



**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e  
Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)  
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)  
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)**

**Dissertação**

**DETECÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE TAMBORES DE  
TRANSPORTADORES DE CORREIA POR MEIO DE ACELERÔMETROS E  
APRENDIZADO DE MÁQUINA**

**Yves Carvalho**

**Ouro Preto  
Minas Gerais, Brasil  
2022**

**Yves Carvalho**

**DETECÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE TAMBORES DE  
TRANSPORTADORES DE CORREIA POR MEIO DE ACELERÔMETROS E  
APRENDIZADO DE MÁQUINA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Gustavo Pessin, D.Sc.

Coorientador: Prof. Bruno Nazário Coelho, D.Sc.

Coorientador: Prof<sup>a</sup>. Andrea Gomes Campos Bianchi, Dra.

Ouro Preto

2022

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C331d Carvalho, Yves Salles Caetano de.

Detecção de falhas em rolamentos de tambores de transportadores de correia por meio de acelerômetros e aprendizado de máquina. [manuscrito] / Yves Salles Caetano de Carvalho. - 2022.

67 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Pessin.

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Nazário.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Mineraiis.

1. Correia Transportadora. 2. Inteligencia Artificial. 3. Correia Transportadora - Frequência. I. Nazário, Bruno. II. Pessin, Gustavo. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5:622.2

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
PROGR. POS GRAD. PROF. INST. CONT. E AUT.  
PROCESSOS DE MIN.



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Yves Salles Caetano de Carvalho**

**Detecção de falhas em rolamentos de tambores de transportadores de correia por meio de acelerômetros e aprendizado de máquina**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM), Convênio Universidade Federal de Ouro Preto/Associação Instituto Tecnológico Vale - UFOP/ITV, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação na área de concentração em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração

Aprovada em 06 de setembro de 2022

### Membros da banca

Doutor - Gustavo Pessin - Orientador - Instituto Tecnológico Vale  
Doutor - Bruno Nazário Coelho - Universidade Federal de Ouro Preto  
Doutora - Ana Claudia da Silva Gomes - Instituto SENAI de Inovação Tecnologias Mineraias  
Doutor - Heitor de Freitas Vieira - Sidia Instituto de Ciência e Tecnologia

Gustavo Pessin, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 18/11/2022



Documento assinado eletronicamente por **Saul Emanuel Delabrida Silva, VICE-COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INST. CONT. E AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE MINERAÇÃO**, em 21/11/2022, às 10:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0428612** e o código CRC **869E66E6**.

**Referência:** Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.015598/2022-42

SEI nº 0428612

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163  
Telefone: (31)3552-7352 - [www.ufop.br](http://www.ufop.br)

*Dedico a minha mãe Ana.*

# **Agradecimentos**

Dedico este trabalho a Deus, minha família que me apoiou, aos professores, ao meu orientador e ao ITV pelos ensinamentos e a empresa Vale que me permitiu obter novos conhecimentos.

*“Vivemos com o que recebemos,  
mas marcamos a vida com o que  
damos.”  
(Winston Churchill).*

## **Resumo**

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

# DETECÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE TAMBORES DE TRANSPORTADORES DE CORREIA POR MEIO DE ACELERÔMETROS E APRENDIZADO DE MÁQUINA

Yves Carvalho

Setembro/2022

Orientadores: Gustavo Pessin

Bruno Nazário Coelho

Andrea Gomes Campos Bianchi

Em plantas industriais que operam com logística e manipulação de grãos, minérios, carvão e etc. necessitam de vários tipos de equipamentos, sendo que um dos principais para estas finalidades é a correia transportadora. O transportador de correia é um equipamento longo, composto basicamente por uma esteira de borracha com malha de aço, motores, tambores, roletes, instrumentos e estrutura metálica. Para manter em funcionamento este equipamento que é primordial para a indústria da mineração, é necessário que haja manutenções preditivas e nesta, devem ser verificados todos os componentes críticos. Através de sensores de vibração e temperatura distribuídos nos pontos críticos dos equipamentos mais importantes, os dados podem ser coletados à distância, retirando as pessoas de qualquer exposição a riscos. Através dos dados coletados, um sistema computacional poderá realizar análises automáticas do espectro das frequências e diagnosticar com antecedência futuras falhas.

**Palavras-chave:** Correia Transportadora, Inteligencia Artificial, Frequência.

**Macrotema:** Logística; **Linha de Pesquisa:** Instrumentação no Processamento de Minérios; **Tema:** Inspeção Automática de Ativos; **Área Relacionada da Vale:** Gerência de Manutenção.

## **Abstract**

Abstract of Dissertation presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

# FAILURE DETECTION IN BELT CONVEYOR DRUM BEARINGS USING ACCELEROMETERS AND MACHINE LEARNING

Yves Carvalho

September/2022

Advisors: Gustavo Pessin

Bruno Nazário Coelho

Andrea Gomes Campos Bianchi

In industrial plants that operate with logistics and handling of grains, ores, coal and etc. they need several types of equipment, one of the main ones is the belt conveyor. The belt conveyor is a long equipment, basically composed of a rubber mat with steel mesh, motors, pulleys, rollers, instruments and metallic structure. And to keep this equipment in operation, which is essential for the mining industry, it is necessary to have predictive maintenance and in this, all critical components must be checked. Through vibration and temperature sensors distributed at the critical points of the most important equipment, data can be collected remotely, removing people from any exposure to risks. Through the collected data, a computer system will be able to carry out automatic analysis of the frequency spectrum and diagnose future failures in advance.

**Keywords:** Belt Conveyor, Artificial Intelligence, Frequency.

**Macrotheme:** Logistics; **Research Line:** Instrumentation of Iron Ore Processing; **Theme:** Automatic Equipments Inspection; **Related Area of Vale:** Maintenance Department.

# Lista de Figuras

Figura 1.1	Fotos do trem de minério Vale, recuperadora trabalhando no pátio de estocagem, e navio aguardando minério no píer. . . . .	15
Figura 1.2	O minério sendo extraído manualmente e carregado em cestos de palha para os vagões, em Presidente Vargas (MG), no ano de criação da CVRD, 1942. . . . .	16
Figura 1.3	Transportadores de correia em pátio de minério de ferro (Vale 2021). . . . .	17
Figura 1.4	Mina Serra Norte em Carajás-PA. . . . .	17
Figura 1.5	Mina Serra Sul em Canaã dos Carajás-PA. . . . .	18
Figura 1.6	Terminal Marítimo Ponta da Madeira - Porto Norte Vale S.A em São Luís-MA. . . . .	18
Figura 1.7	Esquema básico de equipamentos de um porto. . . . .	19
Figura 1.8	Incêndio em Carregador de Navio - Vale São Luís-MA 2021. . . . .	20
Figura 1.9	Termografia de um motor elétrico. . . . .	22
Figura 1.10	Medição ultrassônica em um rolo de um TR. . . . .	22
Figura 2.1	Componentes Mecânicos Básicos de um Transportador. . . . .	26
Figura 2.2	Instrumentação em Transportadores de Correia. . . . .	29
Figura 2.3	Conversor A/D de contagem ascendente. . . . .	30
Figura 2.4	Conversor A/D por rastreamento. . . . .	30
Figura 2.5	Diferentes tipos de Rolamentos. . . . .	32
Figura 2.6	Esquema de uma máquina e as faixas de frequências e defeitos. . . . .	34
Figura 2.7	Espectro de frequências dos sinais captados em um rolamento. . . . .	36
Figura 2.8	Formas de onda captada por acelerômetro acoplado em mancal. . . . .	36
Figura 2.9	Espectro de ondas calculado através do sinal captado por acelerômetro. . . . .	37
Figura 2.10	Desenho esquemático de um tambor para transportador de correia. . . . .	38
Figura 2.11	Caixa de Mancal SNL. . . . .	40
Figura 2.12	Mancal suportando tambor. . . . .	40
Figura 2.13	Exemplificação gráfica da Transformada de Fourier. . . . .	42
Figura 2.14	Onda quadrada aproximada a partir de uma soma de senos. . . . .	43
Figura 2.15	Espectro de frequências da soma de senos. . . . .	43
Figura 2.16	Representação de um Neurônio Biológico. . . . .	45
Figura 2.17	Diagrama simplificado de uma Rede Neural. . . . .	47
Figura 2.18	Árvore de decisão . . . . .	48

Figura 3.1	Diagrama de ligação interna do <i>datalogger</i> . . . . .	50
Figura 3.2	Placa Lilygo T8 com chip ESP32 (pinout) . . . . .	51
Figura 3.3	Pinagem do acelerômetro ADSL355 . . . . .	52
Figura 3.4	Diagrama de interligação do sistema. . . . .	53
Figura 4.1	Metodologia do Trabalho. . . . .	54
Figura 4.2	Sensor Datalogger acoplado a um mancal. . . . .	56
Figura 4.3	Ferramenta Bearing Frequencies Calculator. . . . .	59
Figura 5.1	Avaliação de média, mediana e desvio padrão do Teste 1, com Cross-validation Folds 10. Fonte: Autor. . . . .	61
Figura 5.2	Avaliação de média, mediana e desvio padrão do Teste 1, com Percentage split 70. Fonte: Autor. . . . .	62
Figura 5.3	Avaliação de média, mediana e desvio padrão do Teste 2, com Cross-validation Folds 10. Fonte: Autor. . . . .	62
Figura 5.4	Avaliação de média, mediana e desvio padrão do Teste 2, com Percentage split 70. Fonte: Autor. . . . .	63
Figura 6.1	Modelo de teste, trabalho futuro. . . . .	65

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Instrumentos e Aplicações em Transportadores de Correia. . . . .	28
Tabela 2.2	Principais causas de falhas prematuras de rolamentos. . . . .	33
Tabela 2.3	Principais falhas e frequências características. Fonte: Nascimento (2020). . . . .	35
Tabela 2.4	Tabela de Padronização de Tambores. Fonte: VALE. . . . .	39
Tabela 3.1	Comparativo entre sistema proposto e Dynamox. . . . .	51
Tabela 4.1	Seleção de transportadores para coleta de dados. . . . .	55
Tabela 4.2	Arquivo .csv gerado originalmente. Fonte: Autor. . . . .	56
Tabela 4.3	Arquivo .csv tratado. Fonte: Autor. . . . .	58
Tabela 5.1	Comparação entre resultado das médias, medianas e desvios padrão. Fonte: Autor. . . . .	63

# Lista de Siglas e Abreviaturas

**ADC** Analog to Digital Converter

**BPM** Ball Pass Frequency Inner Race

**BPMO** Ball Pass Frequency Outer Race

**BSF** Ball Spin Frequency

**CVRD** Companhia Vale do Rio Doce

**FFT** Transformada Rápida de Fourier

**FTF** Fundamental Train Frequency

**I2C** Inter-Integrated Circuit

**IA** Inteligência Artificial

**MEMS** Micro-Electro-Mechanical Systems

**RNA** Redes Neurais Artificiais

**SPI** Serial Peripheral Interface

**TF** Transformada de Fourier

**TMPM** Terminal Marítimo Ponta da Madeira

**TR** Transportadores de Correia

**TSMC** Taiwan Semiconductor Manufacturing Company

**WEKA** Waikato Environment for Knowledge Analysis

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>15</b>
1.1	Justificativa . . . . .	20
1.2	Objetivos . . . . .	23
<b>2</b>	<b>Referencial teórico e fundamentação científica</b>	<b>25</b>
2.1	Transportador de Correia (TR) . . . . .	25
2.2	Instrumentação . . . . .	27
2.2.1	Sinais . . . . .	30
2.2.2	Sensor Acelerômetro . . . . .	31
2.3	Equipamentos Rotativos . . . . .	32
2.3.1	Rolamentos . . . . .	32
2.3.2	Análise de Vibrações . . . . .	33
2.3.3	Frequências de Defeitos de Rolamentos . . . . .	34
2.3.4	Tambor . . . . .	37
2.3.5	Mancais . . . . .	40
2.4	Transformada de Fourier . . . . .	41
2.4.1	Transformada Rápida de Fourier . . . . .	42
2.5	Inteligência Artificial . . . . .	44
2.5.1	Redes Neurais Artificiais . . . . .	44
2.5.2	Aprendizado de Máquina . . . . .	46
2.5.3	Perceptron . . . . .	47
2.5.4	Métodos de Aprendizagem: Árvores de Decisão . . . . .	48
<b>3</b>	<b>Sistema de Aquisição de Dados</b>	<b>50</b>
3.1	Materiais . . . . .	50
3.1.1	Microcontrolador ESP32 . . . . .	51
3.1.2	Sensor acelerômetro ADXL355 . . . . .	52
3.1.3	Regulador de tensão MT3608 . . . . .	52
3.1.4	Bateria 3,3V . . . . .	52

## SUMÁRIO

<b>4</b>	<b>Método de Identificação de Falhas</b>	<b>54</b>
4.1	Seleção de Transportadores . . . . .	54
4.2	Aquisição de dados . . . . .	55
4.3	Pré-processamento dos Dados . . . . .	57
4.4	Treinamento e Teste dos Dados . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>61</b>
5.1	Avaliação comparativa no domínio da frequência: . . . . .	61
5.2	Avaliação comparativa no domínio da frequência com filtro: . . . . .	62
5.3	Resultados Gerais . . . . .	63
5.4	Discussões . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>65</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>66</b>
	<b>Apêndices</b>	<b>67</b>

# 1 Introdução

A mineração está dividida basicamente em quatro fases distintas em termos de conceito, sendo sequencialmente interligadas na sua execução. As fases são denominadas de: prospecção, exploração, desenvolvimento e lavra (inclui o fechamento de mina). A prospecção é a fase de procura de uma jazida e visa à descoberta de ocorrências naturais de substâncias minerais úteis. Já a exploração consiste na aplicação sistemática dos trabalhos necessários ao conhecimento geológico detalhado das ocorrências minerais para a definição da jazida. O desenvolvimento engloba todos os trabalhos preparatórios para o aproveitamento da jazida mineral. Para isso, pressupõe-se a jazida provada, com reservas asseguradas que viabilizem a implantação econômica do empreendimento, isto é, a abertura da mina. Por fim, a lavra (ou exploração) corresponde à aplicação sistemática dos trabalhos necessários ao aproveitamento econômico da jazida e engloba o conjunto de operações unitárias (perfuração, desmonte, carregamento e transporte) que possibilitam a sempre desejável exploração econômica, segura e ambientalmente sustentável do minério (CURI, 2017).

Após o minério ser lavrado, é necessário o transporte dos materiais desde a mina, passando por ferrovias, porto, navios, como na Figura 1.1, até a chegada aos consumidores em outros países.



Figura 1.1: Fotos do trem de minério Vale, recuperadora trabalhando no pátio de estocagem, e navio aguardando minério no píer.

Fonte: Vale (2012).

Como em qualquer outra indústria, o avanço tecnológico é indispensável para que haja progresso e aumento de produção. que é tanto requisitado devido ao aumento da população e consequentemente o aumento de consumo. Na Figura 1.2, pode-se ver como era realizado o transporte manual do minério no início de operação da CVRD em 1942. Hoje em dia, nem por questões de limitação de produção e tão pouco por questões humanitárias, este tipo de manuseio de minério seria impraticável. Na Figura 1.3 podemos ver duas correias transportadoras, cada uma com capacidade de taxa de transferência nominal de 8.000 t/h, em um pátio de minério de ferro na empresa Vale S.A que substituem o trabalho manual e aumentam a produtividade.

De acordo com Council (2002), a mineração é uma fonte de commodities minerais que todos os países consideram essenciais para manter melhorando seus padrões de vida. Mate-



Figura 1.2: O minério sendo extraído manualmente e carregado em cestos de palha para os vagões, em Presidente Vargas (MG), no ano de criação da CVRD, 1942.

Fonte: Vale (2012).

riais minerados são necessários para construir estradas e hospitais, para construir automóveis e casas, para fazer computadores e satélites, para gerar eletricidade, e para fornecer muitos outros bens e serviços que os consumidores necessitam. Além disso, a mineração é economicamente importante para a produção regional. Ele fornece empregos, dividendos, e impostos que ajudam a manter hospitais, escolas e serviços públicos. A indústria de mineração também produz força de trabalho qualificada. A mineração também rende divisas e é responsável por uma parte significativa da receita bruta produto interno. A mineração promove uma série de atividades, como fabricação de equipamentos, fornecimento de engenharia e serviços ambientais, e o desenvolvimento de universidades de classe mundial nas áreas de geologia, engenharia de mineração e metalurgia. O produto econômico gerado pela mineração cria oportunidades e riqueza substanciais para muitos países produtores.

Conforme comentado anteriormente o ciclo de vida do minério inicia-se na mina, passa pela ferrovia e chega até o porto, do porto é embarcado em navios para envio até os clientes em outros países. Na Figura 1.4 e Figura 1.5 temos as minas e na Figura 1.6 temos o porto que compõem o sistema Norte de Mineração pertencentes à Vale S.A.



Figura 1.3: Transportadores de correia em pátio de minério de ferro (Vale 2021).  
Fonte: Autor.



Figura 1.4: Mina Serra Norte em Carajás-PA.  
Fonte: Google Maps 2021.



Figura 1.5: Mina Serra Sul em Canaã dos Carajás-PA.  
 Fonte: Google Maps 2021.



Figura 1.6: Terminal Marítimo Ponta da Madeira - Porto Norte Vale S.A em São Luís-MA.  
 Fonte: Google Maps 2021.

São necessárias diversas máquinas e equipamentos no processo da mineração, como por exemplo, caminhões fora de estrada, britadores, silos, recuperadoras, empilhadeiras, carregadores de trens, carregadores de navio, trens e navios. Dentre estes equipamentos as correias transportadoras têm papel fundamental para o transporte do minério entre os equipamentos de uma mina ou porto. Na Figura 1.7 estão listados os equipamentos básicos de uma planta de minério em um porto.

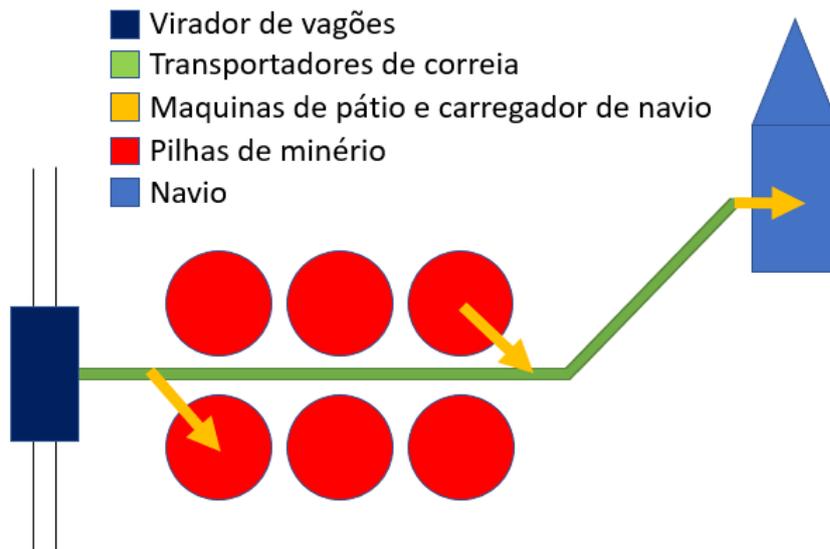


Figura 1.7: Esquema básico de equipamentos de um porto.  
Fonte: Autor.

Correias transportadoras têm sido usadas por décadas para transportar grandes quantidades de material por longas distâncias. Os transportadores provaram repetidamente que são um método confiável e econômico para movimentação de materiais. Os transportadores de correia podem transportar materiais em rampas íngremes, em torno de cantos, sobre colinas e vales, através de corpos d'água, acima do solo ou abaixo do solo. Os transportadores de correia têm a capacidade de transportar materiais que variam de pedaços grandes, pesados e com arestas afiadas a partículas finas; de úmido, pegajoso, lama a pó seco e empoeirado; de minério a areia de fundição; de toras do comprimento de uma árvore a lascas de madeira e até chips de batata. De todos os sistemas de manuseio de materiais, os transportadores de correia normalmente operam com o menor custo de transporte por tonelada, o menor custo de manutenção por tonelada, o menor custo de energia por tonelada e o menor custo de mão de obra por tonelada (SWINDERMAN *et al.*, 2013).

## 1.1 Justificativa

Como posto anteriormente, uma planta de mineração, seja ela na mina ou no porto, existe uma grande quantidade de quilômetros de transportadores de correia para atender a demanda de manuseio de minérios, sendo na função de descarga ou embarque.

Porém mesmo com uma grande quantidade de equipamentos, a falta de um transportador por defeito, por exemplo pode causar prejuízos de muitos milhões de dólares em se tratando de uma parada de produção.

Transportadores de correia parados por defeito são considerados uma urgência pelas equipes de manutenção e com isto requerem total atenção e uso de recursos para que possa voltar a operar.

Os defeitos mais críticos em transportadores de correia que devem ser sempre evitados são:

- Incêndio em correias (Como ocorreu em Figura 1.8));
- Incêndio em motores;
- Entupimento de chutes;
- Colapso estrutural;
- Rasgo em correia;



Figura 1.8: Incêndio em Carregador de Navio - Vale São Luís-MA 2021.  
Fonte: Vale.

Porém, a melhor maneira para evitar que aconteça algum dos problemas citados, é através da manutenção, ou seja, se os defeitos forem observados e corrigidos, dificilmente acontecerá algum acidente.

Desta forma, pode-se definir a manutenção industrial como o ato de manter as operações funcionando, e o esforço das organizações em manter seus processos produtivos ativos consome uma grande quantidade de recursos humanos e financeiros.

Conforme comentado no parágrafo anterior, os custos de manutenção são elevados, e mais elevados ainda quando a manutenção acontece de forma não planejada, ou seja, quando ocorre uma falha inesperada em um equipamento. Então é sempre preferível que seja realizado manutenções preventivas.

Manutenção preventiva é efetuada em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação de funcionamento de um item. As ações são realizadas por medidas de precaução para evitar ou diminuir a probabilidade de falhas ou um nível inaceitável de degradação em serviço, em vez de corrigi-los depois que eles ocorrem.

Outros importantes variáveis da manutenção que são impactadas diretamente pela forma como a manutenção é considerada é a disponibilidade e o tempo de reparo, ou seja, quando é necessário realizar uma manutenção não planejada, os indicadores aumentam seus níveis e isto é indesejável para os departamentos e manutenção, inclusive, sendo considerados como penalidades aos departamentos.

Assim sendo, a manutenção preventiva utiliza de algumas ferramentas que são utilizadas para avaliar o estados dos equipamentos, sendo possível medir a temperatura (Câmera Térmica conforme Figura 1.9), vibração (Pistola medidor de ultrassom conforme Figura 1.10), desgaste, viscosidade de lubrificantes, ausência de lubrificantes, alinhamento, propriedades físico-químicas, etc. As medições coletadas e avaliadas por profissionais capacitados que decidirão conforme padrões pré-existentes qual decisão tomar, se é programar uma manutenção futura, agir imediatamente ou aceitar a condição do equipamento.

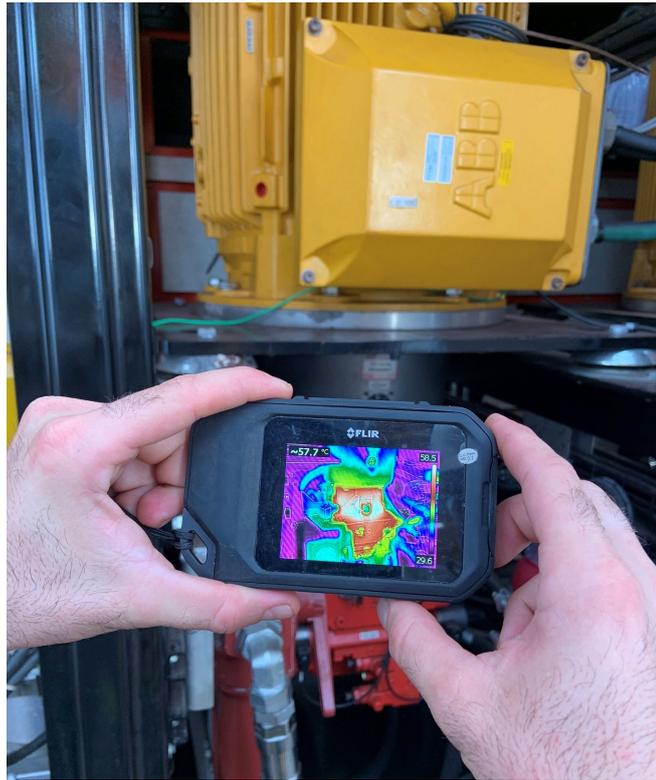


Figura 1.9: Termografia de um motor elétrico.  
Fonte: Autor.



Figura 1.10: Medição ultrassônica em um rolo de um TR.  
Fonte: Ericeira (2019).

E como pode ser visto nas figuras anteriores, medições utilizadas para manutenção podem ser realizadas através de ferramentas manuais, que dependem da interpretação humana para diagnosticar os problemas, ou seja, através de ferramentas manuais que podem não estar posicionadas corretamente, consequentemente medindo sinais erroneamente, além de possíveis erros de interpretação dos valores em consequência de um profissional menos qualificado ou inexperiente.

A proposta deste trabalho é a aplicação de uma metodologia de captação de vibrações em componentes de transportadores de correia (TR), mais especificamente rolamentos de tambores, utilizando um dispositivo *datalogger* desenvolvido na pesquisa de Marques (2021), o equipamento utilizado é instalado no local onde deseja-se medir vibrações e conectado a um computador via *Wi-Fi* onde o dispositivo recebe comandos de inicialização e após isto começa a coletar e armazenar dados a uma frequência de até 4 khz, após o período desejado inicia-se o *download* dos dados para o computador.

Com os dados transferidos, faz-se a seleção, tratamento dos dados, e o agrupamento das informações em um arquivo .csv que será inserido no algoritmo de aprendizagem de máquina para realizar os testes e a classificação da informação.

Tambores novos recém montados com rolamentos novos e que não apresentam nenhum distúrbio significativo serão considerados como “novos”. Para a categoria “usados”, foram utilizadas medições registradas em rolamentos de tambores usados e ruidosos que apresentavam características que costumam preceder falhas: como redução ou ausência de lubrificação, desalinhamento, desbalanceamento etc.

O sensoriamento das vibrações através de acelerômetros nos principais equipamentos ao longo dos transportadores, aliado a técnicas de aprendizagem de máquina com reconhecimento de padrões de sinais para classificação de anomalias pode ser uma ideia viável para a criação de um sistema de monitoramento dinâmico para diagnóstico e prevenção de falhas em rolamentos de tambores em transportadores de correia.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é propor um modelo de classificação de causas de defeitos em rolamentos de tambores de transportadores de correia. Serão modeladas técnicas de aprendizado de máquina tendo como entrada valores de frequência que são estimados através de técnicas como a Transformada Rápida de Fourier (FFT) a partir de sinais medidos por acelerômetros. Utilizando espectros de frequências de rolamentos onde se conhecem a causa dos defeitos, será executado o treinamento da rede neural que posteriormente será utilizada para prever novos espectros de frequência desconhecidos de outros rolamentos, classificando-os como defeituosos ou não.

As falhas nos rolamentos podem ser geradas e/ou aceleradas, devido aos seguintes causadores, entre outros: desalinhamento do eixo com o mancal, falta ou insuficiência de

lubrificação, contaminação. Quando estes problemas ocorrem, vibrações diferentes das previstas tem sua amplitude acentuada e que podem ser captados por *datalogger* fixados nos mancais e que enviam os dados via *Wi-Fi* para o computador, que por fim confirmará o que está acontecendo com o rolamento.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar sistema de coleta de dados;
- Propor, desenvolver e avaliar sistema inteligente de classificação de defeitos em rolamentos de tambores de correia.

E por fim, este documento segue a seguinte organização:

- Capítulo 1, Introdução: Apresenta um preambulo de uma planta de mineração, seus equipamentos e problemas;
- Capítulo 2, Referencial teórico e fundamentação científica: Apresenta a base teórica utilizada no trabalho;
- Capítulo 3, Materiais e métodos: Apresenta quais materiais utilizados e como será realizado o trabalho para a obtenção dos resultados;
- Capítulo 4, Método de Identificação de Falhas: Nesta seção será concatenada a base teórica para alcançar o objetivo do trabalho.
- Capítulo 5, Resultados e Discussões: Apresenta, como o próprio nome diz, os resultados dos testes e o que se compreende com eles.
- Capítulo 6, Trabalhos Futuros: Apresenta opções para novos trabalhos.

## 2 Referencial teórico e fundamentação científica

Neste capítulo será apresentado o referencial teórico e a fundamentação científica, baseados em artigos, livros, sites e trabalhos científicos, sobre os seguintes assuntos: eletrônica, sistemas embarcados, equipamentos mecânicos, instrumentação, vibrações mecânicas e inteligência artificial.

### 2.1 Transportador de Correia (TR)

Para muitas indústrias, o transportador de correia é um equipamento básico para manuseio de materiais a granel (Figura 2.1). Em essência, uma correia transportadora é uma grande faixa de borracha reforçada esticada em torno de duas ou mais polias, movimentando a uma taxa definida de velocidade, carregando uma quantidade especificada de material. Complicações surgem quando a linha de deslocamento se torna inclinada ou curva, quando o transportador deve ser adicionado a um processo ou planta sofisticada ou quando precisa atender aos requisitos de taxa de alimentação de material ou outras restrições operacionais. Um transportador de correia é um equipamento relativamente simples. Seu projeto básico é tão robusto que transporta material sob as condições mais adversas, como por exemplo, sobrecarregado, inundado com água, enterrado em material ou forçado de várias outras maneiras. A diferença, entretanto, entre um transportador de correia que é corretamente projetado, operado e mantido e um sistema disfuncional geralmente se torna rapidamente aparente nos custos de operação e manutenção do sistema.

Os transportadores de correia comuns para materiais a granel variam em largura de 300 milímetros (12 pol.) a 3.000 milímetros (120 pol.), com correias com 5.000 milímetros (200 pol.) de largura, vistas em aplicações como usinas de pelotização de minério de ferro. Os transportadores podem ter qualquer comprimento. A capacidade de carga é limitada pela largura e velocidade da transportador de correia, com transportadores frequentemente movendo vários milhares de toneladas de material por hora; todo dia.

Cada esteira transportadora de manuseio de materiais a granel é composta de seis elementos principais:

- a) **Correia:** Forma a superfície móvel sobre a qual o material passa;
- b) **Polias:** Apoia, move e controla a correia;
- c) **Motor:** Coloca energia a uma ou mais polias para mover a correia;
- d) **Estrutura:** Suporta e alinha os componentes rotativos.
- e) **Os sistemas de infraestrutura:** Suporta equipamentos e cabos.
- f) **Os sistemas de transferência:** Carregar ou descarregar a carga do transportador.

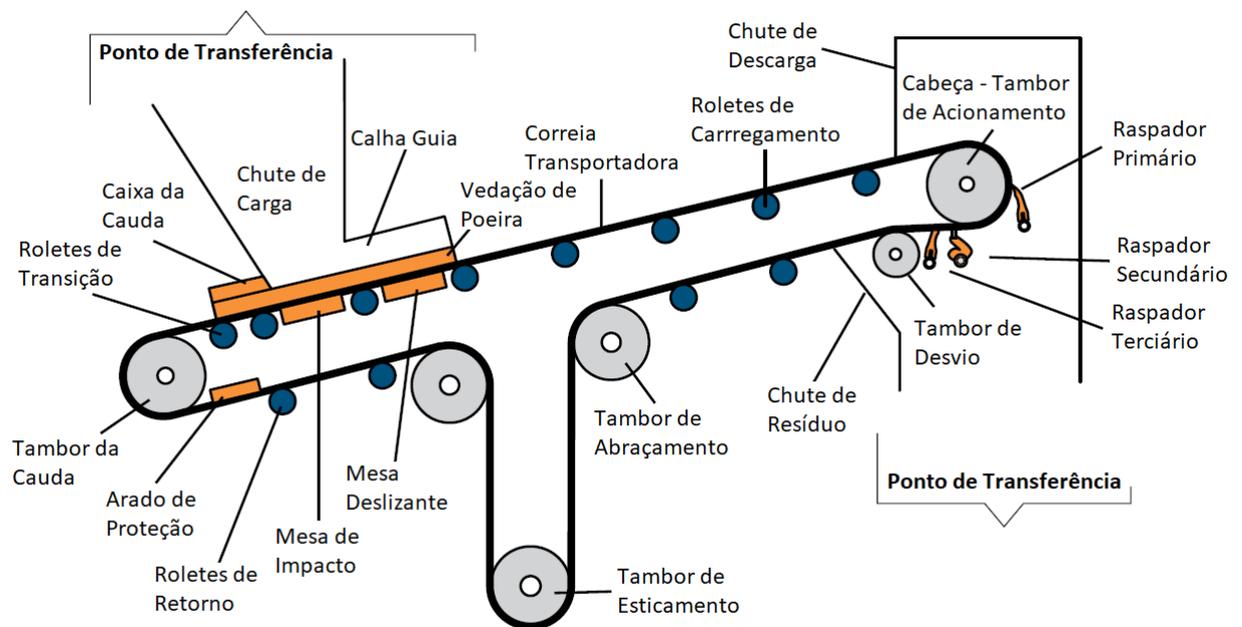


Figura 2.1: Componentes Mecânicos Básicos de um Transportador.  
 Fonte: Swinderman *et al.* (2013).

Outra parte de cada transportador são os equipamentos auxiliares instalados para melhorar a operação do sistema. Isso incluiria componentes como raspadores de correia, detectores de metal, calhas-guia e vedações, sistemas utilidades, chaves de segurança, sistemas de supressão de poeira e sistemas de proteção contra intempéries.

Mesmo havendo diferentes tipos de transportadores de correia, basicamente eles possuem os mesmos tipos de componentes, apresentados na (Figura 2.1). Um transportador consiste em uma correia de borracha contínua esticada entre as polias terminais. Uma das pontas é a cauda. Normalmente é onde o carregamento da carga ocorre, mas o carregamento pode ocorrer em qualquer lugar ao longo do comprimento do transportador. A outra extremidade do transportador é chamada de cabeça. O material geralmente é descarregado na cabeça.

A correia é apoiada em rolos planos ou de desgaste chamados de roletes ao longo do transportador. Rolos de calha formam a correia em forma de V que aumenta a capacidade de carga do transportador. No lado inferior (retorno) do transportador, onde a correia retorna ao ponto de carregamento, a correia é suportada com roletes de retorno. Os componentes rolantes são montados em quadros e suportados por uma estrutura de aço chamada longarinas.

Normalmente eletricamente acionados, os motores de acionamento dos transportadores são mais frequentemente localizados para girar a polia dianteira do transportador. Os motores podem ser localizados em qualquer ponto ao longo do transportador. Múltiplos motores são frequentemente usados em transportadores longos.

Um dispositivo de tensionamento, denominado torre de esticamento ou *take-up system*, é usado para fazer com que a correia permaneça tensionada contra a polia motriz para manter a tensão necessária na correia para mover a correia e a carga. O mais comum é um dispositivo de

tensionamento automático conhecido como esticamento por gravidade, que usa um contrapeso para criar tensão na correia. O contrapeso é frequentemente instalado próximo à polia no lado de retorno da correia.

Outro tipo de polia, denominado polia de abraçamento, é frequentemente colocado imediatamente após a polia dianteira no lado de retorno da correia para aumentar o contato da correia com esta polia, permitindo que uma polia motriz menor transmita a tensão necessária à correia.

A carga geralmente é carregada perto da extremidade da cauda em uma área conhecida como mesa de impacto. Os componentes da mesa de impacto provavelmente consistirão em uma calha de carga, polia traseira, roletes, sistemas de suporte de correia, calhas-guia, lonas de desgaste, vedações de poeira, vedações de entrada e vedações de saída.

A cabeça de um transportador, ou extremidade de descarga, geralmente consiste na polia dianteira, um chute de descarga junto com um sistema de limpeza de correia, um chute de drenagem e outros equipamentos para monitorar e manter o fluxo.

Um ponto de transferência é onde o material a granel se move de um equipamento para outro. Um ponto de transferência pode ser uma zona de carga ou descarga ou, no caso em que um transportador está alimentando outro, um ponto de transferência pode conter as zonas de carga e descarga. No entanto, um ponto de transferência também pode ser onde uma correia alimenta outro sistema de manuseio ou processamento de materiais a granel ou onde a correia recebe carga de outro sistema de manuseio ou processamento de materiais a granel.

Dependendo do material transportado, uma variedade de outros equipamentos auxiliares também podem ser instalados ao longo do curso do transportador ou no ponto de transferência em qualquer uma das extremidades.

## **2.2 Instrumentação**

Segundo Eletrobrás, Procel, e CNI (2008), instrumentação é qualquer dispositivo (instrumento), ou conjunto de dispositivos, utilizado com a finalidade de se medir, indicar, registrar ou controlar as variáveis de um processo. Existe instrumentos específicos para medição, indicação, para registro e controle de uma variável de processo.

Existem diversos tipos de instrumentos para permitir o controle industrial de um transportador de correia, como os exemplos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Instrumentos e Aplicações em Transportadores de Correia.

Fonte: Autor.

<b>N.</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Aplicação</b>
1	Sensor Indutivo	Sensor de rotação e freios
2	Chave de desalinhamento	Verificar a posição da correia
3	Chave de emergência	Parar todos os motores em caso de emergência
4	Chave de fim de curso	Para posicionamento de cabeça móvel
5	Sonda de nível	Verifica nível de material em chute
6	Detector de rasgo	Verificar rasgo na correia
7	Fotocélula	Ligar iluminação
8	Sensor de temperatura	Verificar temperatura em motores e acolamentos
9	Sensor de pressão	Verifica pressão de lubrificação
10	Sensor de nível	Verifica nível de lubrificantes
11	Sirene	Anuncia partida
12	Balança	Verifica quantidade de material
13	Sensor de umidade	Verifica umidade do material
14	Sensor de vibração	Verifica vibração em pontos críticos

A Figura 2.2 mostra a posição de instalação dos instrumentos dos transportadores de correia.

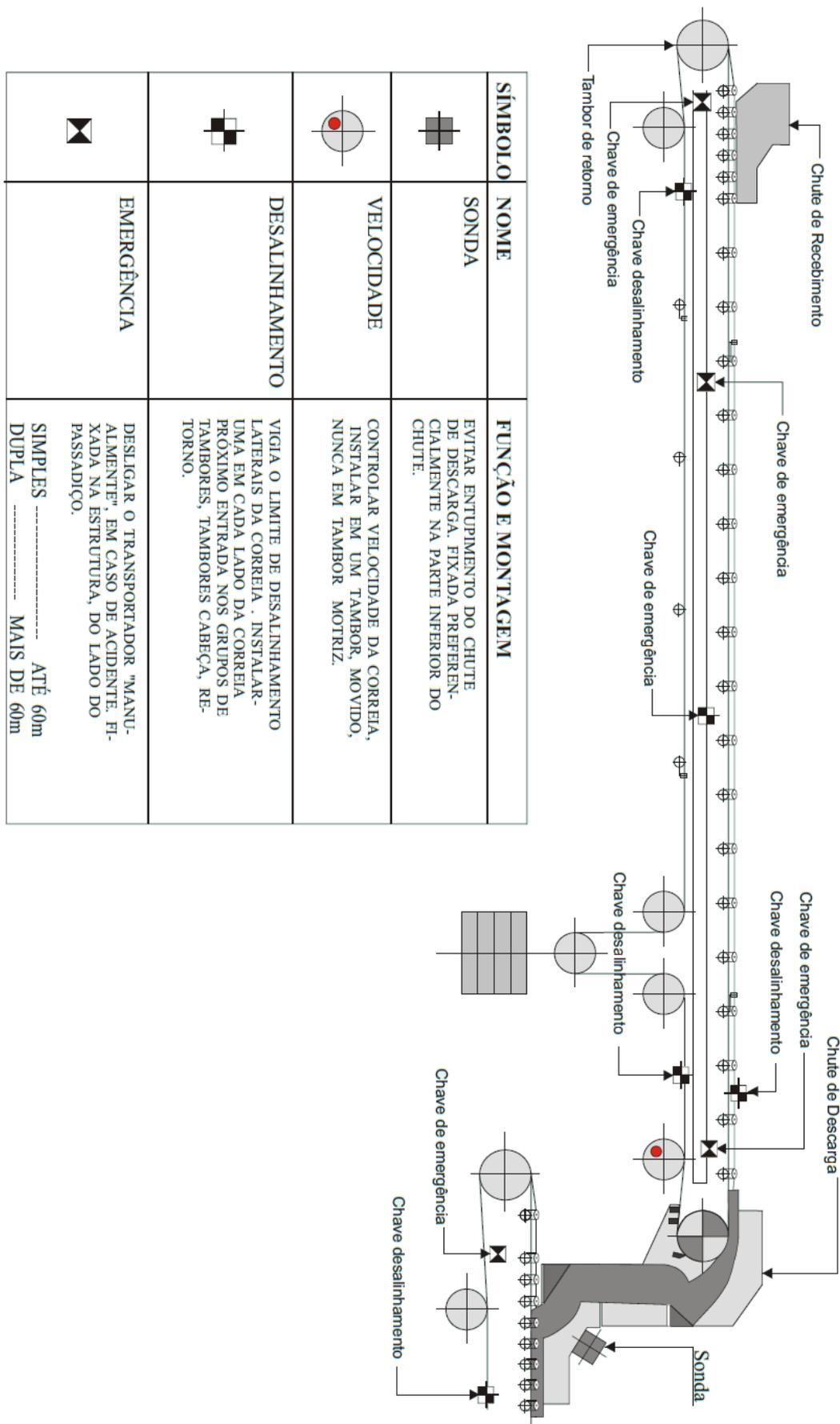


Figura 2.2: Instrumentação em Transportadores de Correia.  
Fonte: Torres *et al.* (2000).

## 2.2.1 Sinais

Os sinais na natureza são normalmente fenômenos analógicos, como por exemplo, temperatura, luz, pressão, umidade etc. pois possuem uma variação contínua. Já os computadores funcionam com variáveis digitais, ou seja, 0 ou 1 variando com base em uma frequência predefinida. Então para monitorar essas grandezas através de computadores é necessário realizar conversões entre os sinais analógicos e digitais.

### Conversão Analógico/Digital

Conversores Analógico Digitais (A/D) através de um circuito eletrônico realizam operações de contagem e comparações para realizar a conversão. São chamados *feedback converters*, ou conversores por realimentação (HAUPT e ÉDISON, 2018), sendo os dois principais como mostrado nas Figura 2.3 e Figura 2.4:

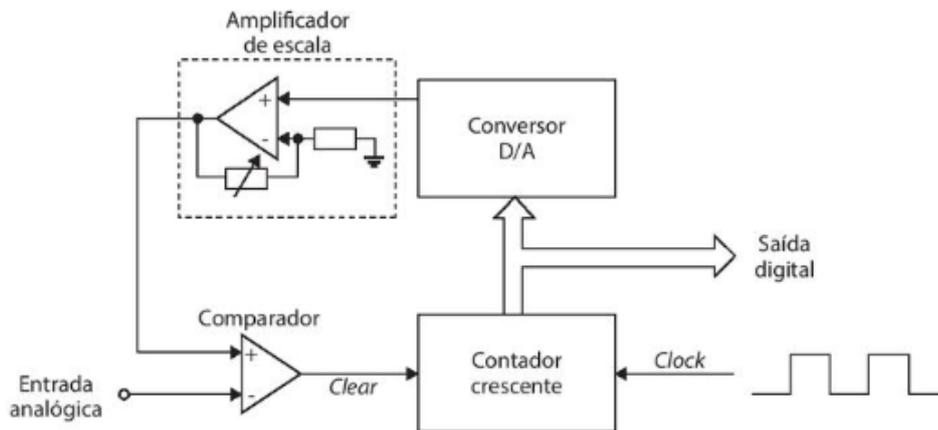


Figura 2.3: Conversor A/D de contagem ascendente.  
Fonte: Haupt e Édison (2018).

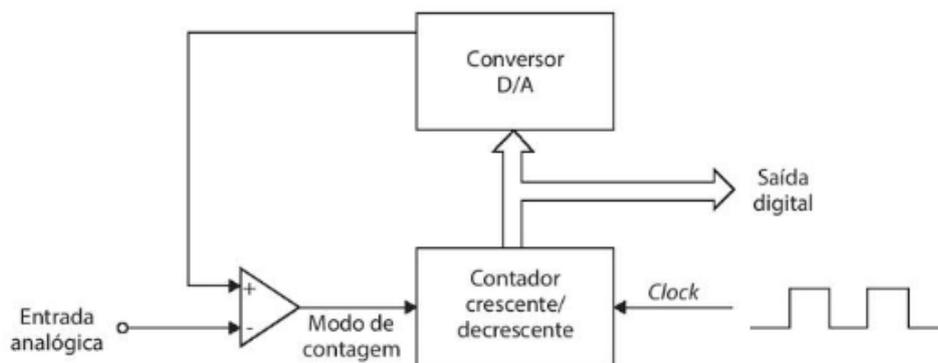


Figura 2.4: Conversor A/D por rastreamento.  
Fonte: Haupt e Édison (2018).

## Parâmetros de um conversor A/D

Conforme cita Haupt e Édison (2018), para um conversor A/D as principais características são a resolução e o erro de quantização.

1 - Resolução: está relacionada com a quantidade de bits do conversor, ou seja, quanto maior for a resolução, melhor será o conversor. Por exemplo, um conversor de 4 bits, dividirá o sinal analógico em 16 níveis que serão convertidos em códigos binários.

2 - Erro de quantização: É a diferença entre o valor analógico e o valor digital para qual este valor analógico foi convertido. Na conversão de um valor analógico para digital perde-se precisão devido à resolução, isto é, erro de quantização (HAUPT e ÉDISON, 2018).

3 - Ruído de quantização: O processo de conversão e quantização pode inserir ruído indesejado. O ruído indesejado, se necessário, pode ser atenuado por meio de filtros digitais (HAUPT e ÉDISON, 2018).

## Taxa de amostragem

Para evitar perda de informação durante a conversão do sinal analógico para digital, como provou Harry Nyquist, o sinal de entrada tem de ser amostrado a uma taxa maior do que duas vezes o componente de maior frequência do sinal de entrada (TOCCI *et al.*, 2007).

### 2.2.2 Sensor Acelerômetro

Os sensores acelerômetros estão presentes em nossa vida diária, como por exemplo nos nossos aparelhos celulares ou relógios *Smart Watches*, ou seja, quando mudamos a posição dos aparelhos e de acordo com a posição é executada alguma ação, isto é devido a um sensor acelerômetro embutido em nossos aparelhos.

Outra aplicação clássica de um acelerômetro são os sismógrafos, que medem a vibração da terra e alertam em caso de terremotos.

Estes sensores são capazes de medir a aceleração própria de um objeto e captar vibrações. Neste dispositivo é gerada uma variação de uma tensão elétrica em suas saídas proporcionalmente a variação da aceleração do seu corpo.

Geralmente podem medir a aceleração nos três eixos, mas também podem medir em dois e até em um, dependendo da aplicação. No caso, um acelerômetro de 3 eixos (x, y e z), fornece três sinais que indicam as vibrações em cada eixo.

E as informações podem ser disponibilizadas através de saídas digitais, saídas analógicas ou via rede de dados.

## 2.3 Equipamentos Rotativos

### 2.3.1 Rolamentos

Todos os equipamentos móveis que têm algum movimento de um eixo rotativo, necessita de um rolamento, pois este componente permite movimento rotativo entre dois ou mais elementos, com considerável redução do atrito entre as superfícies de contato.

Os rolamentos são um dos elementos mecânicos essenciais em máquinas rotativas. Em geral, os rolamentos são frequentemente substituídos quando algum tipo de defeito que ocorrem na superfície da pista. No entanto, em situações em que não é fácil substituir o rolamento, onde os custos de manutenção são altos, ou onde alguns defeitos nos rolamentos não interferem com o funcionamento dos equipamentos, o rolamento poderá continuar sendo utilizado mesmo depois que os defeitos ocorreram (KITAI *et al.*, 2021).

Como é apresentado na Figura 2.5, temos vários tipos de rolamentos e que o seu uso depende da necessidade o equipamento principal, desta forma podemos citar os seguintes:

- a) Rolamentos Radiais;
- b) Rolamentos Axiais;
- c) Rolamentos de leva e de apoio;
- d) Rolamentos Y.



Figura 2.5: Diferentes tipos de Rolamentos.

Fonte:

<https://www.bruhel.com.br/wp-content/uploads/2020/02/rolamentos-de-primeira-linha-01.jpg>.

Uma falha em rolamentos danifica os componentes do conjunto e pode até fazer uma máquina inteira falhar, por isso faz se necessário o monitoramento do estado do equipamento.

Defeitos em rolamentos podem ser agravados devido a alguns fatores, como podemos ver a na Tabela 2.2 as principais causas de falhas prematuras de rolamentos.

O monitoramento de condições é uma expressão coletiva que inclui o monitoramento de qualquer máquina através de instrumentos. O monitoramento multiparâmetro de condições é

Tabela 2.2: Principais causas de falhas prematuras de rolamentos.

Fonte: <https://engeteles.com.br/falhas-em-rolamentos/>.

<b>N.</b>	<b>Maiores causas de defeitos</b>	<b>Percentual</b>
1	Lubrificação inadequada	34%
2	Desalinhamento	20%
3	Contaminação	19%
4	Erros de montagem	18%
5	Causas desconhecidas	6%
6	Armazenamento e manuseio inadequado	3%

a técnica mais praticada e o monitoramento da vibração é o método mais utilizado para acompanhar as condições de uma máquina. A vantagem de usar a abordagem multiparâmetro é que ela permite que o sistema de monitoramento não leve em conta apenas os rolamentos, mas vai além dos rolamentos e considera a máquina como um todo. Isso proporciona a oportunidade de proteger os rolamentos corrigindo falhas subjacentes das máquinas em estágio inicial de desenvolvimento (SKF, 2012).

### 2.3.2 Análise de Vibrações

Conforme o autor Nascimento (2020) vibração é qualquer movimento que se repete, regular ou irregular, depois de um intervalo de tempo. O movimento de um pêndulo e da corda de um violão são exemplos simples de vibrações no mundo real. Em engenharia estes movimentos ocorrem em elementos de máquinas e nas estruturas, quando estes estão submetidos a ações dinâmicas.

#### Identificando Frequências

O autor Nascimento (2020) também comenta que, o primeiro passo para identificar a fonte de vibração em uma máquina é calcular as frequências esperadas de vibração quando a máquina estiver operando em determinada rotação. A análise espectral revela as frequências nas quais os níveis de vibração variam significativamente.

A frequência das vibrações variam de acordo com a rotação do equipamento, em um acionamento onde eixos possuem rotações diferentes, as frequências de vibração também são diferentes, como exemplificado na Figura 2.6.

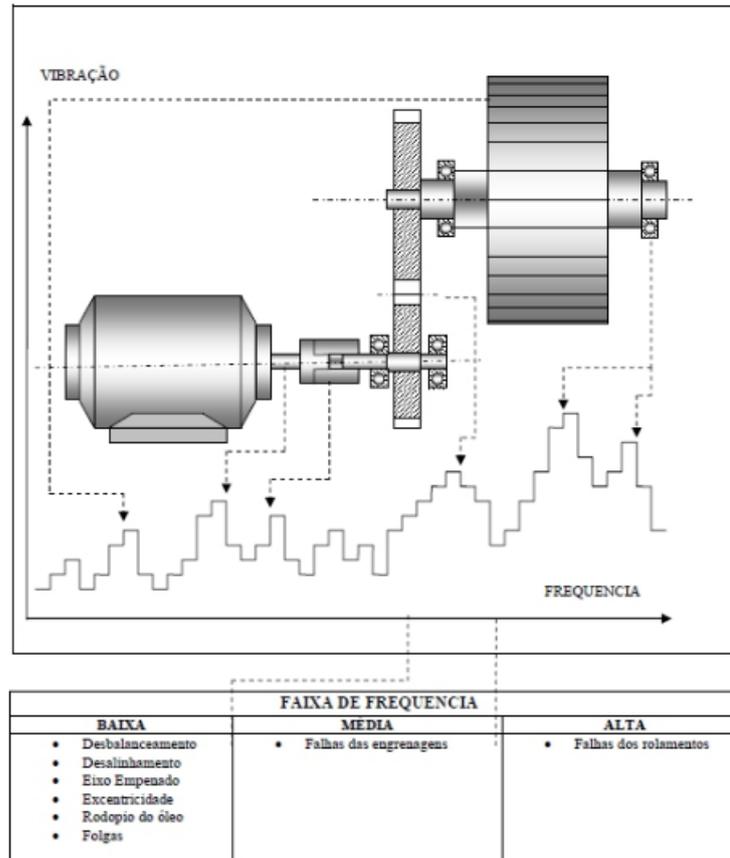


Figura 2.6: Esquema de uma máquina e as faixas de frequências e defeitos.  
Fonte: Nascimento (2020).

O fabricante de cada equipamento fornece dados que facilitam a identificação de frequências dos espectros de frequência que são utilizados para a determinação dos defeitos. Pode ser visto no exemplo da Tabela 2.3.

### 2.3.3 Frequências de Defeitos de Rolamentos

Cada rolamento emite um sinal de baixa frequência. A frequência do sinal depende do número e tamanho dos elementos rolantes, do ângulo de contato do rolamento e o diâmetro do passo do elemento rolante.

Sempre que os elementos rolantes passarem por um defeito do rolamento, um sinal de alta frequência é gerado, o que provoca um pico na amplitude do sinal. A taxa desses picos é uma função da rotação, bem como da posição do defeito no rolamento e da geometria interna do rolamento.

Para monitorar as condições de um rolamento, é usada uma técnica chamada envelope ou envolvente de aceleração. Envelope isola o sinal de alta frequência gerado pelo defeito, de outras frequências que ocorrem naturalmente decorrentes da rotação ou estruturais na máquina (Figura 2.7).

Tabela 2.3: Principais falhas e frequências características. Fonte: Nascimento (2020).

FONTE	FREQUÊNCIA (MÚLTIPLO DE RPM)
<b>INDUZIDAS POR FALHAS</b>	
Desbalanceamento de massa	1x (uma vez a rotação)
Desalinhamento	1x, 2x
Eixo empenado	1x
Folga mecânica	Ordens ou múltiplos de 1x
Mancais de deslizamento	Frequências de rotação do eixo 1x e harmônicas, se roçamento: sub-harmônicos (1/2 x, 1/4x ...) e inter-harmônicos (3/2x, 5/2x ...)
Distorção de carcaça e fundação	1x
Mecanismos de impacto	vários pulsos na forma de onda
<b>INDUZIDAS POR PROJETO</b>	
Juntas universais ou eixo cardã	2x
Eixo assimétrico (rolo ovalizado)	2x
Frequência de engrenagens (Z dentes)	Zx
Acoplamentos (m = número de anéis, lâminas, parafusos, etc. na união dos flanges)	mx
Mancais de óleo	0,43x a 0,47x
Pás (m = número de pás)	mx
Máquinas alternativas	1/2x e múltiplos da rotação

Cálculo das frequências dos defeitos no rolamento cada componente do rolamento tem uma frequência de defeito única, que permite que um especialista identifique o dano.

As seguintes frequências de defeitos podem ser calculadas (SKF, 2012):

- **BPFO**, frequência de passagem da esfera/rolo pela(s) pista(s) do anel externo [Hz];
- **BPFI**, frequência de passagem da esfera/rolo pela(s) pista(s) do anel interno [Hz];
- **BSF**, frequência de giro da esfera/rolo [Hz];
- **FTF**, frequência da gaiola (frequência fundamental do trem) [Hz].

Porém apesar dos manuais dos fabricantes de rolamentos apresentarem onde provavelmente está o defeito através da análise do espectro das frequências, as causas dos defeitos não são apresentadas, então este trabalho vem tentar indicar qual a provável origem do defeito, podendo ser, entre outros:

1. Lubrificação Inadequada;
2. Desalinhamento;
3. Contaminação;
4. Erros de Montagem;

### Análise de Envelopamento de Aceleração

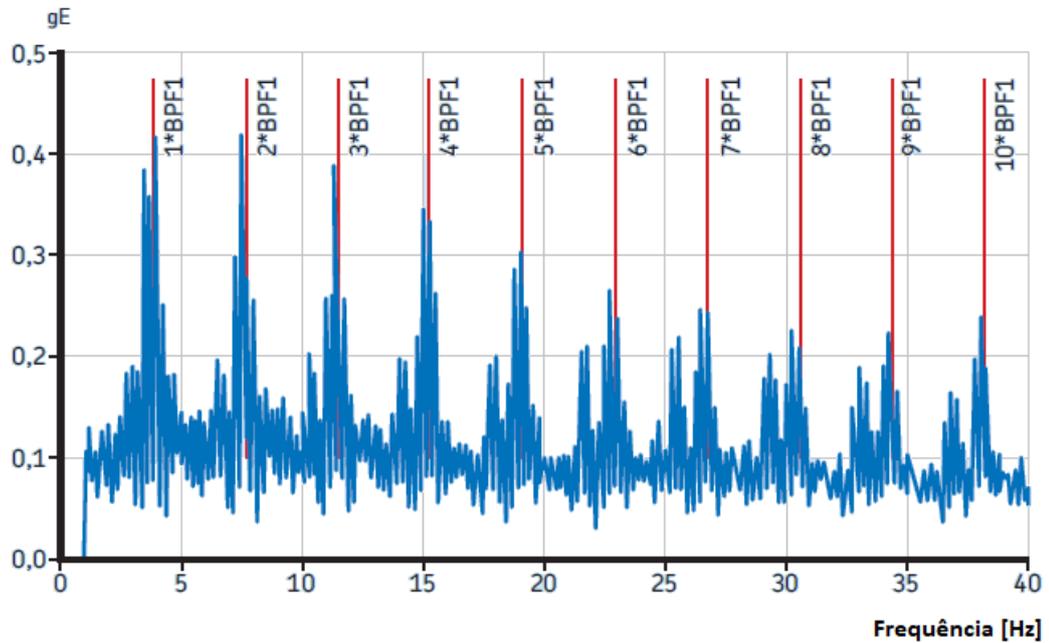


Figura 2.7: Espectro de frequências dos sinais captados em um rolamento.  
Fonte: SKF (2012).

A Figura 2.8 apresenta a forma de onda de um acelerômetro acoplado a um mancal.

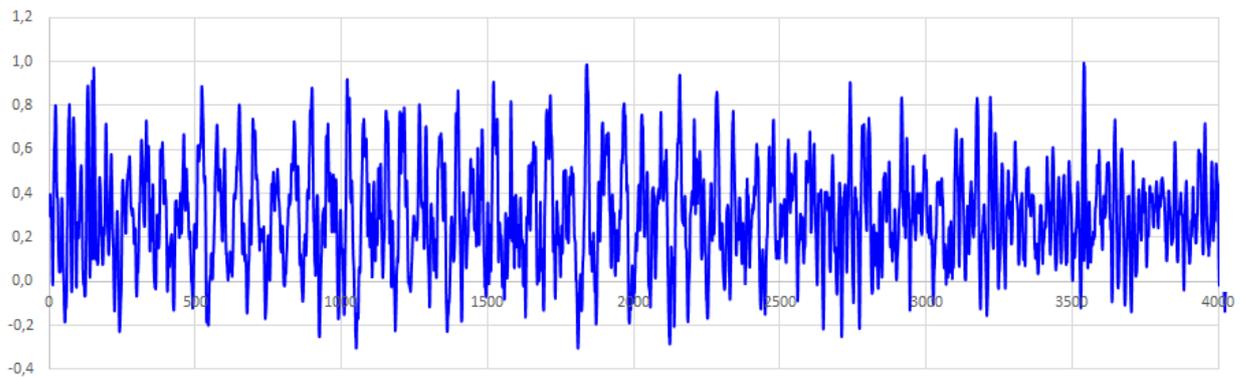


Figura 2.8: Formas de onda captada por acelerômetro acoplado em mancal.  
Fonte: Autor.

Na Figura 2.9 apresentamos o espectro de ondas gerado através da técnica FFT a partir do sinal da Figura 2.8:

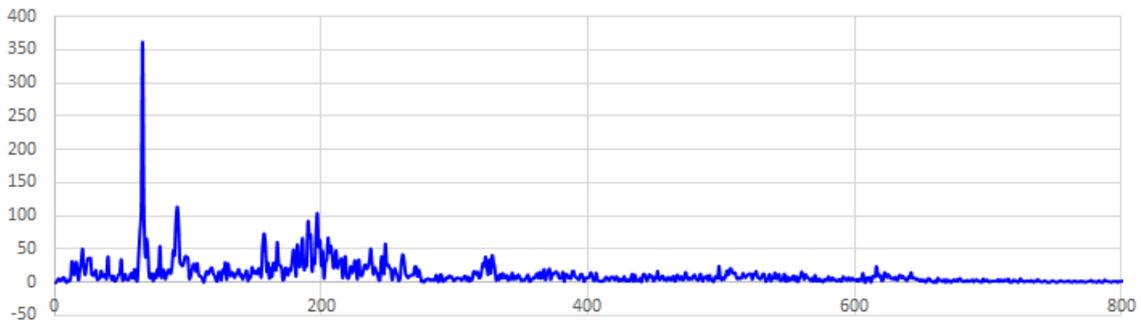


Figura 2.9: Espectro de ondas calculado através do sinal captado por acelerômetro.  
Fonte: Autor.

### 2.3.4 Tambor

Tambor ou polia é um equipamento mecânico destinado a efetuar as funções de transmissão de torque, no caso do tambor motriz e suportar as tensões nos desvios, dobras e retorno existente no perfil da correia transportador (TORRES *et al.*, 2000).

Em um transportador de correia podemos ter os seguintes tipos de tambores (TORRES *et al.*, 2000):

**Acionamento** - Serve para transmitir o torque do conjunto motor/redutor para a correia;

**Retorno** - Serve para retornar a correia;

**Esticador** - Para se dar a tensão necessária à correia e absorver o esticamento da mesma;

**Encosto** - Para aumentar o ângulo de contato do tambor de acionamento;

**Descarga** - Instalado no ponto de descarga do material.

Os componentes principais dos tambores são os seguinte e estão localizados conforme Figura 2.10:

1 - Corpo;

2 - Discos laterais;

3 - Discos centrais;

4 - Cubos;

5 - Elementos de transmissão de torque (anéis de expansão);

6 - Eixo;

7 - Mancais;

8 - Revestimento.

Especificações: Para cada aplicação existem tipos específicos de tambores a serem utilizados, como pode ser verificado na Tabela 2.4.

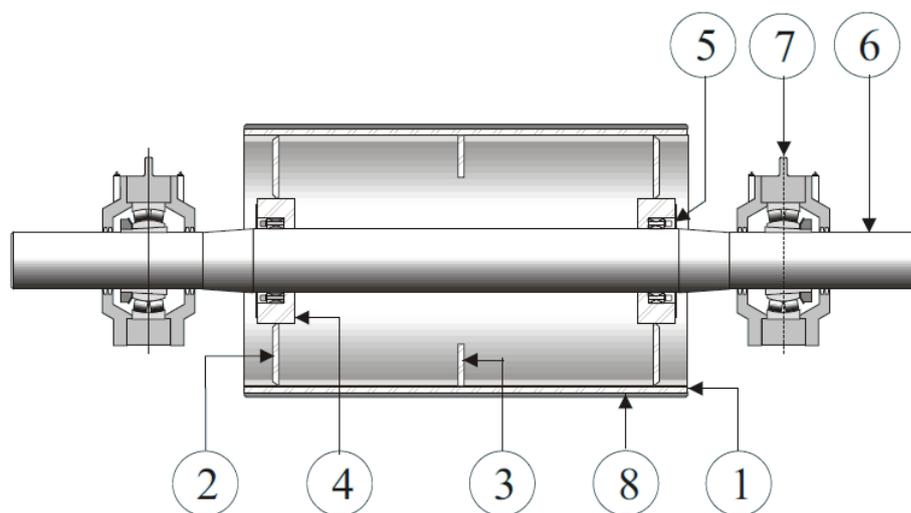
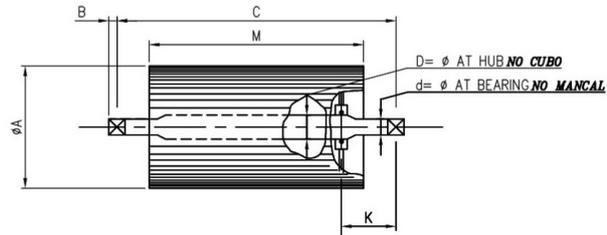


Figura 2.10: Desenho esquemático de um tambor para transportador de correia.  
Fonte: Torres *et al.* (2000).

Tabela 2.4: Tabela de Padronização de Tambores. Fonte: VALE.

TAMBORES DE ENCOSTO, RETORNO E OUTROS  
DESENHO PADRÃO



BELT WIDTH LARGURA DA CORREIA	PULLEY TAMBOR		SHAFT EIXO				LOAD RATE TAXA DE CARREGAMENTO		TAG CÓDIGO				
	A $\phi$	M	d $\phi$ (NOMINAL)	D $\phi$	K	C	Po ADM.	To ADM					
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	Kgf	Kgf					
600	400	700	75	90	250	1100	2100		211 A				
			100	120			5750		211 B				
	100		120	5750			213 B						
	125		150	15000			213 C						
1200	630	1400	100	120	350	1900	2650	26000	243 B				
			125	150			6550		243 C				
			150	180			13600		243 D				
	800		150	180	13600		244 D						
			180	200	20800		244 E						
			200	220	30450		244 F						
	1250			260	280					69750		246 J	
				300	320					104150		246 L	
				320	340					124900		246 M	
1600	1000	1900	180	200	350	2400	16150	22000	255 E				
			200	220			23650		255 F				
			240	260			46200		255 H				
			260	280			62150		256 J				
	1250		300	320			104150		256 L				
			320	340			124900		256 M				
			260	280			62150		257 J				
	1400			320			340				124900		257 M
				360			380				174400		257 P
1800	1000	2100	180	200	350	2600	14850	51000	265 E				
			200	220			21750		265 F				
			240	260			42450		265 H				
			260	280			57100		266 J				
	1250		300	320			97450		266 L				
			320	340			124200		266 M				
			320	340			124200		268 M				
	1600			360			380				174400		268 P
				400			420				235500		268 R
2200	1000	2500	180	200	450	3200	9400	58000	275 E				
			200	220			13750		275 F				
			240	260			26900		275 H				
			260	280			36150		276 J				
	1250		300	320			61700		276 L				
			320	340			78650		276 M				
			380	400			150700		279 Q				
	1800			400			420				183150	210600	279 R
				420			440				210600		279 T
2400	1000	2700	180	200	450	3400	8800	26000	285 E				
			200	220			12900		285 F				
			240	260			25200		285 H				
			260	280			33950		286 J				
	1250		300	320			57900		286 L				
			320	340			73800		286 M				
			380	400			141400		289 Q				
	1800			400			420				171850		289 R
				420			440				207050		289 T

### 2.3.5 Mancais

Para fixar os rolamentos às estruturas metálicas fixas são utilizados os mancais como visto na Figura 2.11. Neste mesmo equipamento também são fixados os acelerômetros.

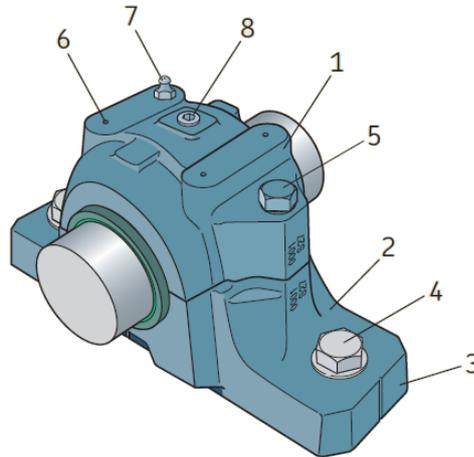


Figura 2.11: Caixa de Mancal SNL.  
Fonte: SKF (2012).

Os mancais em transportadores de correia são elementos destinados a apoiar os eixos dos tambores, suportar as cargas e proteger os rolamentos mantendo-os limpos e lubrificados (TORRES *et al.*, 2000). Na Figura 2.12 está a posição dos componentes citados.

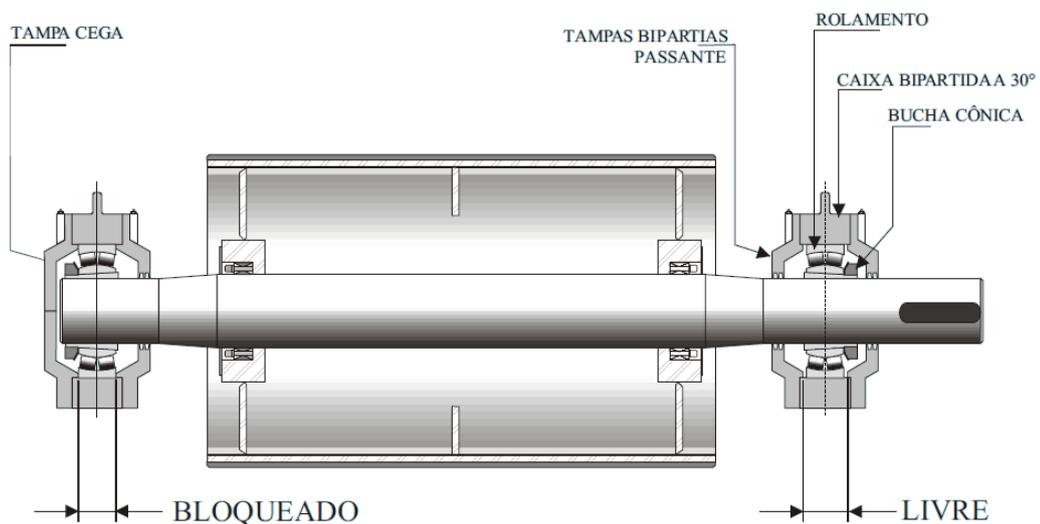


Figura 2.12: Mancal suportando tambor.  
Fonte: Torres *et al.* (2000).

Os principais componentes dos mancais são (TORRES *et al.*, 2000):

**Caixa** - Pode ser de aço fundido ou ferro fundido, bipartidos com divisão da caixa em ângulo de 30° para assegurar o efeito de montagem e desmontagem no campo, ou inteiriças, com dois ou quatro furos.

**Rolamento** - Rolamento auto compensador de rolos esféricos com furo cônico, com classe de folgas "C" ou "C3", fixados com bucha cônicas, dimensionados com vida teórica não inferior a 50 000 horas.

**Vedação** - Deve ser de concepção adequadas para serviços pesados em ambientes com atmosfera contaminada, pode ser simples com labirinto, com labirinto e retentor, ou com "talconite" (labirintos axiais e radiais com possibilidade para purga de graxa) e com uma ou dupla vedação de gaxeta de feltro ou borracha.

**Tampas** - Tampas laterais bipartidas possibilitam fácil vistoria dos rolamentos, sem a necessidade de desmontar-se a caixa, facilitando também a troca da vedação sem desmontagem do mancal.

## 2.4 Transformada de Fourier

O termo transformada é bastante geral e se aplica a diversas operações matemáticas. Transforma-se uma função para se obter outra. No lugar de efetuar certos cálculos mais complexos com a função original, manipula-se de forma mais simples e imediata a sua transformada (GEROMEL e DEAECTO, 2019).

Transformada de Fourier (TF) decompõe uma forma de onda no tempo em suas senoides constituintes. Na Figura 2.13, o sinal representa uma forma de onda de amplitude variante no tempo, que pode ser decomposta em suas senoides constituintes que se somam para formar o sinal original. Estas senoides são as frequências fundamentais que formam o sinal original (ERICEIRA, 2019).

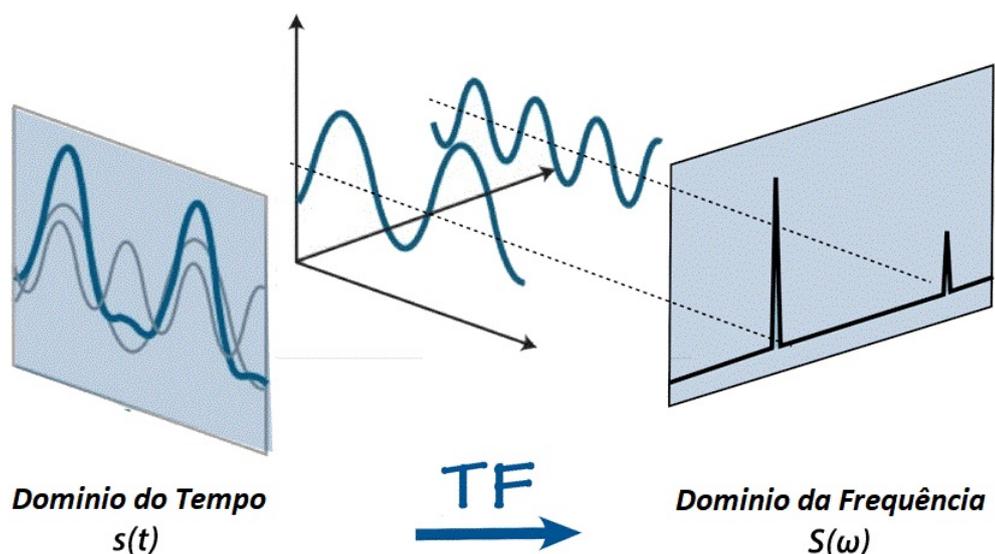


Figura 2.13: Exemplificação gráfica da Transformada de Fourier.

Fonte: <https://medium.com/@balajiciet/nuts-and-bolts-of-fourier-transform-for-time-series-forecasting-python-c5dc08d0840>.

### 2.4.1 Transformada Rápida de Fourier

A Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) é o nome do conjunto de algoritmos que realizam a Transformada Discreta de Fourier de forma rápida e eficiente (EDUARDO, 2018).

O princípio do algoritmo FFT é reduzir o número de adições e multiplicações complexas e, portanto, sua ordem. Nesse sentido, computacionalmente falando, o custo computacional para calcular utilizando FFT é reduzido (EDUARDO, 2018).

É possível desenvolver várias abordagens matemáticas para elaboração de algoritmos FFT. Entre os mais estudados estão aqueles que possuem a menor complexidade algorítmica, como por exemplo os algoritmos de Danielson-Lanczos, Cooley-Tukey, Sande-Tukey, entre outros (EDUARDO, 2018).

Para complementar a explicação teórica pode-se apresentar graficamente com o uso do matlab como será o resultado da transformação.

Primeiramente para entender a composição de uma onda formada por vários sinais, será utilizado a Equação conhecida (2.1) como exemplo. Está é formada pela soma de uma constante e cinco senoides.

$$f(x) = 3 + 4\text{sen}(x) + \frac{4}{3}\text{sen}(3x) + \frac{4}{5}\text{sen}(5x) + \frac{4}{7}\text{sen}(7x) + \frac{4}{9}\text{sen}(9x) \quad (2.1)$$

Através do Matlab, pode-se ver graficamente como se comporta a Equação (2.1):

E aplicando-se a transformada de Fourier, podemos visualizar a mesma função (2.1) no domínio das frequências, ou seja, mostra o espectro das frequências:

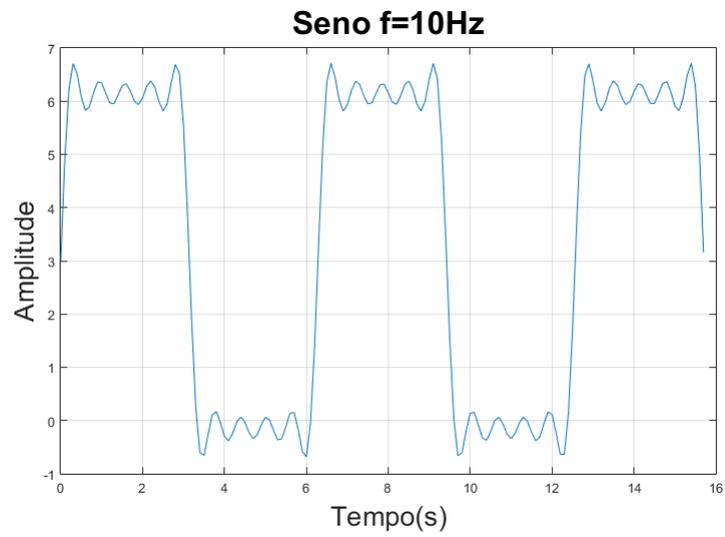


Figura 2.14: Onda quadrada aproximada a partir de uma soma de senos.  
 Fonte: Autor.

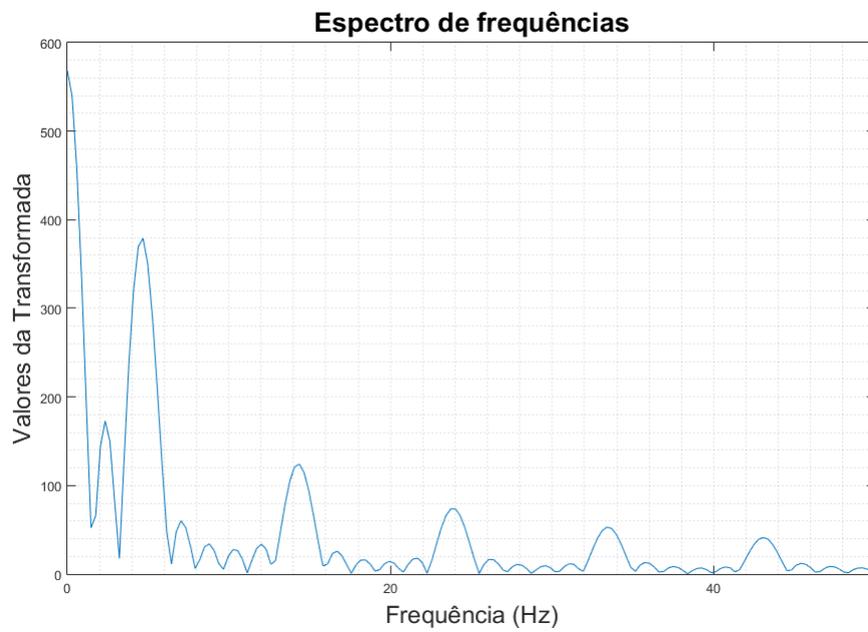


Figura 2.15: Espectro de frequências da soma de senos.  
 Fonte: Autor.

## 2.5 Inteligência Artificial

Atividades do cotidiano humano como dirigir um carro, realizar uma busca na internet, ligar um eletrodoméstico, conversar por meio de um aparelho celular ou controlar uma fábrica automatizada envolvem uma diversidade de algoritmos e dispositivos criados para, em certa medida, simular o pensamento ou a ação humana, com a intenção de facilitar operações específicas. Assim como equipamentos, máquinas e softwares são criados para, de certa forma, realizar tarefas semelhantes às realizadas por pessoas, desde os anos 50, cientistas estudam formas de criar algo que se assemelhe ao raciocínio e tomadas de descrições que somente a inteligência humana é capaz de realizar, isto é feito através da inteligência artificial (IA).

Entre todas as criações tecnológicas e as incontáveis técnicas e ferramentas desenvolvidas ao longo da história pelo ser humano, a inteligência artificial (IA) é, sem dúvida, uma das conquistas mais importantes já alcançadas pelo homem (MEDEIROS, 2018).

A Inteligência Artificial é uma técnica de simulação cognitiva que imita as estruturas e os mecanismos de raciocínio utilizados pelo ser humano, inspirada em conceitos desenvolvidos na modelagem cognitiva, utiliza os formalismos de representação de estruturas de domínio da Inteligência Artificial, que é um vasto campo que contém diversos componentes importantes, como as Redes Neurais Artificiais que consistem em uma estrutura conexionista, na qual o processamento é distribuído por um grande número de pequenas unidades densamente interligadas. Este paradigma procura entender e emular as propriedades decorrentes do alto grau de paralelismo e conectividade dos sistemas biológicos (FURTADO, 2019).

Em se tratando de computação, pode-se dizer que em um neurônio é realizado o processamento sobre uma ou, geralmente, várias entradas, a fim de gerar uma saída. O neurônio artificial é uma estrutura lógico-matemática que tenta simular a forma, o comportamento e as funções de um neurônio biológico.

Apesar de todas as explicações filosóficas encontradas na literatura, não há um consenso na comunidade científica quanto a uma definição de inteligência, porém pode se dizer que, um conceito de Inteligência Artificial pode ser resumido como sendo um conjunto de técnicas e ferramentas, desenvolvida principalmente da área de computação, que estuda a construção de entidades inteligentes, que se assemelham a inteligência humana.

### 2.5.1 Redes Neurais Artificiais

De um ponto de vista diferente de linha simbólica, as redes neurais artificiais (RNA) podem ser consideradas um dos adventos mais importantes da área da inteligência artificial (IA). Seu funcionamento possibilita o aprendizado de padrões com base na complexidade da interligação de elementos mais simples que simulam o comportamento dos neurônios (MEDEIROS, 2018).

Biologicamente, os neurônios são as unidades fundamentais dos tecidos que constituem

o sistema nervoso. Cada neurônio consiste em um corpo em formato celular, também designado soma, contendo um núcleo. Do corpo da célula (Figura 2.16) partem filamentos denominados dendritos, o filamento mais longo chama-se axônio.

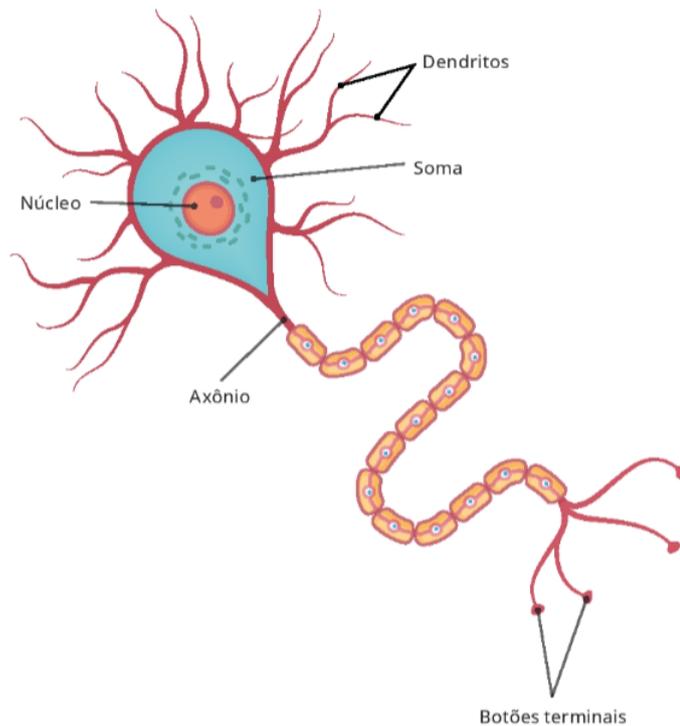


Figura 2.16: Representação de um Neurônio Biológico.  
Fonte: Medeiros (2018).

Na Figura 2.16, é possível ver os dendritos que permitem a ligação do neurônio às células circundantes. O axônio fazendo conexão com células que estão mais distantes. E todas essas conexões chamam-se sinapses. O impulso nervoso é transmitido de uma célula a outra mediante uma complicada reação eletroquímica. Substâncias químicas transmissoras são lançadas das sinapses e entram pelos dendritos, aumentando ou baixando o nível do potencial elétrico do corpo celular. Quando o potencial chega a um limiar, um pulso elétrico ou potencial de ação é enviado pelo axônio. O pulso espalha-se ao longo das conexões pelo axônio, chegando eventualmente a outras sinapses e liberando neurotransmissores no corpo de outras células.

Sinapses que incrementam o potencial de outras células são chamadas excitatórias; as que decrementam esse potencial são as inibitórias. Os neurônios, por sua vez, podem formar novas conexões de outros neurônios, e tais mecanismos formam a base para o aprendizado do cérebro. Uma rede neural biológica pode, dessa forma, ser abstraída para a simulação de seu comportamento. Assim, é possível conceituar uma rede neural artificial “como um processador maciçamente e paralelamente distribuído constituído de unidades de processamento simples, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para o uso” (MEDEIROS, 2018) (Apud Haykin, 2001, p. 28).

Todo o processamento é realizado distributivamente entre os elementos processadores da rede, onde cada qual o realiza isolada e paralelamente, enviando seu resultado para outras unidades através das conexões entre eles. Embora cada neurônio faça um processamento bastante simples, a associação os capacita a realizar problemas altamente complexos (FURTADO, 2019).

## 2.5.2 Aprendizado de Máquina

Processo de aprendizagem de Redes Neurais Artificiais podem ser descritos por cinco modos de aprendizagem mais importantes (MEDEIROS, 2018):

**1. Aprendizagem mediante correção de erros** – A informação do erro é utilizada para modificar os pesos sinápticos. Esse tipo de aprendizagem está, por exemplo, no Perceptron de Rosenblatt (1958) e no Adaline de Widrow e Hoff (1960)

**2. Aprendizagem baseada em memória** – Armazena-se um grande número de exemplos de entrada e saída, e uma amostra é comparada com a sua vizinhança, a fim de que se identifique a que classe pertence.

**3. Aprendizagem hebbiana** – Com base nos estudos de Hebb, emprega uma regra associativa, que aumenta a força dos pesos positivamente correlacionados ou diminui a daqueles negativamente correlacionados.

**4. Aprendizagem competitiva** – Os neurônios competem entre si para tornarem-se ativos. O vencedor estará ativo durante certo instante (aprendizagem também denominada *winner-takes-all*).

**5. Aprendizagem de Boltzmann** – Apresenta características estocásticas, derivando-se das ideias da mecânica estatística. Nesse caso, “os neurônios constituem uma estrutura recorrente e operam de uma maneira binária” (Medeiros (2018) Apud Haykin, 2001, p. 86), controlados por uma função de energia. A atualização dos pesos ocorre por correlação, operando em duas condições: uma presa, em que “os neurônios visíveis estão todos presos a estados específicos determinados pelo ambiente” (Medeiros (2018) Apud Haykin, 2001, p. 86); e outra livre, em que “todos os neurônios [...] podem operar livremente” (Medeiros (2018) Apud Haykin, 2001, p. 86).

A aprendizagem pode ainda ser caracterizada como supervisionada, quando há *feedback* que retorna à rede para orientar o treinamento e não supervisionada quando a rede aprende de forma auto-organizada. Entre as tarefas básicas que podem ser executadas por uma Rede Neural Artificial estão (MEDEIROS, 2018):

**1. Associação de padrões** – Quando determinado conjunto de dados deve ser associado a outro conjunto. Exemplo: compreensão de dados.

**2. Reconhecimento de padrões** – Quando um conjunto de padrões é associado a um identificado. Exemplo: reconhecimento de caracteres, reconhecimento de fala.

**3. Aproximação de funções** – Quando uma rede neural pode ser utilizada para regressão

de dados. Exemplo: previsão de comportamento de ativos da bolsa de valores.

**4. Controle** – Quando uma rede neural executa uma função de controle de um sistema de forma automatizada, monitorando o feedback proveniente de sua saída. Exemplo: sistema de frenagem.

**5. Filtragem** – Quando uma rede neural é utilizada para extração de ruído em um determinado sinal. Exemplo: filtragem adaptativa de sons.

### 2.5.3 Perceptron

O Perceptron é um dispositivo eletrônico inventado em 1957 por Frank Rosenblatt (1928-1971), psicólogo estadunidense, considerado uma espécie de “homem da Renascença, devido à sua excelência em várias áreas, incluindo [...] computação, matemática, neurofisiologia, astronomia e música“ (Medeiros (2018) Apud Rosenblatt’s Contributions, 2018, tradução nossa). O dispositivo foi construído de acordo com princípios biológicos e mostrava capacidade de aprendizado (Medeiros (2018) Apud Rosenblatt’s Contributions, 2018, tradução nossa). Rosenblatt (1958) organizou-o em três camadas de unidades (ou neurônios): sensoriais (S), associativas (A) e geradoras de respostas (R). A camada de entrada com unidades sensoriais recebe os padrões visuais, a camada com as unidades associativas relaciona as unidades de entrada com as unidades geradoras de saída, funcionando como uma camada oculta, e a camada com unidades geradoras de respostas fornecem um resultado de acordo com os padrões apresentados à camada de entrada (MEDEIROS, 2018). Representado no diagrama da Figura 2.17.

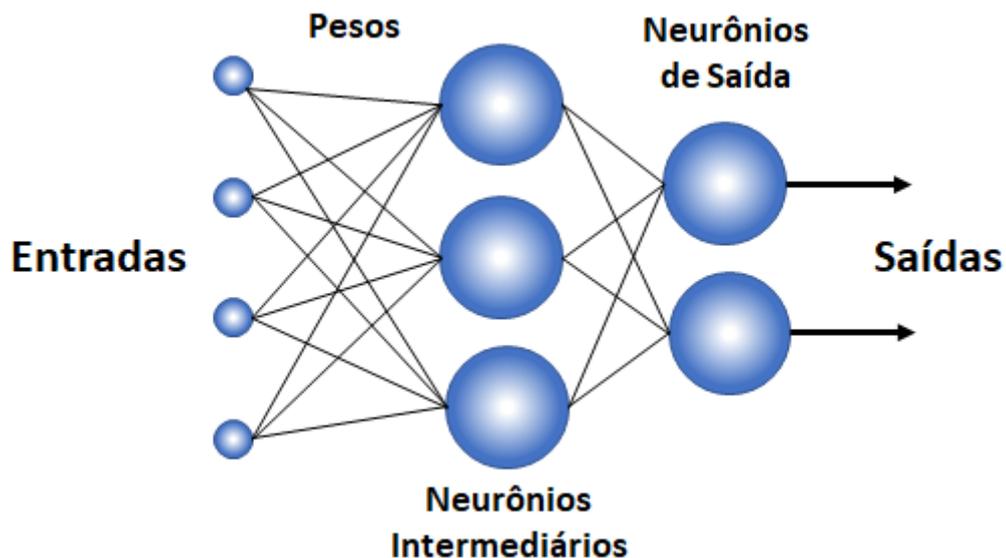


Figura 2.17: Diagrama simplificado de uma Rede Neural.

Fonte: Autor.

## 2.5.4 Métodos de Aprendizagem: Árvores de Decisão

As Árvores de Decisão estabelecem regras para tomada de decisão. O algoritmo criará uma estrutura similar a um fluxograma, com “nós” onde uma condição é verificada, e se atendida o fluxo segue por um ramo, caso contrário, por outro, sempre levando ao próximo nó, até a finalização da árvore (FRANK *et al.*, 2016).

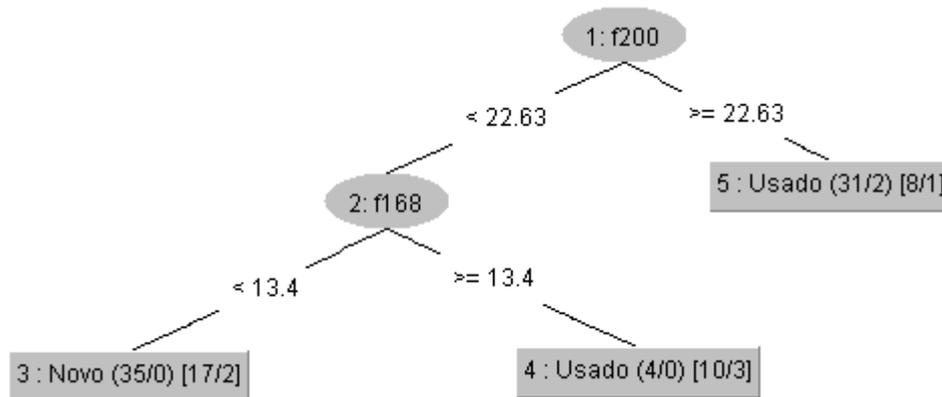


Figura 2.18: Árvore de decisão  
Fonte: Árvore gerada no WEKA.

### RandomForest:

Constrói florestas aleatórias agrupando conjuntos de árvores aleatórias.

### RandomTree:

Considera um determinado número de recursos aleatórios em cada nó, não realizando exclusões.

### REPTree:

Constrói uma árvore de decisão ou regressão usando a redução de ganho/variância de informação e exclui usando exclusão de erro reduzido. Otimizado para velocidade, ele só ordena valores para valores numéricos atributos uma vez.

### Opções de teste

O resultado da aplicação do classificador escolhido pode ser avaliado de acordo com quatro modos de teste (BOUCKAERT *et al.*, 2018):

**1. Conjunto de treino:** O classificador é avaliado em quão bem ele prediz a classe das instâncias nas quais foi treinado.

**2. Fornecer conjunto de teste:** O classificador é avaliado em quão bem ele prevê a classe de um conjunto de instâncias carregadas de um arquivo.

**3. Cross-validation:** O classificador é avaliado por validação cruzada, usando o número de dobras que são inseridas no campo de texto Dobras.

**4. Percentage split:** O classificador é avaliado em quão bem ele prevê uma certa porcentagem dos dados que são mantidos para teste.

### 3 Sistema de Aquisição de Dados

Neste capítulo, serão apresentados os materiais e abordada a metodologia utilizada para a aquisição de dados através de um dispositivo eletrônico que mede as forças de aceleração causadas pela vibração.

#### 3.1 Materiais

O dispositivo utilizado para a aquisição de dados (*datalogger*), foi desenvolvido por Marques (2021), utilizando os seguintes componentes, e interligados conforme Figura 3.1:

- Microcontrolador ESP32;
- Sensor acelerômetro ADXL355;
- Regulador de tensão MT3608;
- Bateria 3,3V.

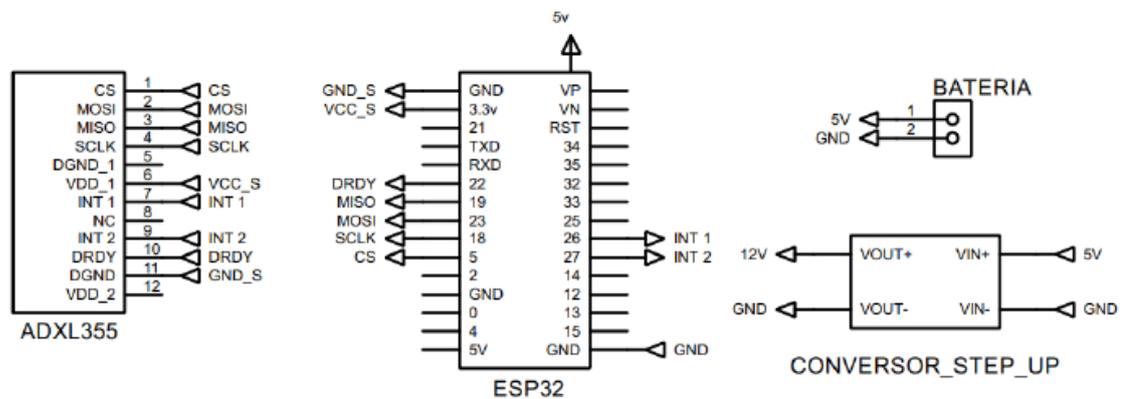


Figura 3.1: Diagrama de ligação interna do *datalogger*.  
Fonte: Marques (2021).

Existem algumas opções comerciais de equipamentos que realizam a função proposta neste trabalho, porém com limitações por questões contratuais e de mercado, por exemplo a abertura de código e dados numéricos para o usuário, que é no caso, um limitante para realização da pesquisa. Na Tabela 3.1, pode ser visto a comparação entre o sistema proposto e o *datalogger* utilizado atualmente na planta da Vale:

Tabela 3.1: Comparativo entre sistema proposto e Dynamox.

Característica	Sistema proposto em (MARQUES, 2021)	Dynamox
Código aberto	X	-
Entrega de dados numéricos	X	-
Análise através de gráficos	-	X
Acesso remoto	-	Através de gateway
Necessidade de licença de software	-	X
Classificação por diagnostico	X	-
Necessidade de rede 4G	-	X

### 3.1.1 Microcontrolador ESP32

Conforme o seu *datasheet* (ESP, 2019), o ESP32 é um microcontrolador em um único chip que combina *Wi-Fi* e *Bluetooth* de 2,4 GHz projetado por Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) com 40 nm de tecnologia de ultrabaixa potência. Ele foi projetado para alcançar o melhor desempenho de potência e RF, mostrando robustez, versatilidade e confiabilidade em uma ampla variedade de aplicações e cenários de energia. Sua pinagem é apresentada na Figura 3.2:

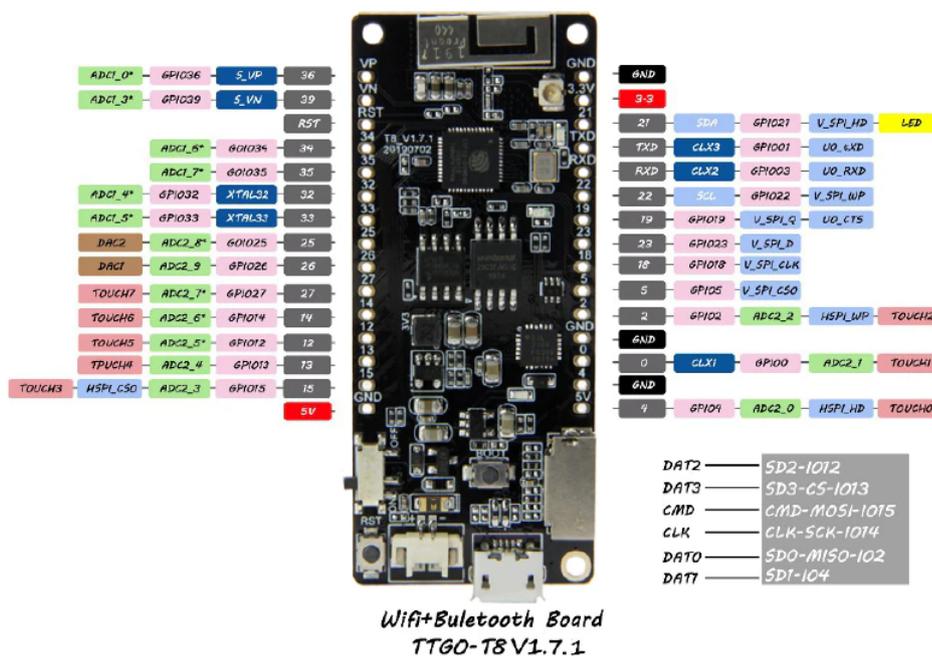


Figura 3.2: Placa Lilygo T8 com chip ESP32 (pinout)

Fonte: <https://ae01.alicdn.com/kf/HTB1OMbWKamWBuNjy1Xaq6xCbXXaU.jpg>.

### 3.1.2 Sensor acelerômetro ADXL355

De acordo com o seu *datasheet* (ANA, 2016), o ADXL355 é um sensor acelerômetro de 3 eixos que usa tecnologia Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS), com ruído baixo, estável e com baixo consumo com range selecionável. O ADXL355 adiciona três ADC de alta resolução que usam a alimentação analógica de 1,8 V como referência para fornecer saídas digitais insensíveis à tensão de alimentação. O ADXL355 oferece portas de comunicação SPI e I2C. Sua pinagem é a seguinte Figura 3.3:

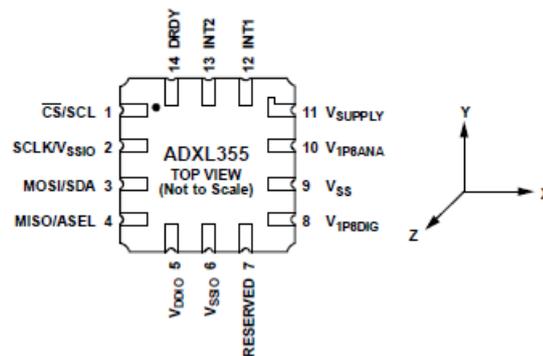


Figura 3.3: Pinagem do acelerômetro ADSL355  
Fonte: Ana (2016).

### 3.1.3 Regulador de tensão MT3608

Este é utilizado para adequar a tensão da bateria que é de 3,7V em 5V, necessária ao funcionamento do microcontrolador.

### 3.1.4 Bateria 3,3V

Foi utilizado uma bateria recarregável de celular com tensão de 3,7V e 1430mAh.

Além dos componentes indicados anteriormente, também foi utilizado um notebook e um roteador *wireless*, e sua interligação de todos os componentes foi realizada de acordo com o diagrama (Figura 3.4).

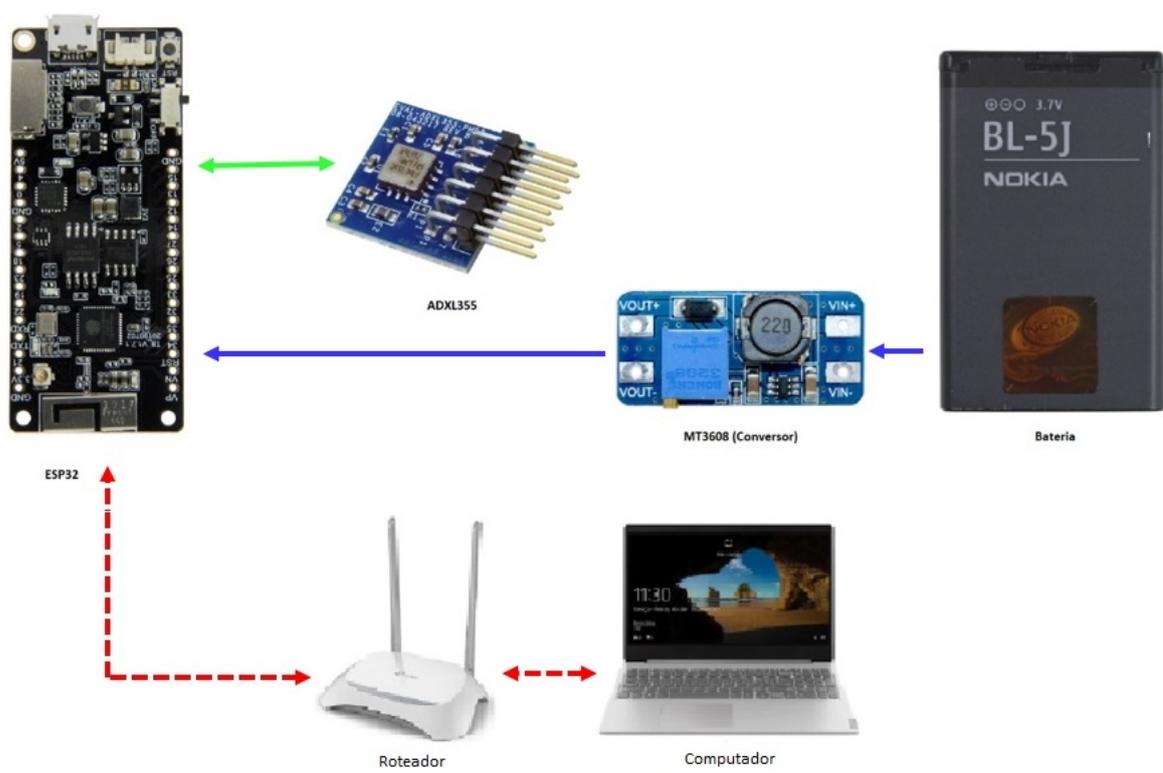


Figura 3.4: Diagrama de interligação do sistema.  
 Fonte: Marques (2021).

## 4 Método de Identificação de Falhas

Neste capítulo, será apresentada a metodologia utilizada para classificar os dados e identificar características dos rolamentos, como desgaste e ou defeitos. Para alcançar o objetivo é necessário análise dos dados através de algoritmos de aprendizagem de máquina como *Random Forest*, *ForestTree* e *REPTree*. A metodologia utilizada neste trabalho foi dividida nas seguintes etapas apresentadas no fluxograma detalhado na Figura 4.1:

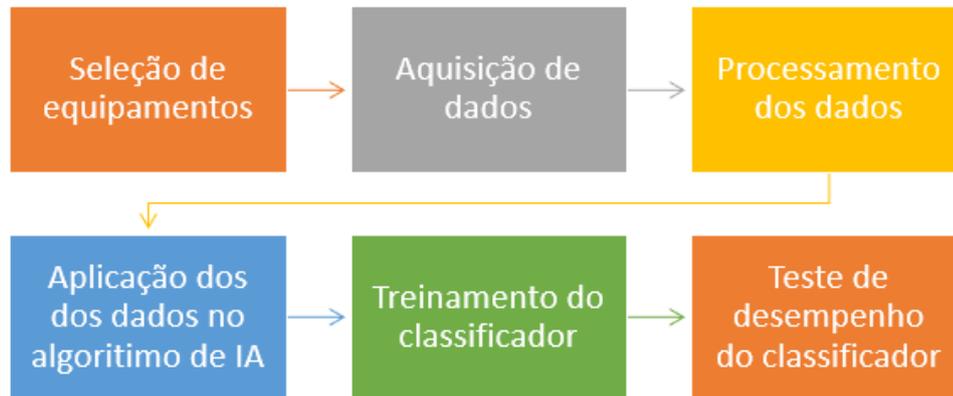


Figura 4.1: Metodologia do Trabalho.  
Fonte: Autor.

### 4.1 Seleção de Transportadores

Foi levado em consideração os seguintes critérios para a seleção dos transportadores de correia monitorados:

1. Transportadores em funcionamento;
2. Transportadores antigos;
3. Transportadores novos;
4. Transportadores semelhantes;

Com este critério, os seguintes transportadores do Terminal Marítimo Ponta da Madeira, foram selecionados conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Seleção de transportadores para coleta de dados.

Fonte: Autor.

Exp.	Transportador	Diâmetro Tambor(mm)	Motivo da escolha
1	TR-313K-80	1250	Em operação, vibração perceptível
2	TR-313K-80	1600	Em operação
3	TR-313K-84	1600	Novo em operação
4	TR-313K-84	1600	Novo em operação
5	TR-313K-84	1250	Novo em operação
6	TR-313K-84	1600	Novo em operação
7	TR-313K-85	1600	Novo em operação
8	TR-313K-85	1250	Novo em operação, rolamento silencioso
9	TR-313K-36	1600	Em operação
10	TR-313K-33	1600	Em operação
11	TR-313K-89	1800	Tambor motriz
12	TR-313K-88	1800	Tambor motriz
13	TR-313K-89	Estrutura	Medição de vibração na estrutura, TR em operação
14	TR-313K-82	1600	Tambor motriz
15	TR-313K-86	1250	Tambor motriz
16	TR-313K-86	1250	Tambor motriz, medição lateral
17	TR-313K-82	1600	Tambor de retorno
18	TR-313K-82	1600	Tambor de retorno, medição lateral

## 4.2 Aquisição de dados

Para realizar a aquisição de dados, o *datalogger* era fixado na tampa externa do mancal do transportador selecionado (de acordo com a Tabela 4.1), conforme indicado na Figura 4.2.

Após a fixação no transportador, o aparelho era ligado e conectado ao computador via roteador *wireless*, de acordo com o diagrama na Figura 3.4.

Durante a aquisição dos dados, foi decidido realizar a coletas de 10 amostras em cada rolamento de 30 segundos cada, com uma taxa de amostragem de 4 kHz. Esta seleção foi realizada através da interface web hospedada dentro da memória do *datalogger*. Com isto foram coletadas 10 amostras de 18 rolamentos, sendo o total de 180 amostras, sendo que cada amostra gera um arquivo de aproximadamente 6,1 Mb, que finalmente nos proporcionou uma quantidade de cerca 1,1 Gb de informações coletadas divididas em arquivos .csv.

A Tabela 4.2 apresenta as linhas iniciais do arquivo gerado pelo *datalogger*.

Tabela 4.2: Arquivo .csv gerado originalmente. Fonte: Autor.

num	time	x	y	z
1	41	0.297808056	10.447308612	0.254651904
2	440	0.343412784	10.535610384	-0.040248468
3	247	0.39070090800000007	10.536222528000001	-0.082486404
4	251	0.39483288	10.525510008	0.15992262000000002
5	251	0.39758752799999997	10.43169894	0.541288332
6	251	0.34127028000000004	10.363750956	0.69417129599999999
7	251	0.32336506800000003	10.260910764	0.540523152
8	251	0.334077588	10.134962136	0.17905212
9	251	0.33729134400000005	10.025235324	-0.079119612
10	251	0.303470388	9.934484976000002	-0.168951744
11	251	0.211342716	9.900051876000001	0.136508112
12	251	0.10406448	9.892247039999999	0.5587344360000001
13	251	0.007039656	9.968458968	0.809407404
14	251	-0.013926276000000001	10.040691960000002	0.703506492
15	251	0.092280708	10.088286156	0.45834282000000004
16	251	0.265976568	10.09884564	0.262762812
17	251	0.42253239600000003	10.031356764000002	0.3749382
18	251	0.531494028	9.94504446	0.665553564
19	251	0.6049513080000001	9.874035756000001	1.011720996
20	251	0.6297431400000001	9.800884548	1.060998588
21	251	0.6664717800000001	9.71472528	0.8337401280000001



Figura 4.2: Sensor Datalogger acoplado a um mancal.  
Fonte: Autor.

### 4.3 Pré-processamento dos Dados

O arquivo .csv gerado possui as seguintes informações: número do dado, intervalo de tempo e componentes de aceleração dos eixos x, y e z no tempo. Como a análise proposta no trabalho é de realizar uma classificação dos dados no domínio da frequência, ou seja, utilizando o seu espectro, é necessário realizar os seguintes passos no Excel para encontrarmos os espectros frequências que serão utilizados:

1. Separar os dados em colunas;
2. Selecionar o eixo x, por hora desconsiderar os eixos y e z;
3. Substituir os pontos por vírgulas na coluna x;
4. Utilizar a ferramenta de Análise de Dados do Excel e selecionar a Análise de Fourier;
5. Reduzir a quantidade de linhas do arquivo para 4098, este é o limite da ferramenta de Análise de Fourier utilizada;
6. Executar Análise de Fourier, direcionando o resultado para uma nova coluna;
7. A partir do resultado da análise, são criadas as colunas de frequência e amplitude;
8. Aplicado um filtro para excluir frequências de baixa amplitude;
9. Após aplicar os passos anteriores em 100 amostras, criou-se um novo arquivo .csv agrupando todos os resultados encontrados no passo 8, para ser utilizado no algoritmo de IA para teste e treino.

O arquivo .csv final, ficou com uma formação de 501 colunas e 100 linhas, sendo cada linha uma amostra de frequências de um rolamento. Como as características conhecidas precisamente eram dos rolamentos novos e usados, então, estes foram padrões escolhidos para o treinamento e teste do classificador. A Tabela 4.3 mostra os 23 primeiros valores de amostra de vibração.

Tabela 4.3: Arquivo .csv tratado. Fonte: Autor.

num	time	x	FFT Complex	FFT Frequencia	FFT Amplitude	20
1	0	0,358869	692,08541532	0,000972909	0	0
2	0,251	0,347239	5,98297532991131+0,311958	0,001945819	5,991102754	0
3	0,502	0,315101	2,05756684354655-1,898359	0,002918728	2,799526517	0
4	0,753	0,296125	1,57713513403002-2,276856	0,003891637	2,769734501	0
5	1,004	0,270415	0,737393905215721+3,81765	0,004864547	0,738381486	0
6	1,255	0,254040	2,01233909049795-5,911556	0,005837456	6,244678053	0
7	1,506	0,227258	1,11424716678758+4,084582	0,006810365	4,233835031	0
8	1,757	0,220831	0,652594735041841+3,54246	0,007783275	3,602078154	0
9	2,008	0,226646	10,2299468156387-5,670828	0,008756184	11,69658526	0
10	2,259	0,232156	5,00334606861117-1,669030	0,009729093	5,274384728	0
11	2,51	0,242409	0,911522413121747+6,34802	0,010702003	6,413134413	0
12	2,761	0,257560	-1,70120473784981-2,87792	0,011674912	3,343130991	0
13	3,012	0,275312	21,9937134268796-0,720431	0,012647821	22,00550959	22,00550959
14	3,263	0,273781	3,70692052278373+29,91995	0,013620731	30,14875617	30,14875617
15	3,514	0,282045	-1,19139981760146-10,9200	0,01459364	10,98486076	0
16	3,765	0,273016	-35,463654284144-28,92383	0,015566549	45,76307522	45,76307522
17	4,016	0,258325	5,10495935083344-7,584138	0,016539459	9,142197016	0
18	4,267	0,252815	30,1553003112946+4,509920	0,017512368	30,49067918	30,49067918
19	4,518	0,246388	-12,5837932829635-25,8638	0,018485277	28,76268488	28,76268488
20	4,769	0,215934	-13,7371342955527+24,7085	0,019458187	28,27053602	28,27053602
21	5,02	0,199865	11,9754242170302+11,12882	0,020431096	16,34813812	0
22	5,271	0,184867	5,12847025255004-3,204164	0,021404005	6,047137789	0
23	5,522	0,174461	4,21712138510939+3,759055	0,022376915	5,649301797	0

Observações:

1 - A quantidade de 4098 equivale a 1s de coleta de dados que é aproximadamente um período de rotação do tambor, conforme Equação 4.1 e Equação 4.3. Após as análises iniciais, será avaliado a necessidade de aumentar a quantidade de linhas ou não.

Velocidade linear típica utilizada por transportadores de correia do TMPM é:

$$V_{lin} = 4,17m/s \quad (4.1)$$

Considerando um diâmetro ( $D$ ) de tambor de:

$$D = 1,2m \quad (4.2)$$

Tempo de uma revolução do tambor, ou seja, o período ( $T$ ):

$$T = \frac{2\pi R}{V_{lin}} = \frac{\pi D}{V_{lin}} = \frac{1,2\pi}{4,17} = 0,9s \quad (4.3)$$

E a frequência ( $F$ ) é igual a:

$$F = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,9} = 1,11\text{Hz} \quad (4.4)$$

Rotação em RPM:

$$Rot = 60 \cdot F = 6,66\text{RPM} \quad (4.5)$$

2 - Para determinar as frequências básicas do rolamento foi utilizado a ferramenta online gratuita da SKF *Bearing Frequencies Calculator*, após preenchimento dos dados do rolamento no site Figura 4.3, a ferramenta apresenta todas as principais frequências. Então a partir das informações, é possível definir qual a frequência de amostragem mínima do *datalogger*.

The screenshot shows the SKF Bearing Frequencies Calculator web tool. The page title is "SKF Engineering Calculator" and the specific tool is "Bearing Frequencies Calculator". The interface is divided into several sections:

- Navigation:** Home, ABOUT, HELP.
- Overview:** Links to Overview, Bearing Frequencies Calculator, and Rotor Balance Tolerance.
- Information:** Click on an icon for an explanation; \* = Mandatory field.
- Bearing Data:** Input fields for Units (Metric selected), Bearing type\* (CRB), Pitch diameter\* (1100 mm), Rolling element diameter\* (40 mm), Number of rolling elements (per row)\* (10), Contact angle\* (0 degrees), Rotational speed\* (66 rpm), and Rotating ring\* (outer selected).
- Output:** A table of calculated frequencies.

Output	Value
Rotating frequency inner ring ( $f_i$ )	1.100 Hz
Frequency of over-rolling point on inner ring ( $f_{ip}$ )	5.700 Hz
Frequency of over-rolling point on outer ring ( $f_{op}$ )	5.300 Hz
Rotating frequency rolling element set & cage ( $f_c$ )	0.570 Hz
Rotating frequency rolling element about its axis ( $f_r$ )	15.105 Hz
Frequency of over-rolling rolling element ( $f_{rp}$ )	30.210 Hz

Figura 4.3: Ferramenta Bearing Frequencies Calculator.

Fonte: <http://webtools3.skf.com/engcalc/calculator/freqcalc/bearing/index.jsp>.

## 4.4 Treinamento e Teste dos Dados

Para verificar se seria possível classificar os dados, foram realizados testes com a base de dados formada no arquivo .csv através do software *Waikato Environment for Knowledge Analysis* (WEKA). Neste, entre outras funções, é possível testar os dados através dos algoritmos de

aprendizagem de máquina *RandomForest*, *RandomTree* e *REPTree*, e para validar os modelos, foram utilizadas as seguintes opções de teste: *Cross-validation Folds 10* e *Percentage split*.

O teste apresentará resultados comparativos entre os dados coletados no domínio da frequência, e no domínio da frequência com filtragem de baixas frequências.

Por fim será realizada comparação entre os resultados.

## 5 Resultados e Discussões

Esta seção apresenta os resultados dos testes realizados para avaliação da metodologia.

Foram realizados dois testes sendo o primeiro com todas as frequências referentes a um período de cada amostra de cada rolamento, e um segundo com as mesmas características porém com filtragem das frequências com menores amplitudes e menos significantes.

Com cada banco de dados com frequências, foram realizados 10 testes com cada um dos classificadores, *RandomForest*, *RandomTree* e *REPTree*, com a opção *Cross-validation Folds* 10, e mais 10 testes com cada um dos mesmos classificadores com a opção *Percentage split* 70. Para verificar a constância da acurácia, foi realizada a variação das *seeds* de 1 a 10. A seguir os resultados:

### 5.1 Avaliação comparativa no domínio da frequência:

A Figura 5.1 mostra a distribuição dos valores de média, mediana e desvio padrão com a opção de teste *Cross-validation Folds* 10:

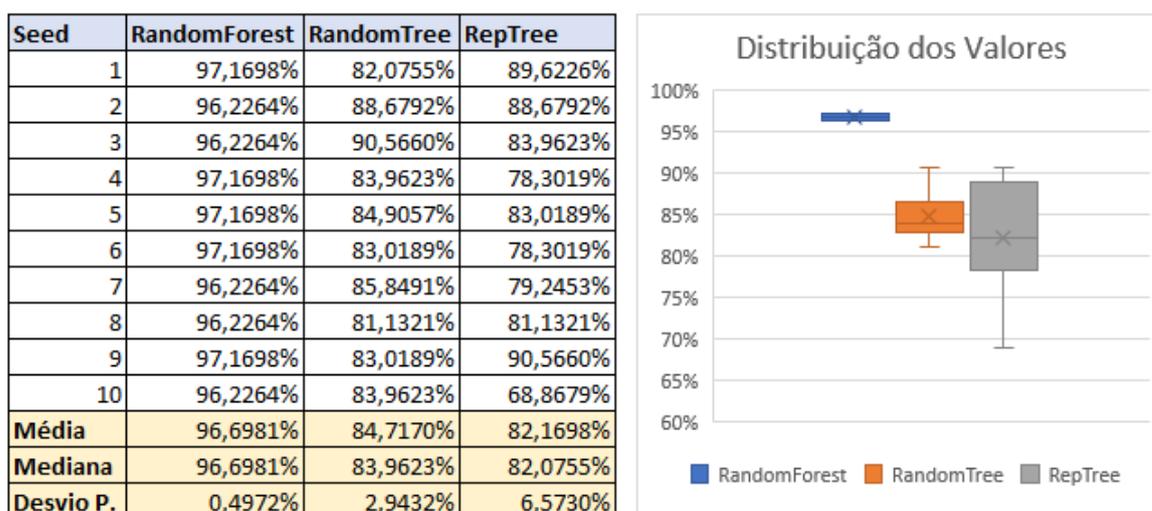


Figura 5.1: Avaliação de média, mediana e desvio padrão do Teste 1, com *Cross-validation Folds* 10. Fonte: Autor.

A Figura 5.2 mostra a distribuição dos valores de média, mediana e desvio padrão com a opção de teste Percentage split 70:

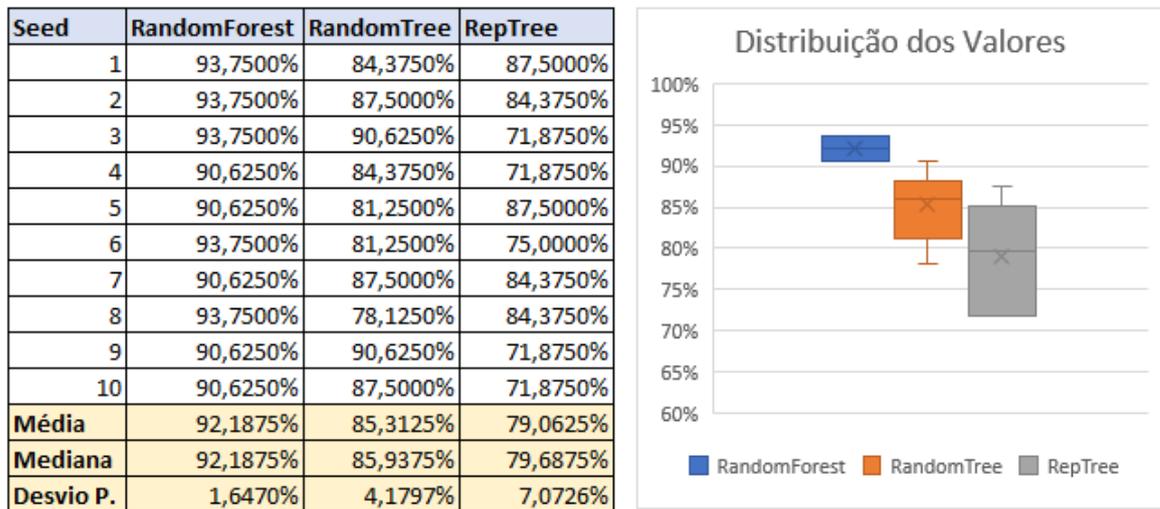


Figura 5.2: Avaliação de média, mediana e desvio padrão do Teste 1, com Percentage split 70. Fonte: Autor.

## 5.2 Avaliação comparativa no domínio da frequência com filtro:

A Figura 5.3 mostra a distribuição dos valores de média, mediana e desvio padrão com a opção de teste Cross-validation Folds 10:

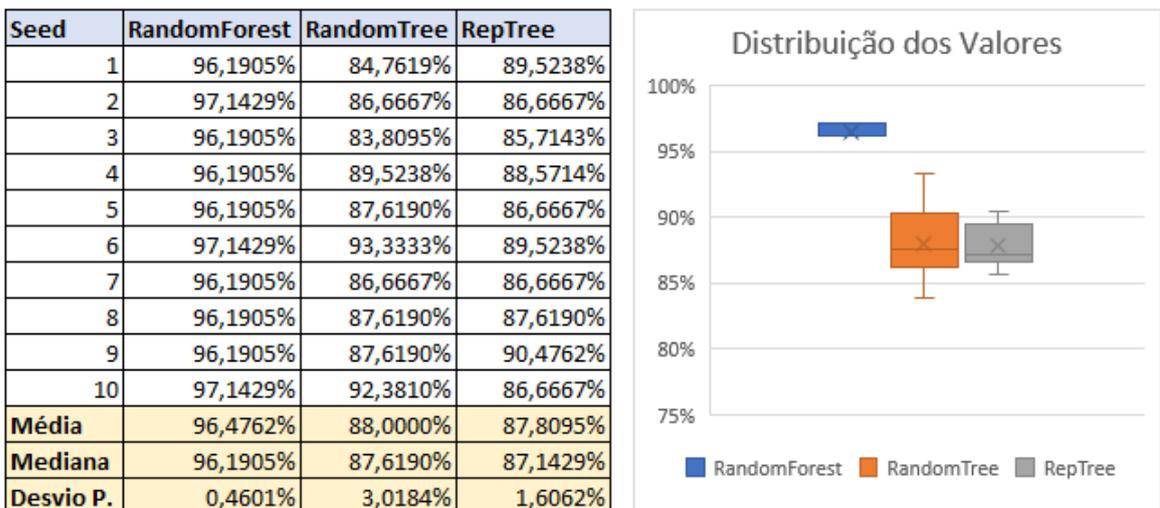


Figura 5.3: Avaliação de média, mediana e desvio padrão do Teste 2, com Cross-validation Folds 10. Fonte: Autor.

A Figura 5.4 mostra a distribuição dos valores de média, mediana e desvio padrão com a opção de teste Percentage split 70:

Seed	RandomForest	RandomTree	RepTree
1	93,5484%	90,3226%	90,3226%
2	93,5484%	64,5161%	93,5484%
3	93,5484%	74,1935%	87,0968%
4	93,5484%	87,0968%	90,3226%
5	93,5484%	87,0968%	83,8710%
6	93,5484%	83,8710%	77,4194%
7	93,5484%	83,8710%	90,3226%
8	93,5484%	87,0968%	90,3226%
9	93,5484%	77,4194%	77,4194%
10	93,5484%	87,0968%	93,5484%
<b>Média</b>	93,5484%	82,2581%	87,4194%
<b>Mediana</b>	93,5484%	85,4839%	90,3226%
<b>Desvio P.</b>	0,0000%	7,9381%	5,9772%

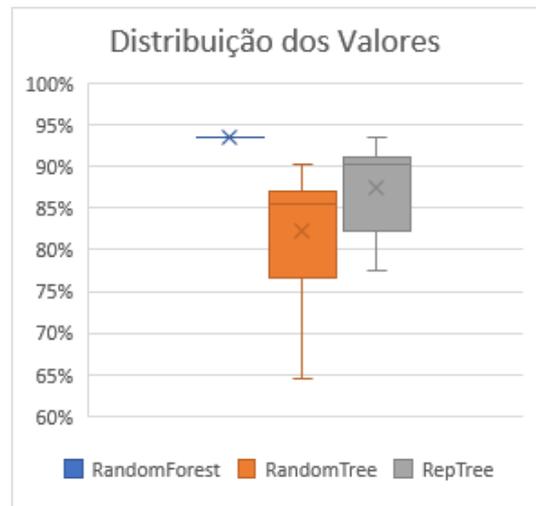


Figura 5.4: Avaliação de média, mediana e desvio padrão do Teste 2, com Percentage split 70. Fonte: Autor.

### 5.3 Resultados Gerais

Observando os resultados encontrados de média, mediana e desvio padrão, é verificado que os melhores resultados são encontrados com o classificador *RandomForest*, então, classificamos a eficiência de cada algoritmo de teste na ordem da Tabela 5.1 com base no *RandomForest*:

Tabela 5.1: Comparação entre resultado das médias, medianas e desvios padrão. Fonte: Autor.

Media			
Ordem	Dado	Tipo Testes	RandomForest
1	Freq. Full	Cross-validation 10	96,6981%
2	Freq. Filtro	Cross-validation 10	96,4762%
3	Freq. Filtro	Percentage split 70	93,5484%
4	Freq. Full	Percentage split 70	92,1875%
Mediana			
Ordem	Dado	Tipo Testes	RandomForest
1	Freq. Full	Cross-validation 10	96,6981%
2	Freq. Filtro	Cross-validation 10	96,1905%
3	Freq. Filtro	Percentage split 70	93,5484%
4	Freq. Full	Percentage split 70	92,1875%
Desvio Padrão			
Ordem	Dado	Tipo Testes	RandomForest
1	Freq. Filtro	Percentage split 70	0,0000%
2	Freq. Filtro	Cross-validation 10	0,4601%
3	Freq. Full	Cross-validation 10	0,4972%
4	Freq. Full	Percentage split 70	1,6470%

Os resultados obtidos apontam que a classificação mais precisa é realizada com a frequência completa e teste Cross-validation 10, os demais testes mostram resultados abaixo de 90% de acerto e desvio padrão alto, ou seja, possuem menor acerto nas classificações.

Outro ponto observado é que a classificação do sinal filtrado ficou pouco abaixo do resultado com o sinal completo, porém, demanda menor necessidade computacional e menor necessidade de armazenamento, portanto, é uma opção a se considerar para um projeto futuro.

## 5.4 Discussões

Parte importante do tratamento dos dados foi a transformação dos dados de aceleração que estavam no domínio do tempo e deveriam ser convertidos para o domínio da frequência, e isto foi realizado através da Transformada de Fourier. Utilizar os dados no domínio do tempo geram resultados pouco satisfatórios de classificação, de acordo com Ericeira (2019).

Depois da seleção de amostras, correções dos dados, transformações de domínio e filtros, foi criado um arquivo, que podemos chamar de banco de dados, com as informações que foram utilizadas para treinar e testar a rede neural que faria a classificação dos dados.

No momento da coleta de dados, não foi possível identificar defeitos nos rolamentos, portanto, a classificação pode utilizar somente as informações de novo ou usado. Com isto não foi possível indicar um diagnóstico do equipamento.

Quanto maior for o banco de dados com informações sobre estado e defeitos de rolamentos, mais precisa e diversificada pode ser a determinação da condição. Para termos informações mais diversificadas para o banco de dados podemos preenchê-lo de três maneiras:

- 1 - Através da informação de quando o equipamento for instalado novo, daí passamos a ter uma informação de origem boa;
- 2 - Através de um diagnóstico feito por uma inspeção interna no equipamento;
- 3 - Com a criação de uma informação baseada nos manuais e literatura do equipamento.

Depois dos testes concluímos que apesar de não possuímos os dados sobre defeitos, é possível classificar equipamentos de acordo com suas condições físicas através de suas vibrações.

## 6 Trabalhos Futuros

No desenvolvimento do trabalho, foi percebida a oportunidade de continuação através de algumas melhorias, com o objetivo de tornar a aplicação mais automatizada. Entre outras possibilidades, foi percebida a grande necessidade em se automatizar o pré-processamento dos dados para depois serem processados no algoritmo de IA, sendo que todo algoritmo de organização e classificação pode ser incorporação no hardware do equipamento de medição de vibração, como é apresentado na representação da Figura 6.1.

Com isto, é sugerido duas possibilidades:

- 1 – Incorporar no hardware do *datalogger* todo o pré-processamento;
- 2 - Desenvolver aplicativo para celular com todo algoritmo de pré-processamento e rede neural, com comunicação com banco de dado em servidor na nuvem, o resultado do diagnostico apresentado na tela do celular. Neste caso a aplicação se torna portátil.
- 3 - Desenvolvimento de novo hardware com baixo custo, produção em escala, baixo consumo de energia e conexão *bluetooth low energy*, com a aplicação de pré-processamento interna, para montagem em grande escala na maioria dos equipamentos da planta.

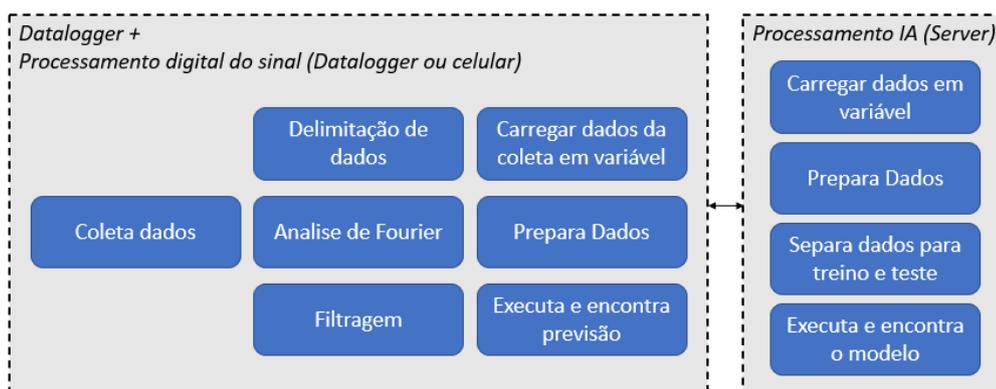


Figura 6.1: Modelo de teste, trabalho futuro.

Fonte: Autor.

# Referências Bibliográficas

- Low Noise, Low Drift, Low Power, 3-Axis MEMS Accelerometers*. Analog Devices, 2016. Rev. 0.
- BOUCKAERT, R. R., FRANK, E., HALL, M., et al.. *WEKA Manual for Version 3-9-3*. University of Waikato, 2018.
- COUNCIL, N. R. *Evolutionary And Revolutionary Technologies For Mining*. National Academy Press, 2002.
- CURI, A. *Lavra de Minas*. Oficina de Textos, 2017.
- EDUARDO, E. C. “**Aplicações da Transformada de Fourier em Soluções Numéricas de Sistemas Periódicos em Mecânica**”, *Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”*, 2018.
- ELETROBRÁS, PROCEL, CNI. *Instrumentação e Controle: Guia básico*. Procel, 2008.
- ERICEIRA, D. R. *Detecção Automática de Defeitos em Rolos de Transportadores de Correia Utilizando Sensoriamento Ultrassônico*. UFOP/ITV, 2019.
- Microcontroller ESP32 2.4Ghz Wi-Fi and Bluetooth combo chip*. Espressif Systems, 2019. Rev. 3.0.
- FRANK, E., HALL, M. A., WITTEN, I. H., et al.. *The WEKA Workbench*. Morgan Kaufmann, 2016.
- FURTADO, M. I. V. *Redes Neurais Artificiais: Uma Abordagem Para Sala de Aula 2ª Edição*. Atena, 2019.
- GEROMEL, J. C., DEAECTO, G. S. *Análise Linear de Sinais - Teoria, ensaios práticos e exercícios*. Blucher, 2019.
- HAUPT, A., ÉDISON, D. *Eletrônica Digital*. Blucher, 2018.
- KITAI, M., KOBAYASHI, T., FUJIWARA, H., et al.. “**A Framework for Predicting Remaining Useful Life Curve of Rolling Bearings Under Defect Progression Based on**

**Neural Network and Bayesian Method”, *IEEE Access*, v. 9, pp. 62642–62652, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3073945.**

MARQUES, M. N. ***Manipulação Aérea: Aplicação de Vants para Medição de Vibrações Mecânicas***. UFOP/ITV, 2021.

MEDEIROS, L. F. D. ***Inteligência Artificial Aplicada: Uma abordagem introdutória***. Inter-saberes, 2018.

NASCIMENTO, B. ***Análise de vibração em máquinas industriais.: Aprenda a analisar e a diagnosticar falhas***. 2020.

SKF. ***Manual de Manutenção de Rolamentos da SKF***. SKF, 2012.

SWINDERMAN, P. R. T., MARTI, A. D., GOLDBECK, L. J., et al.. ***FOUNDATIONS: The Pratical Resource for Cleaner, Safer, More Productive Dust Material Control 4nd Edition***. Martin, 2013.

TOCCI, R. J., WIDMER, N. S., MOSS, G. L. ***Sistemas Digitais Princípios e Aplicações 10ª Edição***. Person, 2007.

TORRES, M. D., CARVALHO, R. M. B., SANTOS, S. ***Transportador de Correia - Curso Básico***. Vale, 2000.

VALE. ***Nossa História***. Verso Brasil Editora, 2012.