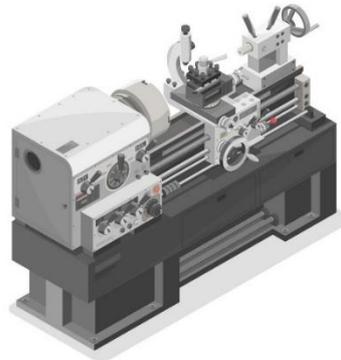
Figura 7: Torno Vertical



Fonte: Perreira (2012)

- **Torno paralelo ou horizontal:** o eixo é posicionado horizontalmente. Ele é usado para produzir peças de pequeno e médio porte, como eixos e pinos (USYTEC, s.d.).

Figura 8: Torno Paralelo



Fonte: Vecteezy (2025)

- **Torno revólver:** utilização de várias ferramentas dispostas e preparadas para realizar várias operações em forma ordenada e sucessiva através de um porta-ferramenta múltiplo (PERREIRA, 2012, p. 12).

Figura 9: Torno Revólver



Fonte: ValMaq (2025)

- **Torno semi-automático:** derivam do torno paralelo, porém com mais recursos. Constituem uma escala intermediária entre os tornos revólver e os tornos automáticos, possuindo as características destes, melhoradas pela mudança automática das ferramentas em cada operação. A operação a cargo do operário é exclusivamente a retirada da peça acabada e a fixação da nova peça em bruto (PERREIRA, 2012, p. 13).

Figura 10: Torno Semi-automático



Fonte: Made in China (2025)

- **Torno automático CNC:** O torno de controle numérico computadorizado (CNC) é uma máquina de torno controlada por um computador. O CNC permite que o operador programe a máquina para produzir peças precisas e complexas com facilidade (USYTEC, s.d.).

Figura 11: Torno CNC



Fonte: Machine Seeker (2025)

Para o presente estudo, tem-se disponíveis modelos de tornos do tipo paralelo (modelo 1224 B da Shy Sheng Machinery CO, LTD) de 11,2 kW.

2.6. Fresadora

A fresadora é uma máquina ferramenta empregada na operação de fresagem, esse nome deriva da ferramenta de corte giratória chamada “fresa”, que possui múltiplos arestas cortantes e é utilizada na remoção de metal na forma de cavacos (CHIAVARIA, 1986, p. 215).

As fresadoras são máquinas de movimento contínuo, destinadas a usinagem de materiais, onde se removem os cavacos por meio de uma ferramenta de corte chamada fresa, a operação de retirada de cavacos é chamada de fresagem. Desde que apareceram até hoje, tem apresentado uma evolução construtiva notável que permite uma faixa muito ampla de operações (SCHAPA, KEMPA, & NUNES, 2010).

2.6.1. Tipos de fresadoras

- **Fresadora vertical:** tem como principal característica o eixo-árvore disposto verticalmente, perpendicular à superfície da mesa. “É amplamente utilizada na fabricação mecânica, pois permite maior flexibilidade na usinagem de peças complexas, principalmente aquelas com superfícies inclinadas ou verticais” (SILVA & BARBOSA, 2017, p. 128).

Figura 12: Fresadora Vertical



Fonte: First Mold (2024)

- **Fresadora horizontal:** caracterizada pelo eixo-árvore disposto na posição horizontal, o que permite a utilização de fresas cilíndricas ou de disco para realizar cortes paralelos à mesa da máquina. “Na fresadora horizontal, o eixo da ferramenta é paralelo à superfície da mesa, sendo ideal para usinagens pesadas e cortes rectos em grandes superfícies” (MESQUITA, 2014, p. 92).

Figura 13: Fresadora Horizontal



Fonte: First Mold (2024)

- **Fresadora universal:** é um modelo híbrido que combina as funcionalidades da fresadora horizontal e da vertical. “A fresadora universal destaca-se por sua versatilidade, sendo equipada com mesa giratória e cabeçote ajustável, o que a torna capaz de executar múltiplas operações com precisão” (MACHADO, 2013, p. 203).

Essa fresadora é amplamente utilizada em ambientes educacionais e oficinas de manutenção, por possibilitar a realização de diversos tipos de operações em uma única máquina.

Figura 14: Fresadora Universal



Fonte: Central Catalana Maquinaria S.A. (2025)

Para estudo, tem-se a fresadora universal (Modelo Milko 35r), ilustrada na figura 14 que pode operar tanto na orientação horizontal quanto na vertical, disponível nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Eduardo Mondlane.

2.7. Fundamentos da análise de vibração

2.7.1. Análise da vibração

A análise de um sistema vibratório normalmente envolve modelagem matemática, obtenção de equações governantes, solução das equações e interpretação de resultados (RAO, 2008).

A vibração é um movimento oscilatório causado por forças periódicas ou impactos internos nos componentes da máquina. A análise se baseia nos seguintes conceitos:

- d) Frequência (Hz ou COM- ciclos por minuto): mede quantas oscilações ocorrem por segundo ou por minuto. Ajuda a identificar a origem da vibração.
- e) Amplitude: representa a intensidade da vibração. Aumento na amplitude pode desgastes ou desalinhamentos.
- f) Fase: relaciona o deslocamento de dois pontos na máquina, auxiliando na identificação de problemas de montagem e alinhamento.

2.7.2. Princípios da manutenção preditiva baseada na vibração

A vibração mecânica pode ser definida como um tipo de movimento no qual se considera uma massa reduzida a um ponto submetido a uma força. A ação dessa força obriga o ponto a executar um movimento oscilatório. Para que o movimento oscilatório do ponto se constitua numa vibração, ele deverá percorrer uma trajetória denominada trajetória completa ou ciclo, conhecida pelo nome de período de oscilação (BENEDETTI, 2002).

Na engenharia, o estudo das vibrações é um item de alta criticidade, visto que os efeitos das vibrações são, em alguns casos, terminais, quando se considera o desgaste prematuro dos elementos mecânicos resultando em falhas por fadiga do material, rupturas causadas por cargas dinâmicas, que por vezes são apenas cargas moderadas, porém submetidas aos movimentos cíclicos e ininterruptos. Se não for possível eliminar totalmente a vibração nesses casos, deve-se ao menos tentar mantê-la sob controle e, com auxílio de planejamento e programação da manutenção apropriados, antecipar a substituição de componentes mecânicos antes que as avarias ocorram (FRANÇA & SOTELO Júnior, 2013, p. 2).

Dessa forma, a compreensão dos conceitos e fundamentos que regem a teoria das vibrações mecânicas, associada à técnica de manutenção preditiva de análise de vibrações, é fundamental para melhoria de projecto e operação de equipamentos, automóveis e outros itens submetidos a vibrações e ruídos.

Até certo ponto, o fenômeno da vibração é considerado como natural para o funcionamento adequado da máquina, o problema é encontrado quando ultrapassa esse limite tolerável. “O acompanhamento e a análise de vibração estão entre os mais importantes métodos preditivos em vários setores de indústria” (KARDEC & NASCIF, 2009, p. 244). Nas máquinas rotativas que está concentrada a maior parte dos acompanhamentos de vibração, onde toda a metodologia de análise é avançada. “Os parâmetros de vibração relacionados com máquinas rotativas são usualmente expressos em termos de deslocamento, velocidade e aceleração” (KARDEC & NASCIF, 2009, p. 244). Segundo o Sistema de Diagnóstico de Máquinas, qualquer que seja a grandeza escolhida, a forma e o período de vibração continuam similares, o que muda é a existência de uma diferença de fase entre elas.

A frequência é a outra variável de importância na análise de vibração, que auxilia na identificação da sua origem. Finalmente, a fase indica onde o ponto pesado se encontra em relação ao sensor da vibração.

De acordo com as normas *DIN 7090*, *ISO 2372* e *ISO 10816*, a análise do espectro é feita através da observação da variação dos seguintes parâmetros: deslocamento, velocidade e aceleração.

Essas variáveis são representadas pelas seguintes fórmulas matemáticas:

$$\text{Deslocamento} \quad x = A \sin \omega t \quad [\text{mícron}] \quad (1)$$

$$\text{Velocidade} \quad v = A\omega \cos \omega t = dx/dt \quad [\text{mm/s}] \quad (2)$$

$$\text{Aceleração} \quad a = -A\omega^2 \sin \omega t = dv/dt \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (3)$$

Onde:

A = amplitude do vector de zero a pico em mm.

ω = velocidade angular em rad/seg.

t = tempo em segundos.

Como $\omega = 2\pi f$, onde f = frequência em ciclos/seg., substituindo nas formulas de deslocamento, velocidade e aceleração, verifica-se que:

- ✓ A amplitude de deslocamento independe da frequência;
- ✓ A amplitude de velocidade crescerá proporcionalmente à frequência;
- ✓ A amplitude de velocidade crescerá com o quadrado da frequência.

Para um valor constante da amplitude de deslocamento:

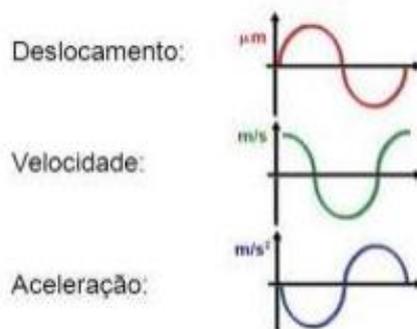
$$v = 2\pi f A \quad (4)$$

e

$$a = (2\pi f)^2 A \quad (5)$$

As grandezas citadas encontram-se representadas na figura 15 abaixo ilustrada:

Figura 15: Grandezas de Análise de Vibrações



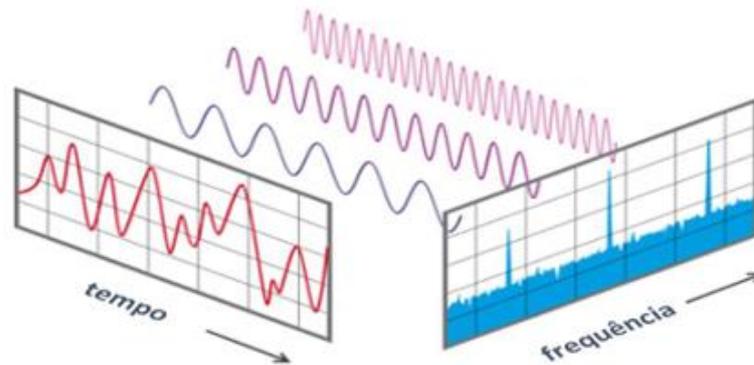
Fonte: Técnicas de Manutenção Preditiva para Análise de Vibração em Equipamentos Industriais (2022)

Segundo Matheus Bruno Dias (2021), na análise de sinais, os sinais vibratórios são classificados quanto ao seu período de repetição, o que também caracteriza a sua complexidade, sendo eles:

- Vibrações Periódicas (determinísticas): ocorrem segundo um dado período em resposta às forças periódicas;
- Vibrações Aleatórias (não determinísticas): possuem valores instantâneos imprevisíveis para qualquer instante de tempo;
- Vibrações Transitórias: caracteriza-se como a resposta à uma excitação impulsiva arbitrária, ocorrendo apenas num espaço de tempo limitado.

Os métodos de análise podem ser subdivididos em: análise no domínio do tempo e análise no domínio da frequência. Logo, esses métodos se diferenciam na grandeza do eixo das abcissas, podendo ser expressa em função do tempo ou da frequência, conforme representado na Figura 16.

Figura 16: Sinais no domínio do tempo e da frequência



Fonte: Dias (2021)

“Os valores obtidos devem permanecer dentro de faixas admissíveis, a partir de uma tendência de evolução desses níveis de vibração é feita uma análise de frequência para identificação da origem do problema” (GANZER, 2017, p. 8).

Na análise de medidas, pode-se avaliar de pico a pico, apenas picos, média retificada ou por RMS (*Root Medium Square*, traduzindo: Raiz Média Quadrada). O método que mais se destaca é o RMS, pois ele considera o histórico no tempo da onda gerando um valor de nível diretamente ligada ao componente avaliado. O valor RMS é o parâmetro para mensuração de nível mais relevante, por considerar o histórico da onda no tempo, evidenciando a severidade da energia contida no sinal, ou seja, a capacidade destrutiva desta vibração (SEGÓBIA, 2022, p. 5).

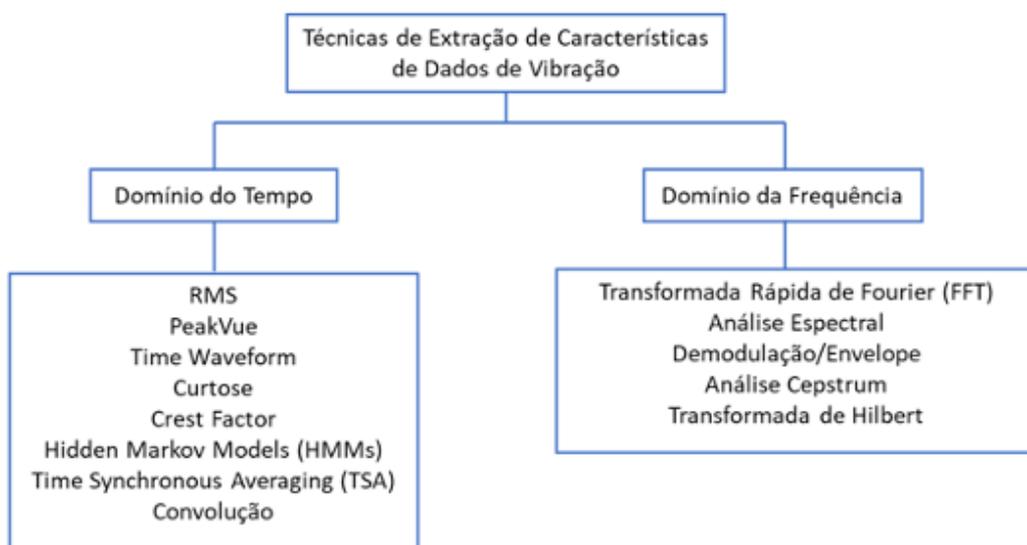
Na prática, a análise de vibração é realizada por meio do uso de medições, “são periódicas para garantir margens de segurança adequadas” (RAO, 2008, p. 344), feitas de um ou mais parâmetros e após isso, a comparação com os dados do equipamento avaliado, referente a cada componente. Se a vibração se encontrar fora dos parâmetros ideais, de acordo com os dados avaliados, a equipe identificará o momento exato da substituição do componente em questão, e também avalia a vida útil dos demais componentes. “Qualquer alteração encontrada nas frequências naturais ou outras características da vibração irão indicar falha ou necessidade de manutenção da máquina” (RAO, 2008, p. 344).

2.8. Técnicas de processamento de sinais de vibração

Os sistemas de monitoramento de condição por análise de vibrações envolvem técnicas de processamento de sinais de vibração. “As técnicas de processamento de sinal vibratório têm o objetivo de extrair as informações capazes de correlacionar algumas características do sinal com o estado do equipamento” (LAGO, 2007, p. 69).

Cada tipo de modo de falha gera sinais distintos por natureza, por isso é importante seleccionar as técnicas de processamento e filtragem de sinais mais apropriada. A Figura 17, mostra algumas das técnicas utilizadas para extracção de características de sinais de vibrações.

Figura 17: Técnicas de extracção de características de sinais de vibração



Fonte: Dias (2021)

2.8.1. Descrição no domínio do tempo

O método da descrição no domínio do tempo baseia-se na análise das informações de amplitude e fase do sinal de vibração para detectar possíveis falhas. A análise envolve o acompanhamento das mudanças nos sinais físicos ou de séries de dados temporais em função do tempo, geralmente através de gráficos para valores de amplitude de sinal em função do tempo. Além disso, a amplitude de vibração pode ser representada como sendo a aceleração, velocidade ou posição/deslocamento vibratório da máquina e seus componentes (DIAS, 2021).

Esse método permite analisar qualquer tipo de impulso, seja ele constante ou transiente, “o domínio no tempo traz uma perspectiva mais natural quanto ao monitoramento da

condição de equipamentos porque fornece informações exclusivas a respeito da vibração” (McFADDEN & SMITH, 1984).

A forma mais comum de análise no domínio do tempo se dá por meio de indicadores estatísticos de condição ou por meio de índices quantitativos. Esses índices permitem o cálculo de valores quantitativos globais e são fundamentais para o entendimento da distribuição dos dados de vibração (DIAS, 2021).

Os principais índices utilizados no domínio do tempo são:

- Valor de pico: caracteriza-se pelo maior valor de amplitude no domínio do tempo:

$$X_{pico} = A_{max} \quad (6)$$

- Root Mean Square (RMS) ou Valor eficaz: descreve a quantidade de energia do sinal vibratório como um todo e não é sensível ao aumento de picos isolados no sinal. Pode ser representado pela equação:

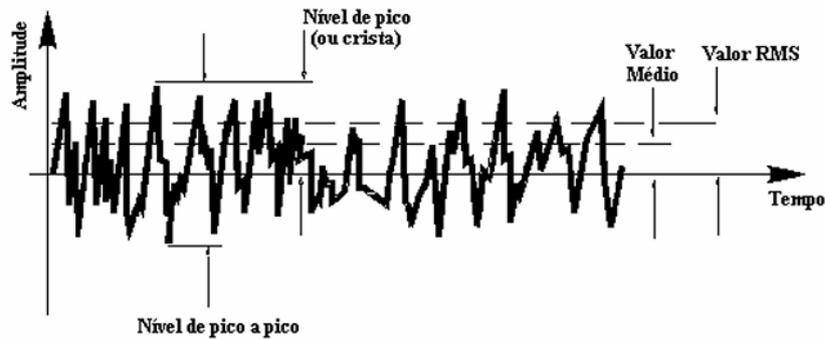
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X^2} \quad (7)$$

- Pico a Pico: corresponde à soma do pico máximo com o valor absoluto do pico mínimo do sinal, essa medida é eficaz na identificação de picos isolados de alta amplitude.
- Fator de Crista (*Creast Factor* - CF): é a razão entre o valor do pico-a-pico e o valor do RMS. É um indicador de danos em uma fase incipiente, dado por:

$$CF = \frac{X_{pico}}{X_{RMS}} \quad (8)$$

Alguns destes indicadores são apresentados na figura 18 abaixo.

Figura 18: Valores globais de medida de vibração para um sinal complexo.



Fonte: Arato (2004)

Segundo Dias (2021), os métodos estatísticos para a análise no domínio do tempo são:

- Função densidade de probabilidade: é a probabilidade de encontrar valores instantâneos em um intervalo de amplitudes determinado, dividido pelo tamanho do intervalo. A forma da curva de densidade de probabilidade pode ser representada por uma série de índices numéricos, que são análogos ao momento mecânico com relação ao centroide do plano.
- Curtose: é definida como o quarto momento estatístico de uma matriz de valores sobre a média destes. Na prática, a curtose descreve a distribuição dos picos no espectro. Sua expressão é dada por:

$$K = \frac{\sum_{n=1}^N [x(n) - \mu]^4}{N\sigma^4} \quad (9)$$

Em que:

$x(n)$: é o vector de dados do sinal colectado;

N: número total de amostras;

μ : média;

σ : desvio padrão.

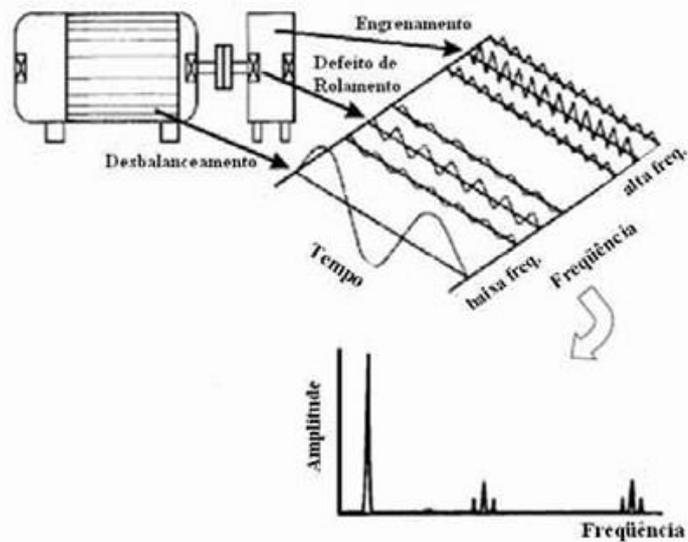
2.8.2. Descrição no Domínio da Frequência

Essa análise utiliza o sinal no domínio da frequência ou espectro de frequência e é representada no gráfico de amplitude da resposta às vibrações em função da frequência.

Esse tipo de análise pode fornecer muitas informações a respeito da condição do equipamento em análise, visto que cada elemento rotativo produz uma frequência característica (DIAS, 2021).

A transformada rápida de Fourier (FFT) pode derivar uma forma de onda no tempo e apresentá-la no domínio da frequência como mostra na Figura 19. Este processo consiste na quebra de todo sinal vibratório em componentes individuais do sinal de vibração e plotagem destes em escala de frequência. Esse sinal no domínio da frequência é chamado de espectro de frequência e fornece uma informação valiosa sobre a condição de uma máquina (LAGO, 2007).

Figura 19: Sinal de vibração no domínio da frequência



Fonte: Lagos (2007)

a) Transformada rápida de Fourier

“Os princípios básicos para a Transformação Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* FFT) foram estabelecidos pelo matemático francês Fourier, em 1822. Ele demonstrou que qualquer sinal periódico pode ser dividido em uma série de vibrações harmônicas individuais computadas por amplitude e fase.” (LAGO, 2007, p. 74)

De acordo com Dias (2021), a transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) compreende diversos métodos eficientes para o cálculo da Transformada Discreta de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*) e também da sua inversa. A análise de Fourier converte um sinal do seu domínio original para uma representação no domínio da frequência e a sua inversa converte o sinal no domínio da frequência para seu domínio original, conforme a equação X e Y respectivamente:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-i\omega t} dx \quad (10)$$

e

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (11)$$

Onde:

t : tempo;

ω : frequência;

$f(x)$: função no domínio original;

$F(\omega)$: transformada de Fourier da função $f(x)$, sinal no domínio da frequência.

b) Envelope através da Transformada de Hilbert

A Transformada de Hilbert é utilizada em processos de demodulação de sinais, visto que em falhas mecânicas os sinais apresentam-se modulados. Essa técnica é capaz de gerar sinais complexos a partir de sinais reais, podendo ser implementada para extrair o envelope do sinal (DIAS, 2021).

A equação matemática para cálculo da Transformada de Hilbert é dada por:

$$y(t) = H[x(t)] = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (12)$$

Onde:

$x(t)$: dados originais no domínio do tempo;

P : valor principal de Cauchy.

A partir da manipulação da Transformada de Hilbert é possível definir o envelope (parte real) através da representação das funções reais e complexas, como:

$$z(t) = x(t) + jy(t) \quad (13)$$

Onde:

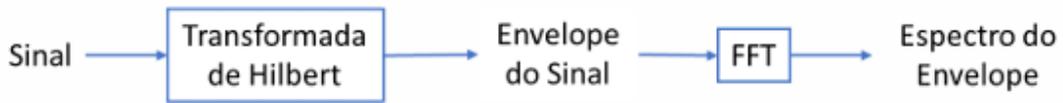
$z(t)$: sinal complexo associado a $x(t)$;

$y(t)$: transformada de Hilbert do sinal $x(t)$;

$j = \sqrt{-1}$.

O espectro do envelope é a representação do envelope no domínio da frequência, esse processo pode ser obtido seguindo-se os passos conforme apresentado na figura 20.

Figura 20: Processo de obtenção do espectro do envelope

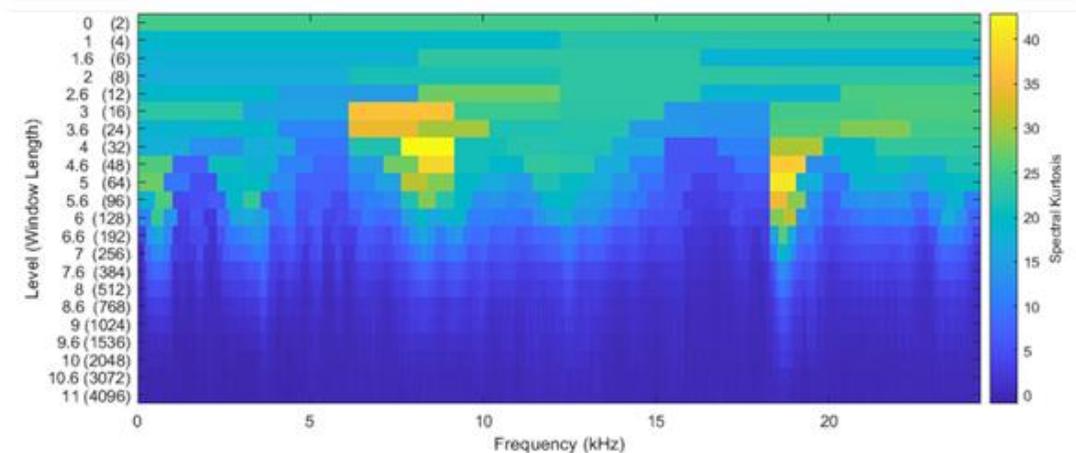


Fonte: Dias (2021)

2.8.3. Curtose espectral

A Curtose é um parâmetro estatístico normalizado no domínio do tempo utilizado devido sua sensibilidade aos sinais instantâneos. Já a Curtose espectral (SK – *Spectral Kurtosis*) se mostra uma ferramenta eficaz na obtenção dos espectros de frequência de falhas em rolamentos. É geralmente utilizada para analisar os componentes Gaussianos do sinal no domínio da frequência, pois esse método mede a quantidade (distribuição) de energia (potência) para cada frequência. Para visualizar a SK é possível utilizar o Curtograma, apresentado na figura 21, caracterizado como a análise do espectro de quarta ordem e capaz de detectar e caracterizar componentes não-estacionárias no sinal em análise.

Figura 21: Exemplo de um Curtograma



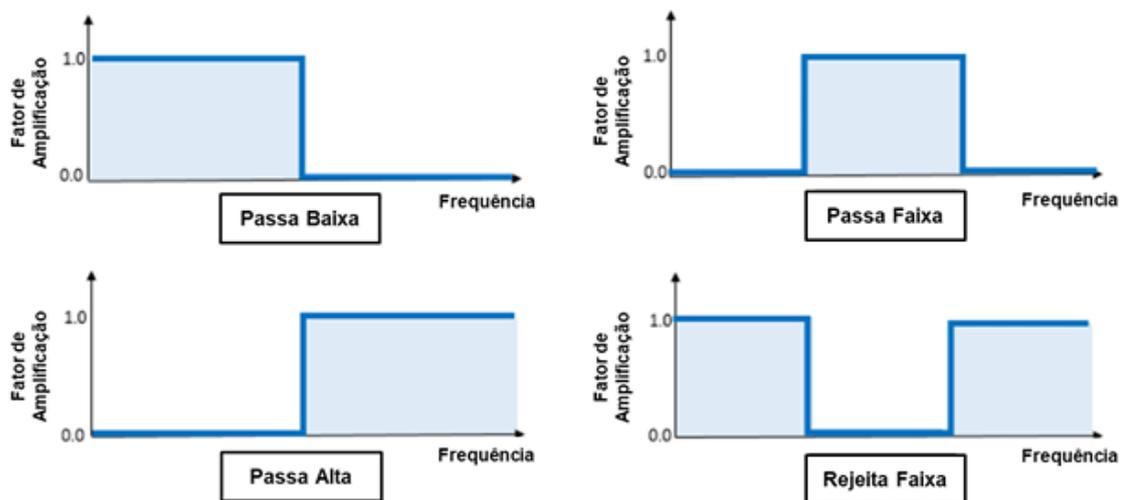
Fonte: Dias (2021)

2.8.4. Filtragem do sinal

O filtro é um algoritmo matemático que opera num conjunto de dados (de sensores) para extrair a informação de interesse. O objectivo é separar as componentes de interesse de

um sinal não filtrado (*raw data*) e remover o que for indesejado. Em suma, aplica-se um filtro para separação de bandas de frequências permitindo que uma região específica no espectro de frequências de interesse passe (banda de passagem), enquanto as frequências não desejadas sejam atenuadas (banda de corte). Existem 4 principais tipos de bandas de passagem: passa baixa (passa sinais com frequências mais baixas do que a frequência de corte estipulada e atenua as frequências acima da frequência de corte), passa alta (atenua as frequências inferiores à frequência de corte e passa as frequências de alta), passa banda (permite a passagem das frequências de uma faixa de frequências delimitadas e atenua as frequências que estão fora dessa faixa) e o filtro rejeita banda (rejeita a frequência dentro de uma faixa de frequências especificada). Abaixo encontra-se a sua representação gráfica na figura 22.

Figura 22: Tipos de bandas de passagem



Fonte: Editado de Dias (2021)

2.8.5. Cepstrum

O Cepstrum caracteriza-se pela transformação de um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência, seguida da computação do logaritmo da amplitude espectral e da transformação inversa para o domínio da quefrência (*“quefrequency”*), conforme representado na figura 23.

A análise por meio desta técnica pode ser capaz de identificar periodicidades nos sinais no domínio da frequência. Apesar de existirem diversas variações desta técnica ela pode ser resumida como sendo uma técnica de pré-processamento de sinais não-lineares capaz de gerar um espectro de um espectro logarítmico, conforme a equação 14:

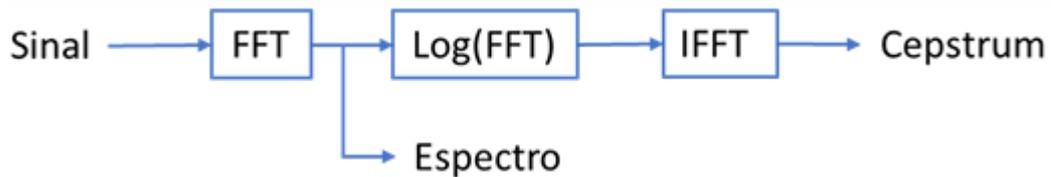
$$C_p = F^{-1}(\log[X(\omega)]) \quad (14)$$

Onde:

F^{-1} : inversa da FFT;

$X(\omega)$: resultado da FFT.

Figura 23: Relação entre o espectro e o Cepstrum

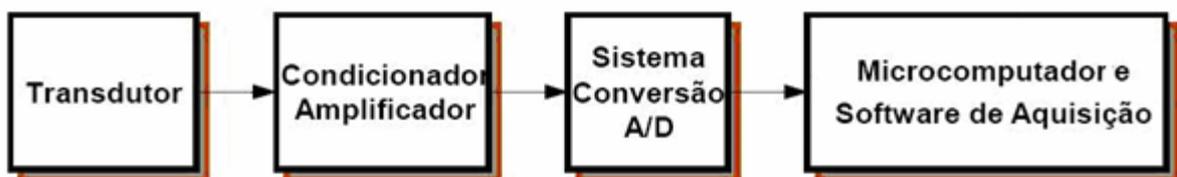


Fonte: Dias (2021)

2.9. Equipamento para medição da vibração

Para a obtenção do sinal vibratório é necessário a utilização de uma cadeia instrumental, composta basicamente de um transdutor, um condicionador/amplificador, sistema de conversão A/D, microcomputador e software de aquisição (SEGÓBIA, 2022).

Figura 24: Cadeia de medição utilizada para aquisição do sinal de vibração



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

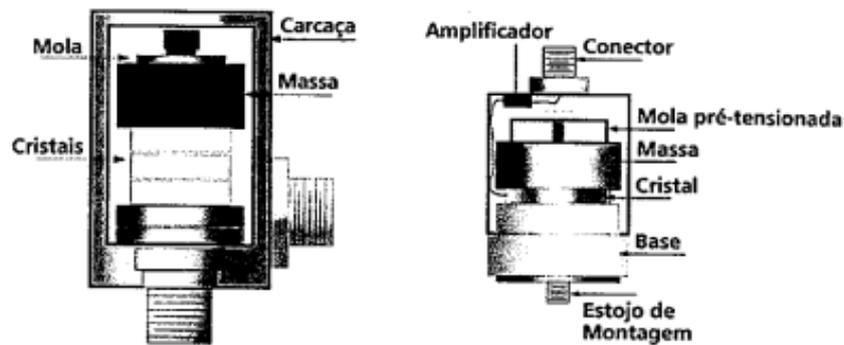
2.9.1. Transdutor

Usado para converter um movimento mecânico, neste caso a vibração, em um sinal eléctrico ou magnético. Para análise de vibrações podem se usar transdutores de deslocamento, de velocidade ou acelerómetros. O mais utilizado é o acelerómetro.

i. Acelerómetros

“A maioria das medições feitas actualmente é feita através da medição da aceleração” (KARDEC & NASCIF, 2009, p. 248). Existem vários tipos de acelerómetros, o mais comum é o piezoeléctrico, constituído por um ou mais cristais piezoeléctricos, pré-tensionados por uma massa e montados em uma carcaça, conforme apresenta a figura 25.

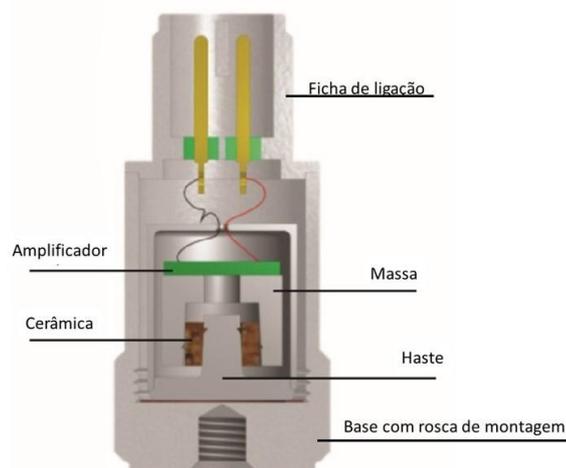
Figura 25: Acelerômetros



Fonte: Kardec e Nascif (2009)

Abaixo na figura 26 é apresentado um acelerômetro piezoelétrico

Figura 26: Acelerômetro Piezoelétrico



Fonte: DCM Engenharia e sistemas Ibéricos (2025)

O acelerômetro é projectado para produzir uma voltagem eléctrica proporcional ao movimento, velocidade ou aceleração da vibração usando um princípio piezoelétrico. Eles consistem em um cristal piezoelétrico e uma massa normalizada incluída em uma “caixa” de metal. Como a massa aplica uma força no cristal, este por sua vez produz uma carga eléctrica proporcional a aceleração. A carga é medida em picocoulombs por grama (pC/g). Alguns sensores têm um amplificador de carga interno, outros precisam de um amplificador externo (LAGO, 2007, p. 79).

A carga é amplificada e convertida em uma carga proporcional em termos de milivolts por grama.

A fixação dos acelerómetros deve ser preferencialmente fixada na superfície de medição por meio de aparafusamento, mas pode ser colado, fixado por base magnética e, em último caso, firmemente pressionado no ponto com auxílio de uma haste com ponta cónica (SEGÓBIA, 2022, p. 7).

São também tipos de sensores comumente usados:

- Sensores electromagnéticos e capacitivos.
- Sensores electrodinâmicos de velocidade.

ii. Sensores electromagnéticos e capacitivos

São sensores de proximidade, instalados nas máquinas rotativas para detectar o movimento do eixo dentro do mancal ou movimento relativo de outros elementos de máquinas. Este sensor consiste em uma bobina montada em plástico ou cerâmica não condutora que fica alojada num corpo roscado, fazem também parte do sistema um cabo de extensão e um oscilador-demodulador (também conhecido como *proximitor*).

Este tipo de sensor apresenta como vantagens o seu tamanho reduzido, o facto de não sofrer efeito de óleos e gases e suportar elevadas temperaturas de até 117 °C, para além de possuir um custo baixo de aquisição. Em contrapartida, o facto de requerer uma fonte externa para gerar sinal e ser susceptível a variações na superfície do eixo apresentam-se como pontos negativos destes sensores (KARDEC & NASCIF, 2009, p. 247).

Figura 27: Acelerómetro Electromagnético



Fonte: Protectronics (2025)

iii. Sensores electrodinâmicos de velocidade.

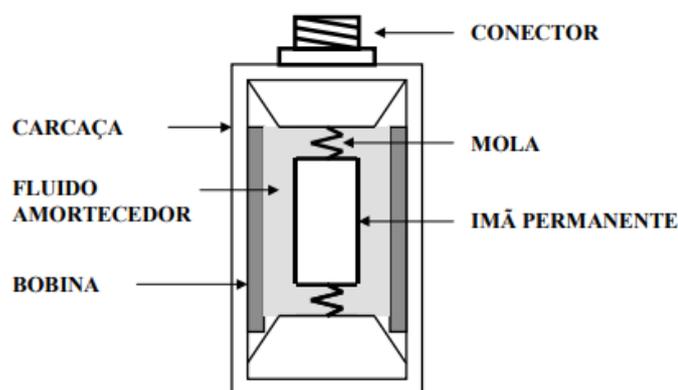
É um sensor sísmico que incorpora um ímã (magneto) suportado por um sistema de suspensão (molas) para formar um sistema sísmico (massa mola).

O sensor típico encontra-se mostrado na figura 28 consiste em uma carcaça de alumínio, dentro da qual estão alocados uma bobina, ímã permanente e duas molas. O ímã fica suportado pelas duas molas, uma em cada extremidade, e estes são colocados no interior da bobina.

Quando o sensor é encostado a uma superfície que apresenta vibração, ocorre um movimento relativo entre o ímã e a bobina. Esse movimento corta as linhas de fluxo magnético, induzindo uma voltagem proporcional à velocidade vibração. O sinal produzido é de baixa impedância, podendo ser usado directamente para análise ou monitoramento. A faixa de utilização deste sensor se situa entre 10 e 1500 Hz.

Estes sensores geram seu próprio sinal (voltagem), forte, e podem ser montados em qualquer direcção, para além também de serem razoavelmente precisos até 300 000 RPM. São também características destes sensores o seu tamanho e peso e preço elevados, e também sua utilização limitada em 10 cps (KARDEC & NASCIF, 2009, p. 248).

Figura 28: Sensor Electrodinâmico de velocidade



Fonte: Marçal (2000)

2.9.2. Condicionador/Amplificador

É o responsável pelo tratamento do sinal colectado no transdutor, sua amplificação, compensação da resistência e capacitância do cabo e fornece a intensidade ou nível de vibração em termos de deslocamento, velocidade ou aceleração. Possui elemento integrador que integra o sinal proporcional de aceleração para velocidade e de velocidade para deslocamento. Possui filtros do tipo passa-alta e passa-baixa para determinar a faixa de frequência medida, eliminando assim ruídos (LAGO, 2007, p. 80).

2.9.3. Sistema de Conversão Analógico/Digital

Converte o sinal analógico (contínuo) de saída do condicionador em um sinal digital (discreto). O condicionamento do sinal neste sistema pode incluir amplificação, filtragem, aplicações diferenciais, isolamento, amostragem simultânea e retenção, conversão corrente-voltagem, conversão voltagem-frequência e linearização.

Para essa finalidade, utiliza-se um sistema de aquisição de dados (DAQ – *Data Acquisition System*), que incorpora tanto o conversor A/D quanto outros recursos essenciais para a integridade e qualidade da aquisição.

O DAQ actua como intermediário entre o sensor e o computador, sendo responsável por realizar, de forma integrada, funções como:

- Amplificação e filtragem do sinal analógico;
- Isolamento eléctrico entre o circuito de medição e o sistema de processamento;
- Amostragem e retenção do sinal em tempo real;
- Conversões auxiliares, como corrente-voltagem e voltagem-frequência;
- E a conversão analógico-digital.

Após a conversão, os dados digitais são enviados ao computador por meio de uma interface (geralmente USB, PCI ou *Ethernet*), onde são armazenados em arquivos estruturados, como .csv, para posterior análise. A utilização de um DAQ dedicado assegura maior precisão, estabilidade e compatibilidade com diferentes sensores e sistemas de controle, sendo uma solução recomendada tanto em ambientes industriais quanto académicos.

Figura 29: Dispositivo de aquisição de dados - DAQ produktbild



Fonte: Incal Instrumentos (2025)

2.9.4. Microcomputador e software de aquisição

São os responsáveis pelo processamento numérico, armazenamento e transferência dos dados. São associados a programas de gerenciamento e análise de sinais, baseados em processamento pelo algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*) complementado por ferramentas gráficas para a comparação e análise dos sinais.

No contexto deste trabalho, o microcomputador não apenas executa as tarefas de aquisição e visualização, mas também desempenha um papel central no processamento automatizado dos dados por meio de scripts desenvolvidos em linguagem *Python*. Após a aquisição dos dados pela DAQ e sua exportação em formato *.csv* contendo colunas como tempo e aceleração, o sistema em Python é accionado para realizar todo o tratamento computacional, desde o pré-processamento até a geração de relatórios.

As funcionalidades implementadas incluem:

- Leitura estruturada dos arquivos *.csv*;
- Cálculo de indicadores estatísticos no domínio do tempo (como RMS, pico, curtose, etc.);
- Análise espectral via FFT, com geração de espectros no domínio da frequência;
- Classificação automática dos padrões de vibração, com base em critérios técnicos;

Figura 30: Computador para Análise de Dados



Fonte: The Verge (2025)

2.9.5. Analisadores de vibração

Desde que alguns vibrômetros só fornecem a vibração total, o desenvolvimento dos analisadores contemplou a capacidade de seleccionar determinada frequência para medição. Desse modo, se o total da vibração de um mancal, na direcção horizontal, apresentasse o valor de 75 μm , com o analisador poderia ser feita uma medição analisando o valor da vibração para várias frequências. Assim, é possível se encontrar a origem ou causa da vibração (KARDEC & NASCIF, 2009, p. 259).

Outro recurso de que são dotados os analisadores são os filtros, que têm a propriedade de limitar um sinal de vibração, permitindo a passagem de uma faixa determinada de frequência ou mesmo uma única frequência, para facilitar a análise.

Os sistemas de monitoramento de máquinas rotativas por sensor sem contacto no eixo também fornecem um valor global (*overall*) da vibração. A forma adequada de se proceder com a análise de vibração é o envio do sinal do sistema probe-proximitor para o analisador.

Figura 31: Analisador de vibração PRUFTECHNIK VIBXPERT II



Fonte: PRUFTECHNIK (2025)

2.10. Análise pelo nível global de vibrações

Na avaliação pelo nível global de o estado de conservação do equipamento é verificado com base em um valor global calculado para os sinais de vibrações coletados nos pontos de medições. Os valores obtidos devem permanecer dentro de faixas admissíveis. A partir de uma tendência de evolução desses níveis de vibração é feita uma análise de frequência para identificação da origem do problema (LAGO, 2007).

2.10.1. Níveis de severidade

Os níveis de severidade seguintes são definidos para permitir uma avaliação qualitativa da vibração em uma determinada máquina e prover possíveis acções de manutenção. A ISO 10816-3 separa as condições de trabalhos em 4 níveis:

Nível A – Boas condições. Faixa normalmente encontrada em máquinas novas ou revisadas.

Nível B – Aceitável para operação contínua. Faixa de operação normal das máquinas em boas condições de manutenção e operadas adequadamente.

Nível C – Limite tolerável. Faixa não aceitável para operação contínua. Nesta faixa deve-se operar o equipamento por um período limitado e deve-se programar uma revisão para ajustes ou consertos mais rápido possíveis.

Nível D – Não permissível. A severidade neste nível é considerada danosa para o equipamento. Deve-se parar imediatamente e realizar uma manutenção correctiva.

Esses níveis são fornecidos por normas internacionais para cada classe de máquina em inspecção. Porém devem ser encarados como recomendações para obtenção de referências, no início de processos de monitoramento.

No caso da aplicação para manutenção preditiva, as normas técnicas internacionais, dentre elas a ISO, definem dois critérios para adopção de um valor global. Um método avalia a severidade de vibração por meio da medição da vibração absoluta sobre partes não rotativas. O outro avalia as condições da máquina por meio da medição directa da oscilação dos eixos (ARATO, 2004).

Segundo a NBR 10082, na Tabela 2 tem-se a classificação e avaliação das máquinas por níveis de severidade de vibração para quatro tipos de classes, conforme mostrado a seguir. As faixas de severidade são baseadas na norma ISO 2372/74.

Tabela 2: Classificação das máquinas por níveis de severidade de vibração

FAIXA DE SEVERIDADE DE VIBRAÇÃO		AVALIAÇÃO DA QUALIDADE PARA CLASSES DIFERENTES DE MÁQUINAS			
FAIXA	VELOCIDADE NOS LIMITES (mm/s)	CLASSE I	CLASSE II	CLASSE III	CLASSE IV
0,28	0,28	A	A	A	A
0,45	0,45	A	A	A	A
0,71	0,71	A	A	A	A
1,12	1,12	B	A	A	A
1,8	1,8	B	B	A	A
2,8	2,8	C	B	B	A
4,5	4,5	C	C	B	B
7,1	7,1	D	C	C	B
11,2	11,2	D	D	C	C
18	18	D	D	D	C
28	28	D	D	D	D
45	45	D	D	D	D
71	Acima de 45	D	D	D	D

Fonte: NBR 10082 (2011)

Classe I – Máquinas pequenas, com accionamento por motor eléctrico directamente acoplado, potência máxima de 15 KW.

Classe II – Máquinas médias, do tipo da classe I, com potência maior que 15 KW, até 75 KW. Motores ou máquinas montadas rigidamente até 300 KW.

Classe III – Máquinas motrizes grandes e outras máquinas grandes (>75 KW), com massas rotativas montadas sobre fundações rígidas e pesadas, que são relativamente rígidas na direcção de medição de vibração.

Classe IV – Máquinas do tipo da classe III, montadas sobre fundações relativamente flexíveis na direcção de medição de vibração, por exemplo, conjunto de turbogeradores. Logo, o não cumprimento dos níveis de severidade, aumenta o custo de manutenção, causa perda de energia, fadiga estrutural e possivelmente a perda de qualidade dos

produtos. “Esse método de manutenção propicia grande redução de custos porque há um número menor de falhas catastróficas, melhor utilização das peças de reposição e eliminação de manutenção preventiva desnecessária” (RAO, 2008, p. 365).

O parâmetro a ser medido é a velocidade de vibração absoluta sobre as partes da máquina. Neste caso, o valor global escolhido como unidade de medida para indicação da severidade de vibração, o valor da velocidade RMS (V_{ef}) não é representado por uma escala de valores única. Isto se deve à grande diversidade de formas, massa, montagem e condições operacionais dos equipamentos, o que acarreta valores da velocidade RMS diferentes para níveis de severidade aceitáveis (ARATO, 2004).

A utilização do nível global de vibrações é uma técnica adequada para o monitoramento de muitos equipamentos e pode identificar muitos problemas. Esta também é muito confiável pois permite tomar providências antes que ocorra a falha da máquina. Na análise de vibrações é o processo de menor custo.

Uma das desvantagens deste método é que ele não permite que se estabeleça um diagnóstico preciso sobre a origem da falha que provocou a vibração excessiva. Para tal, há necessidade não só da medida do nível global de vibração, mas também de uma análise de vibração (LAGO, 2007).

2.10.2. Medidor global de vibração

É o mais simples para a medição de vibração, usa baterias substituíveis ou recarregáveis, tendo como sensor o *pick-up* de velocidade ou acelerómetro. É capaz de medir amplitude de deslocamento e velocidade em várias faixas, ajustáveis por meio de um selector. A figura 32 apresenta um medidor de vibração global cujo sensor é um acelerómetro piezoelétrico.

Figura 32: Medidor de vibração modelo UT315A 600x600



Fonte: TD Electrónica (2025)

2.10.3. Caneta de medição global de vibração

É um instrumento pequeno (17,8x30,5x157,5 mm) e leve (77g com baterias) que mede, ao mesmo tempo, o valor da vibração global e a aceleração. O sensor da caneta é um acelerómetro piezoelétrico (tipo compressão) com integrador, sendo o sinal de entrada processado para produzir duas medições diferentes.

O valor global da vibração (*overall*) na faixa de frequência entre 10 e 1000 Hz é usado para avaliação de problemas como desbalanceamento e desalinhamento. Já a aceleração acusa problemas que ocorrem em altas frequências— 10 kHz a 30 kHz – característico de rolamentos e engrenagens (KARDEC & NASCIF, 2009, p. 258).

Figura 33: Caneta de medição de vibração modelo PCE-VT 1100



Fonte: PCE Instruments (2025)

2.11. Problemas de origem mecânica

Diversos problemas podem ser encontrados em máquinas elétricas rotativas. Os problemas de origem mecânica são os mais comuns. “Entre eles, o desbalanceamento é o que estará sempre presente em algum nível, uma vez que na prática é virtualmente impossível instalar um rotor perfeitamente balanceado” (SILVA, 2025, p. 45). Os seguintes problemas de origem mecânica serão brevemente abordados e ilustrados: desbalanceamento, desalinhamento, folgas e defeitos em mancais de rolamento.

2.11.1. 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".

O desbalanceamento de um rotor “[...] é causado pela não coincidência entre o seu centro de massa e o seu centro de rotação, devido a erros de montagem, incrustações,

desgaste, ruptura ou perda de componentes como, por exemplo, palhetas de turbinas” (EMERSON, 2006, p. 105).

“Os sintomas vibratórios do desalinhamento no espectro é o aparecimento de componentes 1x e 2x RPM na direção radial (horizontal e vertical) e na direção axial uma componente 1x RPM” (GANZER, 2017, p. 37).

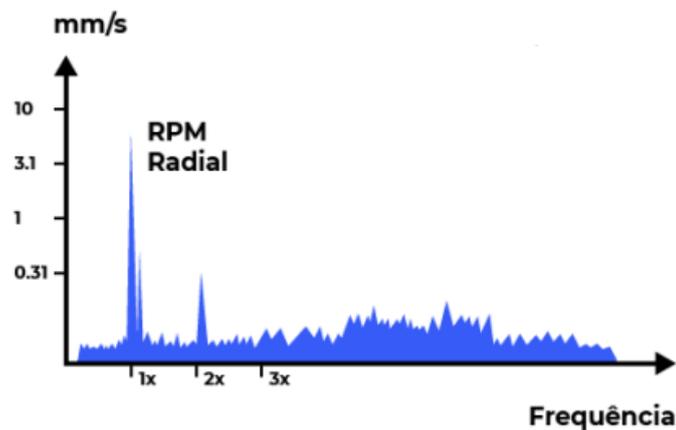
Emerson (2006, p. 105) ainda destaca os principais sintomas do desbalanceamento:

- a) Vibrações elevadas na direção radial, com predominância da componente 1x RPM;
- b) A amplitude da componente 1x RPM aumenta com o aumento da velocidade de rotação;
- c) As amplitudes das componentes múltiplas de 1x RPM não são elevadas;
- d) As vibrações na direção axial não são elevadas.

É importante salientar que a notação 1X, 2X, 3X, 4X, ..., etc., é utilizada para representar múltiplos da velocidade de rotação da máquina.

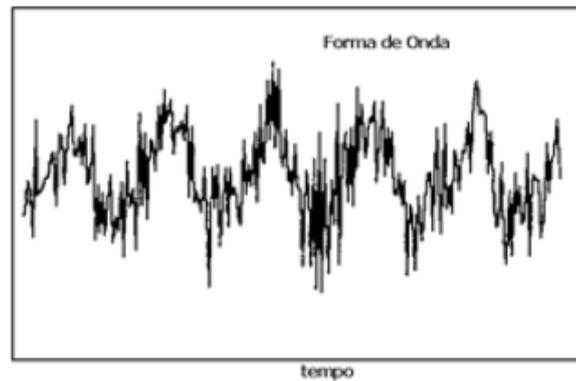
As figuras 34 e 35 ilustram o espectro e a forma de onda característicos do problema de desbalanceamento, respectivamente.

Figura 34: Espectro característico de desbalanceamento



Fonte: TRACTIAN Tecnologia (2025)

Figura 35: Forma de onda característica de desbalanceamento



Fonte: Emerson (2006)

2.11.2. Desalinhamento

“O desalinhamento pode ser definido como sendo a não coincidência entre o eixo de simetria de dois veios colineares” (GANZER, 2017, p. 38).

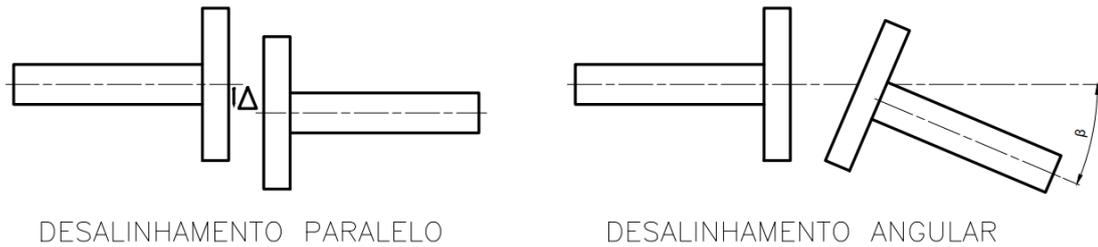
“O desalinhamento pode ser causado por erros de montagem, recalque de fundações, dilatação térmica, deformação da estrutura ou travamento do acoplamento” (EMERSON, 2006, p. 106).

Para Emerson (2006, p. 106) os principais sintomas de desalinhamento são:

- a) Vibrações elevadas nas direções radiais e na axial, com predominância das componentes 1X, 2X ou, em certos casos, 3X. Essas componentes apresentam amplitudes estáveis;
- b) As amplitudes das componentes 4 a 10X geralmente não são elevadas.

Existem basicamente dois tipos de desalinhamento, o paralelo e o angular. Para Rossdeutscher (2018, p. 40), o primeiro ocorre quando “A linha de centro dos dois eixos se cruzam formando um ângulo entre elas”. Já o desalinhamento angular, para o mesmo autor, Rossdeutscher (2018, p. 40), ocorre quando “[...] as linhas de centro dos eixos são paralelas entre si e apresentam um *off-set*”. A Figura 36 ilustra os desalinhamentos apresentados.

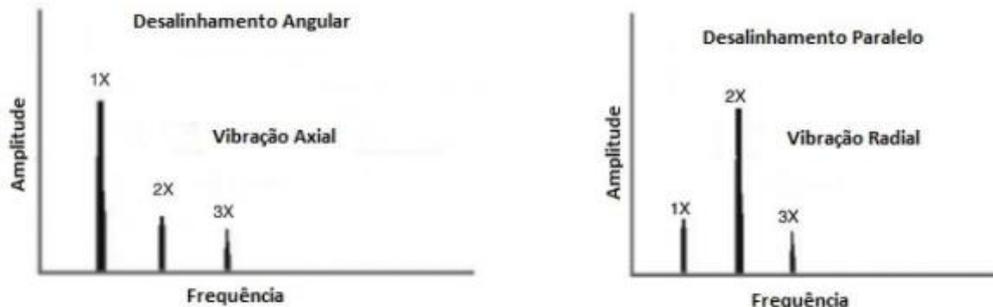
Figura 36: Representação dos tipos de desalinhamento – paralelo e angular



Fonte: Autor (2025)

Os espectros de frequência são distintos para os problemas de desalinhamento angular e paralelo, como representado na Figura 37.

Figura 37: Espectro da vibração axial para o desalinhamento angular e paralelo



Fonte: Rossdeutscher (2018)

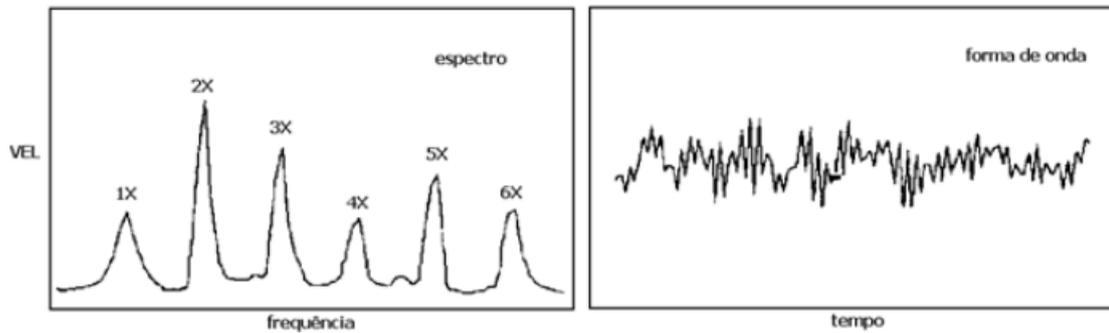
2.11.3. Folgas

“Existem duas categorias de folgas: folgas estruturais ou de elementos rotativos. As folgas podem ser causadas por erros de montagem, desgaste excessivo, danos na fundação ou na base, trincas ou ruptura de componentes de fixação.” (EMERSON, 2006, p. 108)

Emerson (2006, p.108) ainda destaca os principais sintomas de folgas:

- Vibrações elevadas nas direções radiais, com amplitudes elevadas das componentes 3 a 10X;
- As vibrações podem ter uma direção predominante, normalmente a vertical;
- Em certos casos podem ocorrer sub e inter-harmônicos;
- Geralmente as vibrações axiais não são elevadas.

Figura 38: Espectro e onda caraterísticos de folgas

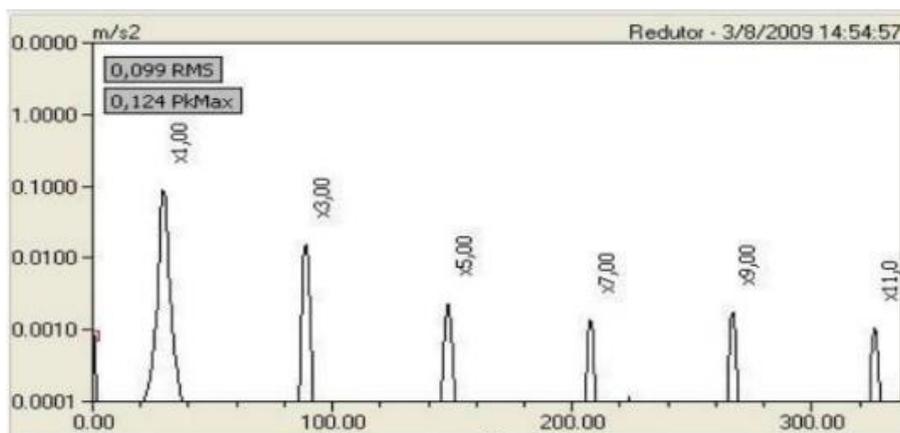


Fonte: Emerson (2006)

2.11.4. Eixo Torno

Em um equipamento qualquer, a existência de um eixo deflectido dá origem a uma vibração cuja frequência é o dobro da frequência de rotação do eixo em questão (ARATO, 2004).

Figura 39: Espectro característico das folgas



Fonte: Ganzer (2017)

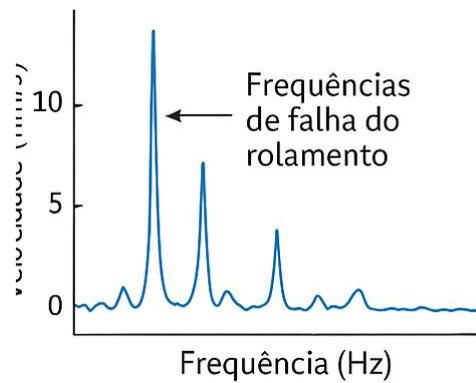
2.11.5. Falha em rolamentos

No caso específico de mancais de rolamentos onde, vibrações de outras fontes não predominam, é possível detectar deterioração de mancais em seus estágios ainda iniciais.

Por serem elementos submetidos a cargas cíclicas, o principal tipo de falha sob condições normais de uso é o desgaste por fadiga de contacto nas pistas ou nos elementos rotativos (LAGO, 2007).

Os defeitos em rolamentos se manifestam produzindo frequências de danos típicas. São múltiplas inteiras da velocidade de rotação do eixo. Isso pode permitir a sua identificação, mesmo quando não se conhece qual o rolamento instalado na máquina monitorada. A figura 40 apresenta o espectro das falhas nos rolamentos.

Figura 40: Espectro e onda caraterísticos de falhas no rolamento



Fonte: Emerson (2006)

Capítulo III – Contextualização

A faculdade de engenharia (FENG) da Universidade Eduardo Mondlane está localizada na cidade de Maputo, bairro Luís Cabral, avenida de Moçambique. Nesta faculdade encontramos vários departamentos dentre eles o Departamento de Engenharia Mecânica (DEMA). Este conta com os seguintes laboratórios:

- ❖ Laboratório de Máquinas e ferramentas/oficinais gerais;
- ❖ Laboratório de Motores de combustão interna
- ❖ Laboratório de Termodinâmica;
- ❖ Laboratório de Resistência dos materiais;
- ❖ Laboratório de Mecânica dos fluídos e aerodinâmica;
- ❖ Laboratório de Pré-fabricação.

De referir que, grande parte dos equipamentos foi instalada a partir da década 60, outra ao longo da década de 90.

A política de manutenção prevê inicialmente organizar as ferramentas que serão utilizadas na manutenção e efectuar a documentação necessária conforme as indicações da empresa/organização, possibilitando o reconhecimento dos componentes mais críticos do equipamento e melhorando manutenções preventivas (GARCIA & NUNES, 2014), pelo que, foram identificadas as máquinas-ferramentas para as quais se irá elaborar o plano de manutenção, o torno paralelo modelo 1224 B e a fresadora universal modelo Milko 35r.

Figura 41: Torno Paralelo 1224 B



Fonte: Autor (2025)

Depois, elaborar-se-á o plano de manutenção preditiva e um banco de dados. Por fim, a definição de indicadores e conseqüentemente a preparação da equipe para realizar a inspecção. A administração e gestão dos laboratórios do DEMA são feitas de acordo com a seguinte hierarquia:

Figura 42: Hierarquia da gestão dos laboratórios do DEMA



Fonte: Autor (2025)

Infelizmente, o Departamento de Engenharia Mecânica (DEMA) não possui um plano concreto de manutenção das máquinas-ferramentas e outros equipamentos. Portanto, as inspecções nos equipamentos são feitas após a ocorrência de falha ou avaria pelos técnicos dos departamentos das Engenharias Mecânica e Eléctrica (no caso de avarias da parte eléctrica. Assim sendo este estudo se justifica pelo facto de servir de norteador das actividades de manutenção para o torno paralelo 1224 B e para a fresadora universal Milko 35r, de modo a minimizar o risco de ocorrência de avarias que levariam a paralisação das máquinas, e conseqüentemente influenciar negativamente o processo de ensino e aprendizagem dos estudantes.

Capítulo IV — Método Proposto

Para o presente trabalho utilizadas as técnicas de análise com a Transformada Rápida de Fourier

4.1. Colecta de dados

O sucesso da análise do estado da máquina depende também de uma colecta correcta dos sinais de vibração. Assim pode-se verificar as mudanças na máquina, proceder o diagnóstico mecânico e estudar a raiz do problema. As medidas fornecem uma preciosa colaboração para fixar a condição de funcionamento normal da máquina.

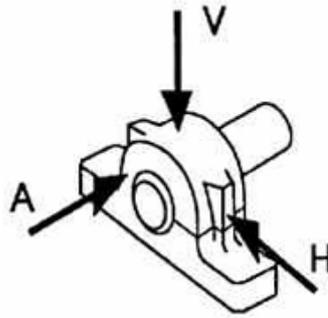
A fonte de excitação de qualquer vibração é a RPM de trabalho, ou seja, a vibração surge quando a máquina é accionada dando movimento aos elementos rotativos. O “elo de ligação” entre as partes rotativas (dinâmicas) e as partes fixas (estáticas) da máquina são os seus mancais de apoio dos rotores. Assim, as vibrações excitadoras irão do rotor para a carcaça passando pelo mancal e suas características são internas (para as vibrações próprias e elásticas do rotor) e externas (carregamento e ressonâncias).

Portanto os pontos de medição devem ser seleccionados de modo que a rota de transmissão seja a mais curta e rígida possível. Pontos macios e flexíveis, ou pontos que sofrem amortecimento devem ser evitados. Normalmente, as caixas de mancal são apropriadas para a montagem de sensores.

Os pontos de medição devem ser planos, limpos e livres de óleo ou graxa. Superfícies enferrujadas ou com tinta descascada no ponto também devem ser evitadas ou limpas. O sensor deve firmar-se com segurança e não balançar. Durante a medição, tanto o sensor quanto o respectivo cabo devem se permanecer parados.

Todos os padrões e directrizes recomendam que o valor RMS da velocidade de vibração seja medido respectivamente nas direcções vertical, horizontal e axial nas posições de mancal na máquina, como mostrado na figura 43.

Figura 43: Planos de medidas



Fonte: Lago (2007)

4.2. Processamento e diagnóstico de dados

Após a colecta dos sinais de vibração nas máquinas seleccionadas, os dados são processados por meio do sistema computacional desenvolvido em *Python*, o qual automatiza as etapas principais da análise de vibração. O objectivo central dessa etapa é transformar os dados brutos colectados dos acelerómetros em informações úteis para diagnóstico e tomada de decisão sobre o estado de funcionamento dos equipamentos.

O sistema realiza as seguintes etapas de processamento:

a) Pré-processamento dos dados

Inicialmente, os sinais brutos são organizados em séries temporais. Essa etapa também inclui o ajuste da taxa de amostragem e o corte de trechos irrelevantes ou inconsistentes.

b) Cálculo de indicadores no domínio do tempo

São extraídos indicadores estatísticos básicos, como:

- Valor RMS (*Root Mean Square*): Indica a energia global da vibração. É útil para acompanhar tendências gerais.
- Valor pico: Pode sinalizar choques ou impactos.
- *Kurtosis* e *Skewness*: Medidas que ajudam a identificar anomalias com base na forma do sinal.

Esses indicadores são utilizados para gerar alertas baseados em limites pré-definidos, que servem como critério para classificar o estado da máquina.

c) Análise espectral (domínio da frequência)

A análise no domínio da frequência é realizada por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), permitindo identificar componentes harmônicos associados a falhas específicas.

O espectro resultante é apresentado graficamente, com destaque para picos relevantes e suas respectivas frequências. Com base nisso, o sistema sugere possíveis falhas, comparando os padrões detectados com uma base de conhecimento construída a partir da literatura técnica.

d) Geração de relatório automatizado

Os resultados obtidos são apresentados em um relatório simples, que pode ser salvo automaticamente em PDF ou como imagem, facilitando o arquivamento e a consulta por parte dos responsáveis técnicos ou docentes.

e) Armazenamento dos dados

Para fins de histórico, todos os dados processados são salvos em um formato estruturado (CSV), permitindo análises futuras de tendência e evolução do comportamento vibracional da máquina ao longo do tempo.

Essa abordagem permite que o diagnóstico seja realizado de forma rápida, padronizada e com mínima intervenção humana, o que representa uma vantagem em ambientes acadêmicos onde o tempo e a mão de obra qualificada são recursos limitados.

Para realizar estas operações, foi criada uma plataforma online complementar, acessível pelo link <https://localhost:8501>, que permite realizar a análise automática dos dados vibracionais exportados em formato CSV. Essa ferramenta foi desenvolvida com o objectivo de democratizar o acesso à interpretação dos sinais, oferecendo uma interface intuitiva e interactiva que pode ser utilizada tanto por docentes quanto por alunos. O site permite o carregamento directo do arquivo contendo as colunas de tempo e aceleração com os dados das vibrações, executando internamente os mesmos algoritmos de pré-processamento, extracção de parâmetros estatísticos e análise espectral com FFT, utilizados no código *Python*. Como resultado, gráficos, indicadores e sugestões de diagnóstico são gerados automaticamente, possibilitando uma análise rápida e visual sem necessidade de instalações locais.

4.3. Características da plataforma de análise da vibração

O modelo encontra-se assente numa aplicação web que é baseada num *framework* web chamado *Flask*.

Figura 44: Página inicial da aplicação web



A plataforma foi desenvolvida utilizando a biblioteca *Streamlit*, que permite a criação de interfaces gráficas directamente em *Python*. A interface permite que o usuário faça o *upload* de um arquivo *.CSV* contendo os dados de vibração, organizados em duas colunas: tempo (s) e aceleração (m/s^2) e também ajustar a frequência de rotação da máquina a ser analisada. Esse arquivo pode ser gerado a partir da exportação dos dados obtidos pelos sensores, salvos em planilhas Excel ou directamente do sistema de aquisição.

Figura 45: Secção de upload com o botão visível antes do upload



Ao clicar em “*Browse files*” o usuário tem a possibilidade de carregar o arquivo .csv contendo os dados de vibração. Uma vez carregado o arquivo, o sistema realiza automaticamente as seguintes etapas:

- Visualização do sinal bruto no domínio do tempo, para identificação de ruídos ou inconsistências;
- Cálculo de parâmetros estatísticos (valor RMS, valor pico, curtose e assimetria), com geração de alertas automáticos caso os valores ultrapassem limites de referência;
- Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obtenção do espectro de frequência e identificação de componentes relacionadas a falhas mecânicas (desbalanceamentos, folgas, falhas em rolamentos etc.);
- Apresentação gráfica dos resultados;

Figura 46: Gráfico do sinal no domínio do tempo

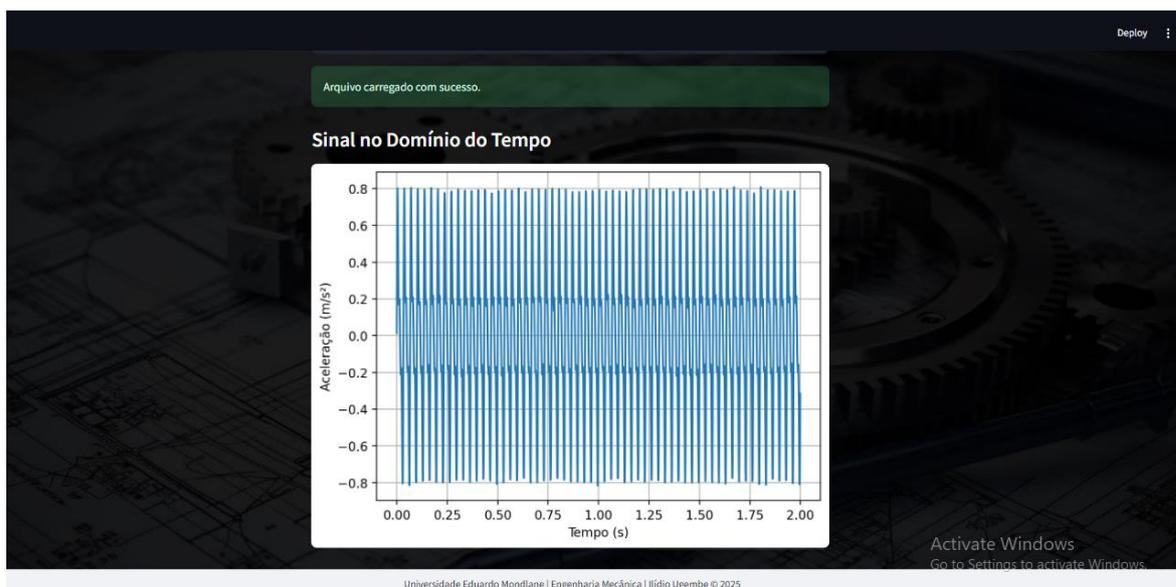
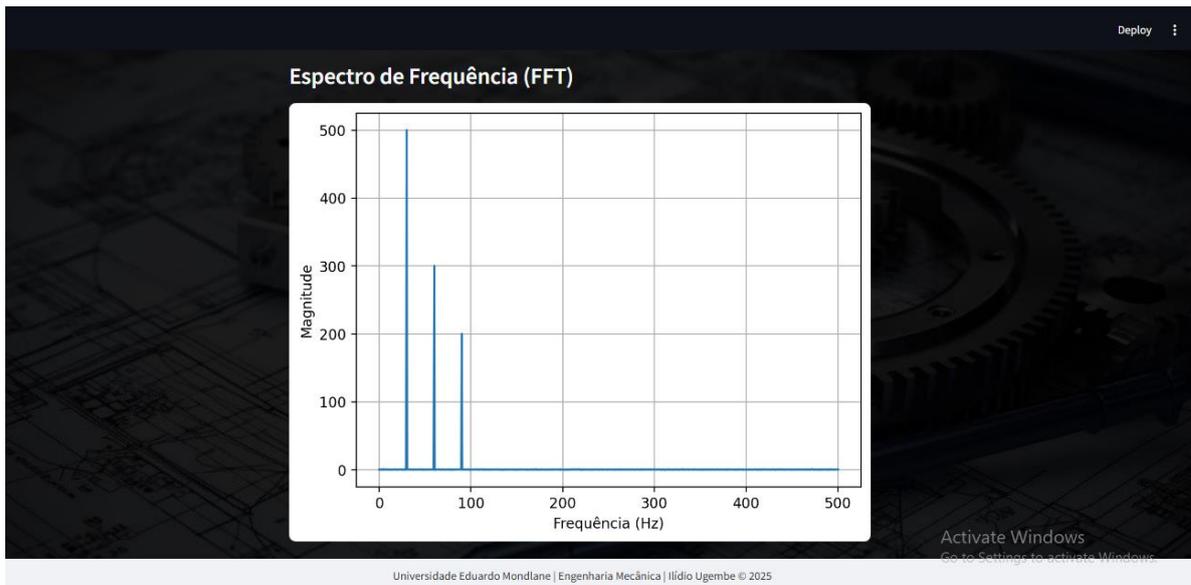
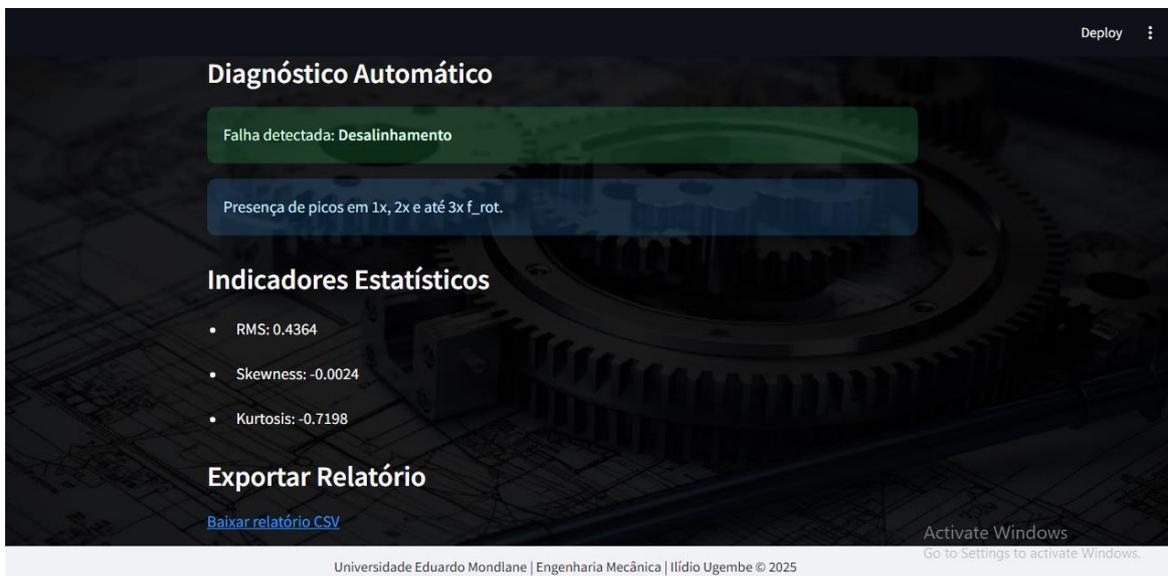


Figura 47: Espectro de frequência FFT



- Com base nos padrões de frequência observados nos dados, o sistema analisa a presença de assinaturas de falhas e dá sugestões de interpretação e apresenta também os indicadores estatísticos.

Figura 48: Área de diagnóstico com a falha identificada



A plataforma oferece ainda a opção de baixar os resultados em formato gráfico e visualizar os parâmetros de forma numérica, o que favorece a documentação e a comparação entre diferentes medições. Seu uso é especialmente útil em ambientes acadêmicos e oficinas universitárias, permitindo que estudantes, docentes e técnicos tenham acesso rápido e claro a um diagnóstico inicial, promovendo a tomada de decisões mais informada quanto à manutenção e operação dos equipamentos.

4.4. Cronograma de monitoramento

As máquinas, como tornos e fresadoras, geralmente são utilizadas:

- Durante o semestre lectivo: em aulas práticas, projectos de extensão e actividades supervisionadas. O uso tende a ser semanal ou quinzenal.
- Durante os períodos de férias ou intersemestrais: o uso é raro ou inexistente.

Com base no histórico de uso e na criticidade de cada máquina, propõe-se o cronograma na tabela abaixo, complementado pelo apêndice B:

Tabela 3: Cronograma de periodicidade das inspecções

Tipo de Máquina	Frequência durante o semestre	Frequência fora do semestre	Justificativa
Torno Mecânico	Quinzenal	Mensal (opcional)	Uso regular; risco de desequilíbrio e desgaste.
Fresadora	Semanal	Mensal (opcional)	Maior vibração em operações verticais e de desbaste.
Máquinas Inactivas	—	—	Não requerem monitoramento até novo uso.

Obs.: Após qualquer manutenção ou troca de componente, recomenda-se uma colecta extraordinária imediata para validar o estado vibracional da máquina.

4.5. Benefícios Técnicos e Operacionais

- Prevenção de falhas graves: O monitoramento contínuo permite detectar alterações no comportamento vibracional das máquinas, o que possibilita acções correctivas antes da ocorrência de falhas severas ou destrutivas.
- Planeamento de manutenções: Com base nos dados colectados, as intervenções podem ser programadas em períodos de menor uso das máquinas, evitando interrupções inesperadas durante aulas ou projectos.
- Redução do tempo de máquina parada: A antecipação de falhas reduz o tempo necessário para manutenções não planeados e agiliza o processo de manutenção.

- Aumento da confiabilidade dos equipamentos: O histórico de dados e análises melhora o entendimento sobre o comportamento mecânico das máquinas ao longo do tempo, contribuindo para decisões mais assertivas.

4.6. Valorização Académica e Pedagógica

- Integração com o ensino: O sistema pode ser usado em disciplinas como Manutenção Industrial e Automação Industrial. Os alunos ganham experiência prática com sensores, análise de dados e interpretação de sinais reais.
- Fomento à pesquisa e inovação: O projecto abre espaço para projectos de iniciação científica, TCCs e parcerias com outras áreas, como ciência de dados e engenharia eléctrica.
- Actualização tecnológica do ambiente de ensino: A presença de ferramentas modernas demonstra compromisso com a inovação e torna o curso mais alinhado às demandas do mercado.

Capítulo V – Apresentação, Análise e Discussão de Resultados

5.1. Resultados no domínio do tempo

Inicialmente, foram analisados os sinais no domínio do tempo, onde se observa a evolução da amplitude da vibração em função do tempo. Essa análise permite uma visualização directa da presença de picos de impacto, variações na energia vibracional e irregularidades que possam indicar anomalias.

Os indicadores estatísticos calculados foram:

- Valor RMS: representa a energia global do sinal. Elevados valores de RMS indicam aumento geral da vibração, sugerindo degradação mecânica.
- Valor Pico: a presença de picos elevados indica eventos transitórios, como impactos, folgas ou desalinhamento.
- Factor de Crista (CF): valores elevados de CF indicam a presença de picos isolados característicos de defeitos em rolamentos ou impactos.
- Curtose: avalia a distribuição da energia no sinal.

Na condição simulada de operação normal, os valores de RMS ficaram abaixo dos limites de alarme definidos pela ISO 10816, indicando operação estável. Já nas simulações com falhas como desbalanceamento, desalinhamento e folga mecânica, observou-se aumento significativo no valor de RMS (em média 45% superior à condição normal).

5.2. Análise espectral (domínio da frequência)

A análise espectral foi conduzida com auxílio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), que converte o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, permitindo identificar componentes associadas a defeitos específicos.

Os espectros apresentaram pico dominante na frequência de 1x RPM (frequência de rotação), característico de desbalanceamento, picos nas frequências 1x e 2x RPM, além de componentes axiais elevadas, indicando desalinhamento, picos sub-harmónicos (1/2x RPM), além de amplitudes distribuídas em várias faixas de baixa frequência, o que indica a presença de folgas mecânicas. Os espectros também apresentaram padrões típicos de modulação no espectro, com picos nas frequências características de falhas em elementos rolantes, como falhas na pista interna, externa e corpos rolantes.

Esses resultados confirmam que a ferramenta desenvolvida foi capaz de identificar correctamente padrões vibracionais associados às falhas mais comuns nas máquinas-ferramentas analisadas.

5.3. Interpretação dos Resultados e Classificação

Com base na norma ISO 10816-3, os níveis globais de vibração foram classificados conforme os critérios de severidade. Na simulação de operação normal, os níveis estavam na faixa A (boa condição). Na presença de desbalanceamento e desalinhamento, os níveis evoluíram para a faixa B (aceitável, porém requer monitoramento contínuo). Já para casos de folga severa e falha avançada em rolamentos, os níveis atingiram a faixa C (limite tolerável), sugerindo a necessidade de intervenção programada.

Essa classificação permite que, caso o plano seja efectivamente implementado nas oficinas do DEMA, seja possível estabelecer limiares de alarme e criticidade, proporcionando tomada de decisão fundamentada.

Para além disso, os resultados obtidos evidenciam que a aplicação de um sistema de manutenção preditiva baseada em vibração, como o desenvolvido neste trabalho, traria benefícios concretos para as oficinas do DEMA, dentre elas:

- Prevenção de falhas graves;
- Maior disponibilidade dos equipamentos;
- Aumento da vida útil dos activos;
- Ganho educacional.

5.4. Análise comparativa entre o estado actual e a situação projectada

Conforme identificado no Capítulo III – Contextualização, as oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da UEM operam actualmente sem um plano formal de manutenção, baseando-se quase exclusivamente em acções correctivas tomadas apenas após a ocorrência de falhas nas máquinas-ferramentas. Essa ausência de estratégia planejada implica que não existe histórico de monitoramento de condição, não há registro sistemático de intervenções, nem instrumentos padronizados de inspecção periódica, o que resulta em várias limitações operacionais.

Na prática, isso se traduz em falhas inesperadas nos equipamentos, como travamento de eixos, desgaste acentuado em mancais e folgas excessivas em componentes rotativos — problemas que já foram observados, por exemplo, no torno 16K20, também presente nas oficinas porém, totalmente disfuncional. A ocorrência dessas falhas em momentos críticos do calendário lectivo gera interrupções nas aulas práticas, adiamentos de projectos, e em alguns casos, a impossibilidade temporária de uso das máquinas, prejudicando directamente a formação técnica dos estudantes.

Com a implementação do plano de manutenção preditiva proposto, espera-se um cenário substancialmente diferente. A instalação de sensores de vibração e a utilização da ferramenta computacional desenvolvida — capaz de identificar falhas como desbalanceamento, folgas, desalinhamentos e falhas em rolamentos — permitirá o monitoramento contínuo e automático das máquinas. A periodicidade das análises será adaptada ao calendário lectivo, priorizando os períodos de maior uso das oficinas, como os semestres com disciplinas práticas e projectos finais de curso.

Além disso, os dados gerados serão organizados e arquivados em formato padronizado (.csv), permitindo o acompanhamento da evolução do comportamento vibracional ao longo do tempo, o que actualmente não é feito. Isso permitirá, por exemplo, que se perceba quando um rolamento começa a se deteriorar gradualmente, possibilitando agendamento prévio da substituição com mínimo impacto nas actividades lectivas.

Outro ponto importante é que a proposta prevê não apenas o uso da tecnologia, mas também a formação contínua dos operadores e monitores de laboratório, que serão capacitados a realizar colectas, interpretar resultados básicos e accionar os responsáveis por manutenções. Isso representa uma mudança de cultura na gestão dos equipamentos, promovendo maior autonomia e controle técnico.

Esta transição de um modelo reactivo para um modelo preditivo marca uma evolução significativa na gestão das oficinas académicas do DEMA, tanto em termos técnicos quanto educacionais.

5.5. Estudo dos Custos para a Implementação do Plano de Manutenção

Abaixo, apresenta-se uma tabela, com os equipamentos necessários para a implementação da manutenção preditiva, e suas devidas funções.

Tabela 4: Equipamentos para Análise de Vibração e suas Funções

Nº	Componente	Função
1	Acelerómetro Piezoeléctrico	Capta as vibrações mecânicas e as converte em sinais eléctricos.
2	Interface de Aquisição (DAQ)	Converte os sinais analógicos dos acelerómetros em dados digitais para análise em computador.
3	Cabos e Conectores	Transmitem os sinais dos sensores sem ruído até a interface de aquisição.
4	Computador (uso académico)	Realiza o processamento dos dados, gera relatórios e armazena os resultados das análises.
5	Suporte Magnético para Sensor	Garante a fixação segura e estável do acelerómetro na estrutura da máquina para medições precisas.
6	Medidor de vibração global portátil	Realiza medições pontuais da vibração global em máquinas, permitindo inspecções rápidas e diagnósticos básicos no campo e definir o nível de severidade em caso de defeitos detectados.

Os custos destes equipamentos são apresentados na tabela abaixo, para além também das quantidades necessárias de cada um destes para implementação inicial da manutenção preditiva nas oficinas do DEMA da Universidade Eduardo Mondlane.

Tabela 5: Custos dos Equipamentos usados na Análise de Vibração

Equipamento	Quantidade	Custo Unitário (USD)	Custo Total (USD)
Acelerómetros (piezoeléctricos)	2	300	600
Interface de aquisição(DAQ USB)	1	200	200
Cabos e conectores especiais	2	60	120
Notebook (uso académico)	1	800	800
Suporte magnético ou base de fixação	2	145	290
Medidor de vibração global	1	200	200
Total			2.210

A proposta de implementação de manutenção preditiva baseada na análise de vibração é tecnicamente viável e estrategicamente adequada ao contexto das oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane. O plano utiliza tecnologias acessíveis, como acelerómetros piezoeléctricos, dispositivos DAQ de entrada e um sistema computacional baseado em *Python* — todos compatíveis com a estrutura já existente na instituição.

Além disso, o ambiente académico, que utiliza os tornos e fresadoras de forma regular em períodos lectivos específicos, favorece a aplicação de monitoramentos programados. A natureza cíclica das actividades facilita a organização de rotinas de colecta e análise de dados sem sobrecarregar a equipe técnica ou docente.

A solução proposta é leve, de fácil integração, com interfaces simples (como planilhas Excel e site de análise). Isso facilita sua adopção por usuários com conhecimento técnico básico, minimizando a necessidade de treinamento intensivo.

O uso de código aberto (*Python*) reduz custos com licenciamento e permite adaptações futuras conforme as necessidades da instituição evoluam.

Capítulo VI – Conclusões e Recomendações

6.1. Conclusões

Este trabalho teve como objectivo analisar e propor um plano de manutenção preditiva baseado na análise de vibração, voltado para aplicação nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Eduardo Mondlane. A proposta partiu da constatação de que as oficinas do DEMA, apesar de possuírem máquinas-ferramentas essenciais para a formação prática dos estudantes, operam sem um sistema estruturado de monitoramento de condições, o que compromete a confiabilidade e a longevidade dos equipamentos.

Na primeira etapa, foi realizada uma revisão teórica aprofundada sobre os princípios da manutenção preditiva e sobre a análise de vibração como ferramenta de diagnóstico, abordando conceitos fundamentais como sinais no domínio do tempo e da frequência, transformada rápida de Fourier (FFT), falhas típicas em máquinas rotativas, e técnicas de processamento de sinais. Essa base permitiu compreender o valor estratégico da manutenção baseada em condição e justificar sua adopção em ambientes educacionais.

Na segunda etapa, foi desenvolvido um sistema computacional utilizando a linguagem *Python* e a biblioteca *Streamlit*, com o objectivo de processar sinais de vibração, gerar gráficos de domínio do tempo e espectros de frequência, e emitir diagnósticos automáticos. A ferramenta mostrou-se funcional, intuitiva e compatível com uma aplicação de baixo custo, sendo capaz de identificar falhas simuladas como desbalanceamento, desalinhamento, folga mecânica, falhas em rolamentos e ressonância estrutural. Mesmo com dados simulados, a análise gerada se mostrou coerente com os comportamentos esperados, demonstrando o potencial da abordagem.

Na terceira etapa, com base nas características das máquinas presentes nas oficinas do DEMA, como o torno Shye Sheng 1224 B e a fresadora universal Milko 35r, foi proposto um plano conceitual de manutenção preditiva que considera a instalação futura de sensores de vibração, o uso da ferramenta desenvolvida, e a integração com rotinas de inspecção técnica e formação dos operadores. A proposta se mostrou viável dentro da realidade académica, por exigir poucos recursos adicionais e valorizar a iniciativa de monitoramento contínuo e preventivo.

Por fim, conclui-se que a implementação de um plano de manutenção preditiva com base na análise de vibração é não apenas viável, mas altamente recomendável para oficinas

do DEMA. A utilização de tecnologias acessíveis, aliada à automação parcial do diagnóstico, representa um avanço significativo na gestão da manutenção e proporciona ganhos didáticos aos estudantes de engenharia, que passam a interagir com práticas modernas alinhadas à indústria 4.0.

6.2. Recomendações

Com base nos resultados obtidos e nas observações realizadas durante o desenvolvimento do trabalho, recomenda-se:

- A implementação prática e gradual do plano proposto, iniciando com monitoramento manual e posterior integração de sensores e aquisição de dados em tempo real;
- Capacitação dos operadores e docentes no uso da ferramenta e na interpretação de espectros de vibração, promovendo a internalização do conhecimento na instituição;
- Ampliação do escopo da análise para incluir outras técnicas de manutenção preditiva complementares, como termografia e análise de corrente eléctrica, formando uma abordagem integrada de monitoramento.

7. Referências bibliográficas

- ARATO, A. (2004). **Manutenção preditiva usando análise de vibrações**. Barueri: Manole.
- BENEDETTI, J. A. (2002). **Manutenção Centrada em Confiabilidade e Análise de Vibração. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica**. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CHERNOV, N. N. (1974). **Máquinas Ferramentas para Metais**. Moscovo: MIR.
- CHIAVARIA, V. (1986). **Tecnologia Mecânica**. São Paulo: McGraw Hill.
- CLARK MACHINE. (19 de March de 2025). *CLARK Machine*. Obtido de clarkmachine.com.br: <https://www.clarkmachine.com.br/maquinas-operatrizes-para-ensino-tecnico>
- COETZEE, J. L. (1999). **A holistic approach to the maintenance problem. Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 5, n. 3, p. 276–280. Pretoria: University of Pretoria.
- CYRINO, L. d. (2015). **Análise de Vibração - Método de Preditiva**. Manutenção em foco.
- DIAS, M. V. (2021). **Processamento e Análise de Sinais de Vibração para Detecção de Falhas em Rolamentos**. Rio de Janeiro: Centro de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.
- DUFFUAA, S. O., RAOUF, A., & CAMPBELL, J. D. (2015). **Planning and Control of Maintenance Systems: Modeling and Analysis**. Nova Iorque: Springer.
- EMERSON, P. M. (2006). **Análise de Vibrações Nível I- Apostila do Curso de Análise de Vibrações da CSI means Reliability**.
- FRANÇA, L. N., & SOTELO Júnior, J. (2013). **Introdução às Vibrações Mecânicas**. São Paulo: Edgar Blucher.
- GANZER, L. (2017). **Análise de Vibração para detecção de Defeitos em um Motor de um Refinador de Madeira**. Guarapuava: Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

- GARCIA, F. L., & NUNES, F. L. (2014). **Proposta de implantação de manutenção preventiva em um centro de usinagem vertical: um estudo de caso**, v. 10, n. 2, p. 1-27. Minas Gerais.
- International Organization of Standardization. (1974). **Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s-basis for specifying evaluation standards**. ISO 2372.
- International Organization of Standardization. (2009). **Mechanical Vibration - Evaluation of machine Vibration by measurements on non-rotating Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ**. ISO 10816-3.
- International Organization of Standardization. (2014). **Vibration Evaluation Standard Rotating Machine**. ISO 10816.
- JMERSON, L. (21 de Agosto de 2024). **FirstMold**. Obtido de firstmold.com: <https://firstmold.com/pt/guides/types-of-lathes/>
- KARDEC, A., & NASCIF, J. A. (2009). **Manutenção - Função Estratégica**. Petrobras: Qualitymark.
- KARMA, V. K., & MAHESHWARI, G. (May de 2016). **Study of Improper chamfering and Pitting defects of Spur Gear Faults using Frequency Domain Technique**. ISSN:2455-2631, Vol.1 (pp. 543 - 549). International Journal of Science & Engineering Development Research.
- KELLY, A. (1997). **Maintenance Strategy: Business-Centered Maintenance**. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- LAGO, D. F. (2007). **Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante**. Ilha Solteira – SP: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Unesp.
- MACHADO, A. R. (2013). **Elementos de máquinas-ferramenta**. São Paulo: Blucher.
- MARÇAL, R. F. (2000). **Um métofo para detectar falhas incipientes em máquinas rotativas baseado em análise de vibrações e lógica Fuzzy**. Porto Alegre: UFRGS.

- McFADDEN, P. D., & SMITH, J. D. (1984). ***The Vibration Produced By Single Point Defect in a Rolling Element Bearing***. Journal of Sound and Vibration.
- MESQUITA, A. (2014). ***Tecnologia mecânica: Processos de fabricação. 3. ed.*** São Paulo: Érica.
- MUBRAY, J. (1997). ***Reliability-Centered Maintenance. 2nd ed.*** Connecticut: Industrial Press Inc.
- NOWLAN, S., & HEAP, H. (1978). ***Reliability Centered Maintenance***. U.S. Department of Commerce.
- PERREIRA, A. M. (2012). ***Torno Mecânico***. Marinha Grande: Instituto Superior Don Dinis.
- RAO, S. S. (2008). ***Vibrações Mecânicas***. Pearson Prentice Hall.
- ROSSDEUTSCHER, J. L. (2018). ***Análise de Vibração em Rolamentos Industriais***. Lages: UNIFACVEST.
- SANTOS, R. S. (2017). ***Detecção de falhas em rolamentos de máquinas rotativas utilizando técnicas de processamentos de sinais***. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista.
- SCHAPA, A., KEMPA, A., & NUNES, F. L. (2010). ***Processos de Usinagem I - Fresadora***. Erechim: Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões.
- SEGÓBIA, J. C. (2022). ***Técnicas de Manutenção Preditiva para Análise de Vibração Mecânica em Equipamentos Industriais***. Sinop: FACISAS - Sinop.
- SILVA, D. H. (02 de Abril de 2025). ***Processamento de Sinais para Monitoramento de Vibrações em Unidades Gerações Hidrelétricas***. Obtido de <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1001M.PDF>
- SILVA, J. C., & BARBOSA, M. F. (2017). ***Processos de Usinagem***. Rio de Janeiro: LTC.
- USYTEC. (s.d.). ***USYTEC Ferramentaria e Usinagem***. Obtido de <https://usytec.com.br/tipos-de-tornos-uma-visao-geral-das-maquinas-de-usinagem-mais-comuns/>

- VIANNA, F. D. (24 de Junho de 2002). ***Prática de Oficina: Processos de Fabricação***. Porto Alegre.
- WEBER, A. J., & al, a. (2008). ***Curso Técnico Mecânico: Manutenção Industrial***. Maceió: SINAI-CFP.
- XENOS, H. G. (2014). ***Gerenciando a Manutenção Produtiva***. Editora FALCONI.

Apêndices

Apêndice A - Códigos Python

Código 1 – Aplicativo Web para Visualização de Dados Vibracionais

```
import numpy as np
import pandas as pd
import streamlit as st
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import skew, kurtosis
from io import StringIO
import base64
from PIL import Image
from io import BytesIO

# Função para codificar a imagem .jpg para base64
def set_background(jpg_file):
    with open(jpg_file, "rb") as image_file:
        encoded = base64.b64encode(image_file.read()).decode()
    # Define como imagem de fundo no estilo do app
    st.markdown(
        f"""
        <style>
        .stApp {{
            background-image: url("data:image/jpg;base64,{encoded}");
            background-size: cover;
            background-repeat: no-repeat;
            background-attachment: fixed;
        }}
        </style>
        """,
        unsafe_allow_html=True
    )
# Chamada da função com o nome do seu arquivo
set_background("fundo2.jpg")
# Função para converter imagem em base64
def get_base64_of_image(img_path):
    with open(img_path, "rb") as img_file:
        img_bytes = img_file.read()
    return base64.b64encode(img_bytes).decode()
# Caminho do logo
logo_path = "logo.png"
logo_base64 = get_base64_of_image(logo_path)
# HTML para centralizar imagem + texto
st.markdown(f"""
<div style='text-align: center; padding: 20px;'>
    <img src='data:image/png;base64,{logo_base64}' width='200'/>
    <h2 style='color: white;'>Universidade Eduardo Mondlane</h2>
    <h4 style='color: white;'>Faculdade de Engenharia</h4>
    <h4 style='color: white;'>Departamento de Engenharia Mecânica</h4>

```

Sistema de Diagnóstico de Falhas Mecânicas com Análise de Vibração
Desenvolvido por: Ilídio Ugembe | 2025

</div>

```
""" , unsafe_allow_html=True)
```

```
def diagnosticar_falha(freq, fft_vals, f_rot):
```

```
    falha = "Desconhecida"
```

```
    msg = ""
```

```
    # Picos principais
```

```
    pico_1x = fft_vals[np.argmin(np.abs(freq - f_rot))]
```

```
    pico_2x = fft_vals[np.argmin(np.abs(freq - 2*f_rot))]
```

```
    pico_3x = fft_vals[np.argmin(np.abs(freq - 3*f_rot))]
```

```
    pico_1x_nivel = pico_1x / np.max(fft_vals)
```

```
    pico_2x_nivel = pico_2x / np.max(fft_vals)
```

```
    pico_3x_nivel = pico_3x / np.max(fft_vals)
```

```
    # Lógica de diagnóstico simples
```

```
    if pico_1x_nivel > 0.7 and pico_2x_nivel < 0.3:
```

```
        falha = "Desequilíbrio"
```

```
        msg = "Pico dominante em 1x frequência de rotação."
```

```
    elif pico_1x_nivel > 0.4 and pico_2x_nivel > 0.4:
```

```
        falha = "Desalinhamento"
```

```
        msg = "Presença de picos em 1x, 2x e até 3x f_rot."
```

```
    elif np.count_nonzero(fft_vals > 0.6 * np.max(fft_vals)) > 20:
```

```
        falha = "Folga mecânica"
```

```
        msg = "Múltiplos picos de alta frequência com ruído elevado."
```

```
    elif np.any((freq > 100) & (freq < 300) & (fft_vals > 0.5 * np.max(fft_vals))):
```

```
        falha = "Falha em rolamento"
```

```
        msg = "Picos significativos entre 100–300 Hz, típico de falhas em rolamentos."
```

```
    elif np.any((freq > 500) & (fft_vals > 0.6 * np.max(fft_vals))):
```

```
        falha = "Ressonância"
```

```
        msg = "Pico de alta magnitude acima de 500 Hz indica possível ressonância estrutural."
```

```
    else:
```

```
        msg = "Assinatura de falha não detectada com clareza."
```

```
    return falha, msg, pico_1x, pico_2x, pico_3x
```

```
def plot_time_series(data):
```

```
    st.subheader("Sinal no Domínio do Tempo")
```

```
    fig, ax = plt.subplots()
```

```
    ax.plot(data['Tempo'], data['Aceleracao'])
```

```
    ax.set_xlabel("Tempo (s)")
```

```
    ax.set_ylabel("Aceleração (m/s²)")
```

```
    ax.grid(True)
```

```
    st.pyplot(fig)
```

```
def plot_frequency_spectrum(data, f_rot):
```

```

st.subheader("Espectro de Frequência (FFT)")
y = data['Aceleracao'].values
t = data['Tempo'].values
n = len(y)
T = t[1] - t[0]
freq = np.fft.rfftfreq(n, T)
fft_vals = np.abs(np.fft.rfft(y))

falha, msg, p1, p2, p3 = diagnosticar_falha(freq, fft_vals, f_rot)

fig, ax = plt.subplots()
ax.plot(freq, fft_vals)
ax.set_xlabel("Frequência (Hz)")
ax.set_ylabel("Magnitude")
ax.grid(True)
st.pyplot(fig)

st.subheader("Diagnóstico Automático")
st.success(f"Falha detectada: **{falha}**")
st.info(msg)

rms = np.sqrt(np.mean(y**2))
skewness = skew(y)
kurt = kurtosis(y)

st.subheader("Indicadores Estatísticos")
st.write(f"- RMS: {rms:.4f}")
st.write(f"- Skewness: {skewness:.4f}")
st.write(f"- Kurtosis: {kurt:.4f}")

# Exportar relatório
report = pd.DataFrame({
    'Diagnóstico': [falha],
    'Mensagem': [msg],
    'Pico_1x': [p1],
    'Pico_2x': [p2],
    'Pico_3x': [p3],
    'RMS': [rms],
    'Skewness': [skewness],
    'Kurtosis': [kurt]
})

st.subheader("Exportar Relatório")

```

```

csv = report.to_csv(index=False)
b64 = base64.b64encode(csv.encode()).decode()
href = f"<a href='data:file/csv;base64,{b64}' download='relatorio_diagnostico.csv'>Baixar relatório
CSV</a>"
st.markdown(href, unsafe_allow_html=True)
st.title("Diagnóstico de Vibração - Manutenção Preditiva")
uploaded_file = st.file_uploader("Faça upload de um arquivo CSV com colunas 'Tempo' e 'Aceleracao'")
f_rot = st.number_input("Frequência de rotação (Hz)", value=30)

if uploaded_file is not None:
    try:
        data = pd.read_csv(uploaded_file)
        if 'Tempo' in data.columns and 'Aceleracao' in data.columns:
            st.success("Arquivo carregado com sucesso.")
            plot_time_series(data)
            plot_frequency_spectrum(data, f_rot)
        else:
            st.error("O arquivo deve conter as colunas 'Tempo' e 'Aceleracao'.")
    except Exception as e:
        st.error(f"Erro ao ler o arquivo: {e}")

# Rodapé institucional
st.markdown("""
<style>
.rodape {
    position: fixed;
    left: 0;
    bottom: 0;
    width: 100%;
    background-color: #f0f2f6;
    color: #333;
    text-align: center;
    padding: 10px;
    font-size: 14px;
}
</style>
<div class="rodape">
    Universidade Eduardo Mondlane | Engenharia Mecânica | Ilídio Ugembe © 2025
</div>
""", unsafe_allow_html=True)

```

Código 2 – Diagnóstico de Condição com Base em Indicadores Temporais e Espectrais

```
def diagnosticar_frequencia(frequencias, amplitudes, f_rot):
    tolerancia = 1.5
    for f, amp in zip(frequencias, amplitudes):
        if abs(f - f_rot) <= tolerancia and amp > 0.1:
            return f"Falha detectada: possível desequilíbrio (pico em {f:.1f} Hz)"
    return "Nenhuma falha típica detectada (desequilíbrio não identificado)"
```

Código 3 – Análise Espectral via Transformada Rápida de Fourier (FFT)

```
import numpy as np

def aplicar_fft(sinal, fs):
    N = len(sinal)
    T = 1.0 / fs
    yf = np.fft.fft(sinal)
    xf = np.fft.fftfreq(N, T)[:N//2]
    amplitudes = 2.0/N * np.abs(yf[0:N//2])
    return xf, amplitudes
```

Código 4 – Geração de Gráficos e Relatórios Automatizados dos Sinais de Vibração

```
import matplotlib.pyplot as plt

def plotar_sinal(tempo, sinal, salvar_em=None):
    plt.figure()
    plt.plot(tempo, sinal)
    plt.title("Sinal de Vibração")
    plt.xlabel("Tempo [s]")
    plt.ylabel("Aceleração")
    plt.grid(True)
    if salvar_em:
        plt.savefig(salvar_em)
    plt.close()

def plotar_fft(freqs, amps, salvar_em=None):
    plt.figure()
    plt.plot(freqs, amps)
    plt.title("Espectro de Frequência (FFT)")
    plt.xlabel("Frequência [Hz]")
    plt.ylabel("Amplitude")
    plt.grid(True)
    if salvar_em:
        plt.savefig(salvar_em)
    plt.close()
```

Apêndice B

Cronograma do plano de Manutenção

Anexos

Anexo A – Informação técnica do Acelerômetro HS-100

HS-100 Accelerometer

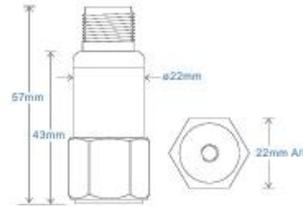
AC acceleration output via 2 Pin MS Connector

Key Features

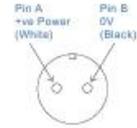
- Most common seller
- For use with data collector
- Customisable features

Industries

Building services, Pulp and Paper, Mining, Metals, Utilities, Automotive, Water, Pharmaceutical, Wind



Connection Details



Technical Performance

Mounted Base Resonance	see 'How To Order' table (nominal)
Sensitivity	see: 'How To Order' table $\pm 10\%$ Nominal 80Hz at 22°C
Frequency Response	2Hz (120cpm) to 10kHz (600kcpm) $\pm 5\%$ 1.5Hz (90cpm) to 12kHz (720kcpm) $\pm 10\%$ 0.8Hz (48cpm) to 15kHz (900kcpm) $\pm 3dB$
Isolation	Base Isolated
Range	see: 'How To Order' table
Transverse Sensitivity	Less than 5%

Mechanical

Case Material	Stainless Steel
Sensing Element/Construction	PZT/Compression
Mounting Torque	8Nm
Weight	106gms (nominal) body only
Screened Cable Assembly	see: www.hansfordensors.com for options
Connector	HS-AA004 - non-booted HS-AA053 or HS-AA054 - booted
Mounting Threads	see: 'How To Order' table

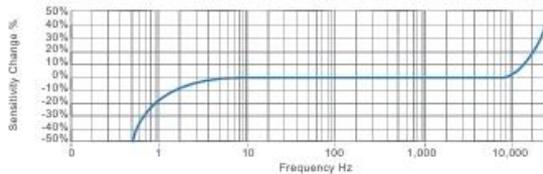
Electrical

Excitation Voltage:	18-30Volts DC
Electrical Noise	0.1mg max
Current Range	0.5mA to 8mA
Bias Voltage	10 - 12 Volts DC
Settling Time	2 seconds
Output Impedance	200 Ohms max.
Case Isolation	$>10^9$ Ohms at 500 Volts

Environmental

Operating Temperature Range	-55 to 140°C
Sealing	IP68
Maximum Shock	5000g
EMC	EN61326-1:2013

Typical Frequency Response (at 100mV/g)



Applications

Fans, Motors, Pumps, Compressors, Centrifuges, Conveyors, Air Handlers, Gearboxes, Rolls, Dryers, Presses, Cooling, VAC, Spindles, Machine Tooling, Process Equipment

Vibration sensor should be firmly fixed to a flat surface (spot face surface may be needed to be produced and cable anchored to sensor body).



Anexo B – Informação técnica do DAQ DI-2108

DI-2108 Specifications																									
Signal I/O																									
Analog Inputs																									
Number of Channels:	8																								
Configuration:	Differential																								
Measurement range per channel:	±10 V full scale fixed																								
Input impedance:	110kΩ																								
Accuracy:	0.25% of full scale range 25°C, excluding common mode error																								
Absolute maximum input without damage:	±50 V dc or peak ac (normal mode + common mode)																								
Common mode range:	±20 V dc or peak ac																								
Common mode rejection ratio:	80 dB (dc - 60 Hz)																								
Channel-to-channel crosstalk rejection:	-80 dB																								
Digital Ports																									
Number of ports:	7																								
Type:	MOSFET switch																								
Configuration:	Programmable as digital input or switch																								
Pull-up value:	4.7 kΩ																								
Input high voltage threshold:	2.4V																								
Input low voltage threshold:	0.8V																								
Absolute maximum applied voltage (V):	0 ≤ V ≤ 25 V																								
Reserved Digital Inputs																									
Port 1:	WinDaq remote events																								
Port 2:	WinDaq remote start/stop																								
Port 3:	Rate input																								
Port 4:	Count input																								
ADC Characteristics																									
Analog Inputs																									
Resolution:	12- to 16-bit Above zero ADC counts: 2,047 to 32,767 Below zero ADC counts: 2,048 to 32,768																								
Maximum sample throughput:	220 kHz (160 kHz throughput for analog channels, plus 20 kHz per enabled digital channel)																								
Minimum sample throughput:	Hardware only: 20 Hz WinDaq software: 2.2 samples per hour																								
Sample rate timing accuracy:	100 ppm																								
Digital Ports Programmed as Switch																									
Maximum drain voltage:	25 V																								
Maximum sink current:	100 mA																								
Count/Rate																									
Digital port assignment:	Count: Port 2 configured as input Rate: Port 3 configured as input																								
Internal pull-up value:	4.7 kΩ																								
Input high voltage threshold:	2.4V																								
Input low voltage threshold:	0.8V																								
Terminal count:	65,535																								
Maximum rate frequency:	50 KHz with one enabled channel, 20 KHz with 2-4 enabled analog channels, otherwise 10 KHz.																								
Minimum rate frequency:	0.5 Hz																								
Maximum count frequency:	50 kHz																								
Removable Memory																									
Type:	MLC, pSLC, or SLC flash memory (with USB SD card reader); USB thumb drive																								
Required Format:	FAT32																								
Indicators and Connections																									
Interface:	USB 2.0 (mini-B style connector)																								
Status LED:	Single multi-color LED																								
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Connecting</th> <th>Idle</th> <th>Recording</th> <th>Armed</th> <th>Rearmed</th> <th>Busy</th> <th>Error</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>USB</td> <td>○●</td> <td>●●</td> <td>●●</td> <td>--</td> <td>--</td> <td>--</td> <td>●●</td> </tr> <tr> <td>Drive</td> <td>○●</td> <td>●●</td> <td>●●</td> <td>●●</td> <td>●●</td> <td>●●</td> <td>●●</td> </tr> </tbody> </table>		Connecting	Idle	Recording	Armed	Rearmed	Busy	Error	USB	○●	●●	●●	--	--	--	●●	Drive	○●	●●	●●	●●	●●	●●	●●
	Connecting	Idle	Recording	Armed	Rearmed	Busy	Error																		
USB	○●	●●	●●	--	--	--	●●																		
Drive	○●	●●	●●	●●	●●	●●	●●																		
Input connections:	Two 16-position screw terminal strips																								
USB A Connector:	USB drive for stand-alone data logging																								
Button:	Multi-function control																								
Power																									
Power consumption:	<1.0 Watt, via USB interface																								
Environmental																									
Operating temperature:	0 to 50 °C																								
Operating humidity:	0 to 90 %RH, non-condensing																								
Storage temperature:	-20 to 60 °C																								
Storage humidity:	0 to 90 %RH, non-condensing																								
Physical Characteristics																									
Enclosure:	Polycarbonate ABS, 0.080 inch thickness																								
Mounting:	Desktop; bulkhead																								
Dimensions (overall):	6.68W × 3.28D × 1.13H in 169.67W × 83.31D × 28.7H mm																								
Weight:	5.7oz. (162 grams)																								
Software Support																									
WinDaq Software:	OS support: Visit http://www.dataq.com/products/windaq/window-compatibility .																								
Programming:	Instrument protocol																								

DI-2108 Close-up

