

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL – UCS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA REGIÃO DOS VINHEDOS – CARVI
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

VANDERLEI DEFENDI

**SISTEMA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA APLICADO A COMPRESSORES
RADIAIS INDUSTRIAIS UTILIZANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÃO**

**BENTO GONÇALVES
2020**

VANDERLEI DEFENDI

**SISTEMA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA APLICADO A COMPRESSORES
RADIAIS INDUSTRIAIS UTILIZANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao Centro de Ciências Exatas, da Natureza e de Tecnologia da Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Professor Me. Patric Janner Marques

**BENTO GONÇALVES
2020**

VANDERLEI DEFENDI

**SISTEMA DE MANUTENÇÃO PREDITIVA APLICADO A COMPRESSORES
RADIAIS INDUSTRIAIS UTILIZANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao Centro de Ciências Exatas, da Natureza e de Tecnologia da Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em _____ de _____ de _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Patric Janner Marques
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Felipe Augusto Tondo
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof^a. Dr^a. Marilda Machado Spindola
Universidade de Caxias do Sul - UCS

*“Prefiram a minha instrução à prata,
e o conhecimento ao ouro puro,
pois a sabedoria é mais preciosa do que rubis;
nada do que vocês possam desejar
compara-se a ela.”*

Provérbios 8:10-11

RESUMO

No mercado competitivo de hoje, os custos de produção, o prazo de entrega e a eficiência da máquina são valores cruciais para as empresas. Diante disso, se faz necessário a utilização de técnicas de manutenção que sejam capazes de identificar com antecedência os defeitos, evitando assim as paradas inoportunas e desnecessárias dos equipamentos. Logo, este trabalho tem como objetivo a implementação de um sistema de manutenção preditiva, aplicado a compressores radiais, utilizando técnicas de análise de vibração no diagnóstico de falhas mecânicas, auxiliando assim, no planejamento e controle da manutenção do equipamento. Com o propósito de extrair aos valores de vibração do equipamento monitorado, foram instalados acelerômetros microeletromecânicos (MEMs) MPU 9250 e fixados em locais próximos aos rolamentos do compressor. O processamento dos dados, implementação dos algoritmos matemáticos utilizados na análise de vibração e a interface entre os acelerômetros e o sistema de monitoramento, é feito através do microcomputador Raspberry Pi 3 B. Foram inseridas alterações insipientes e falhas que poderiam comprometer o funcionamento do equipamento e através das simulações de falhas foi possível extrair os dados relacionados as condições reais do equipamento e avaliar o comportamento do sistema em caso de falha no compressor. O acompanhamento do equipamento é feito através do sistema integrado de monitoramento Zandei (SIMZ), onde foram determinados parâmetros de referência, com valores limites, e quando estes valores são ultrapassados, o sistema envia mensagens para o setor de manutenção, indicando que o equipamento está apresentando algum defeito. Desta forma, o sistema pode ser utilizado como uma ferramenta de auxílio na gestão do setor de manutenção, proporcionando uma programação mais adequada de manutenção na empresa.

Palavras Chaves: Manutenção preditiva; Análise de vibração; Acelerômetros MEMs MPU 9250; Raspberry Pi 3 B.

ABSTRACT

In today's competitive market, production costs, lead times and machine efficiency are crucial values for companies. Therefore, it is necessary to use maintenance techniques that are able to identify defects in advance, thus avoiding untimely and unnecessary equipment stops. Therefore, this work aims to implement a predictive maintenance system, applied to radial compressors, using vibration analysis techniques in the diagnosis of mechanical failures, thus helping in the planning and control of equipment maintenance. In order to extract the vibration values of the monitored equipment, microelectromechanical accelerometers (MEMs) MPU 9250 were installed and fixed in places close to the compressor bearings. The data processing, implementation of the mathematical algorithms used in the vibration analysis and the interface between the accelerometers and the monitoring system, is done through the Raspberry Pi 3 B microcomputer. Insipient changes and failures that could compromise the equipment's operation and through the simulations of failures it was possible to extract the data related to the real conditions of the equipment and to evaluate the behavior of the system in case of compressor failure. The monitoring of the equipment is done through the integrated monitoring system Zandei (SIMZ), where reference parameters were determined, with limit values, and when these values are exceeded, the system sends messages to the maintenance sector, indicating that the equipment is showing any defect. In this way, the system can be used as an aid tool in the management of the maintenance sector, providing a more adequate maintenance schedule in the company.

Keywords: Predictive maintenance, Vibration analysis, MEMs MPU 9250 accelerometers, Raspberry Pi 3 B.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Evolução da Falha..... | 16 |
| Figura 2– Esquema básico de medição de vibrações. | 19 |
| Figura 3– Movimento harmônico simples..... | 20 |
| Figura 4 – Relação entre as grandezas de deslocamento, velocidade e aceleração..... | 22 |
| Figura 5– Transdutor de deslocamento sem contato | 24 |
| Figura 6 – Transdutor de velocidade | 25 |
| Figura 7– Acelerômetro Piezelétrico | 27 |
| Figura 8 – Estrutura típica de acelerômetro MEMS piezorresistivo | 28 |
| Figura 9 – Estrutura básica - acelerômetro iMEMS da família ADXL (Analog Devices) | 29 |
| Figura 10 – Valores global do sinal de vibração | 31 |
| Figura 11 – Fator de crista..... | 33 |
| Figura 12 – Transformada de Fourier aplicada em um sinal de vibração | 35 |
| Figura 13 – Esquema do Sistema de Monitoração | 38 |
| Figura 14 – Sistema de Monitoramento de Condições..... | 40 |
| Figura 15 – Diagrama de blocos representando as etapas do projeto | 43 |
| Figura 16 – Compressor Radial..... | 45 |
| Figura 17 – Diagrama de aplicação simplificado TCA9548A | 48 |
| Figura 18 – Painel elétrico..... | 49 |
| Figura 19 – Diagrama de blocos representando interface de recepção e manipulação dos valores de vibração..... | 50 |
| Figura 20 – Diagrama de blocos representando a modelagem matemática | 51 |
| Figura 21 – Sinal de vibração no tempo, eixo Z do sensor 01 | 52 |
| Figura 22 – FFT do sinal de vibração, eixo Z do sensor 01 | 53 |
| Figura 23 – Sistema Integrado de Monitoramento Zandei | 54 |
| Figura 24 – Banco de dados dos alarmes | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 – Cadeia de blocos | 56 |
| Figura 26 – Cadeia de blocos de alarmes de parâmetros..... | 56 |
| Figura 27 – Mensagem de alarme recebida por e-mail | 57 |
| Figura 28 – Desbalanceamento eixo do motor | 59 |
| Figura 29 – FFT do sinal em condição normal, eixo X do sensor 03..... | 60 |
| Figura 30 – FFT do sinal falha 01, desbalanceamento eixo tampa traseira..... | 61 |
| Figura 31 – FFT do sinal falha 02, desbalanceamento eixo turbina..... | 61 |
| Figura 32 – Desbalanceamento da ventoinha | 62 |
| Figura 33 – FFT do sinal, em condição normal (a) e desbalanceamento da turbina (b) | 63 |
| Figura 34 – Turbina do compressor..... | 64 |
| Figura 35 – FFT do sinal, em condição normal (a) e turbina frouxa (b)..... | 65 |
| Figura 36 – Tampa frontal do compressor..... | 66 |
| Figura 37 – FFT do sinal, em condição normal (a) e folga na tampa frontal do compressor (b) | 67 |
| Figura 38 – Rolamento do compressor..... | 68 |
| Figura 39 – Sinal de vibração domínio do tempo, falha 06 (a) e falha 07 (b)..... | 70 |
| Figura 40 – FFT do sinal de vibração falha 06 (a) e falha 07 (b)..... | 71 |
| Figura 41 – Gráfico representando as condições de funcionamento do compressor..... | 72 |
| Figura 42 – Alterações do FFT em caso de falha | 73 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Estratégias de manutenção..... | 18 |
| Tabela 2 – Comparação entre as plataformas de aquisição de sinal..... | 30 |
| Tabela 3 – Severidade de vibração | 32 |
| Tabela 4 – Relação entre variáveis e causas de vibração | 37 |
| Tabela 5 – Principais características presentes no acelerômetro MPU-9250 | 46 |
| Tabela 5 – Dados do compressor em condições normais de funcionamento | 52 |
| Tabela 7 – Valores em condições de desbalanceamento do eixo, falha 01 e 02 | 60 |
| Tabela 7 – Valores em condições de falha 03, desbalanceamento da ventoinha | 62 |
| Tabela 8 – Valores em condições de falha 04, turbina de sucção frouxa..... | 64 |
| Tabela 9 – Valores em condições de falha 05, folga na tampa frontal do compressor | 66 |
| Tabela 10 – Valores em condições de falha no rolamento, inicial 06 e avançada 07 | 69 |
| Tabela 11 – Valores RMS normais e limites para alarme de falha | 72 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|--------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AC | <i>Alternating Current</i> |
| ADC | <i>Analog-to-Digital Converter</i> |
| ARMA | <i>Advanced RISC Machine</i> |
| CI | <i>Integrated Component</i> |
| CLP | Controlador Lógico Programável |
| CMS | Sistemas de Monitoramento de Condições |
| CV | Cavalo Vapor |
| CoAP | <i>Constrained Application Protocol</i> |
| DC | <i>Continuous Current</i> |
| EEPROM | <i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i> |
| FC | Fator de Crista |
| FFT | <i>Fast Fourier Transform</i> |
| GPIO | <i>General Purpose Input/Output</i> |
| HTTP | <i>Hypertext Transfer Protocol</i> |
| HDMI | <i>High-Definition Multimedia Interface</i> |
| I2C | <i>Inter Integrated Circuit</i> |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| ICSP | <i>In Circuit Serial Programming</i> |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| IoT | <i>Internet of Things</i> |
| LAN | <i>Local Area Network</i> |
| LPDDR | <i>Low-Power Double Data Rate Synchronous Dynamic Random</i> <i>Access Memory</i> |
| LSB | <i>Least Significant bit</i> |
| MQTT | Message Queuing Telemetry Transport |
| MEMS | <i>Microelectromechanical Systems</i> |
| NBR | Norma Brasileira |
| RPM | Rotações por Minuto |
| RMS | <i>Root mean square</i> |
| SIMZ | Sistema Integrado de Monitoramento Zandei |

| | |
|-------|---|
| SDRAM | <i>Synchronous dynamic random-access memory</i> |
| SKF | <i>Svenska KullagerFabriken</i> |
| SRAM | <i>Static Random Access Memory</i> |
| USB | <i>Universal Serial Bus</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 1.1 | OBJETIVO GERAL | 14 |
| 1.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 14 |
| 1.3 | APRESENTAÇÃO DO TRABALHO..... | 15 |
| 1.4 | ESCOPO E RESTRIÇÕES | 15 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO..... | 16 |
| 2.1 | EVOLUÇÃO DA FALHA | 16 |
| 2.2 | MANUTENÇÃO INDUSTRIAL | 17 |
| 2.2.1 | Estratégias de manutenção..... | 18 |
| 2.3 | MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES | 19 |
| 2.3.1 | Vibrações mecânicas | 20 |
| 2.3.2 | Transdutores de vibração..... | 22 |
| 2.3.2.1 | Transdutores de Deslocamento | 23 |
| 2.3.2.2 | Transdutores de Velocidade..... | 24 |
| 2.3.2.3 | Acelerômetros | 25 |
| 2.3.2.3.1 | Acelerômetros Piezelétricos | 26 |
| 2.3.2.3.2 | Acelerômetros Piezorresistivos | 27 |
| 2.3.2.3.3 | Acelerômetros Capacitivos | 28 |
| 2.3.3 | Plataformas de aquisição e tratamento de dados dos sensores..... | 29 |
| 2.4 | TÉCNICAS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO | 30 |
| 2.4.1 | Nível Global | 30 |
| 2.4.2 | Severidade..... | 31 |
| 2.4.3 | Fator De Crista (FC)..... | 33 |
| 2.4.4 | Análise Espectral..... | 34 |
| 2.4.5 | Medição de vibração como ferramenta para manutenção preditiva | 35 |
| 2.4.5.1 | Detecção da falha | 35 |
| 2.5 | TRABALHOS RECENTES RELACIONADOS COM O SISTEMA PROPOSTO | 37 |
| 3 | DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO | 42 |
| 3.1 | METODOLOGIA DE PROJETO..... | 42 |
| 3.2 | SISTEMA DE MEDIÇÃO | 44 |
| 3.2.1 | Compressor Radial | 44 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 3.2.2 | Definição do sensor a ser utilizado | 46 |
| 3.2.2.1 | Acelerômetro MPU-9250..... | 46 |
| 3.3 | PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO/RECEPÇÃO E TRATAMENTO DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO | 48 |
| 3.4 | PROCESSAMENTO MATEMÁTICO | 51 |
| 3.5 | VALORES DE REFERÊNCIA | 52 |
| 3.6 | SISTEMA DE MONITORAMENTO | 54 |
| 4 | AVALIAÇÃO DO SISTEMA E ANÁLISE DOS DADOS | 58 |
| 4.1 | RESULTADOS..... | 58 |
| 4.1.1 | Desbalanceamento do eixo, tampa traseira do motor e turbina | 59 |
| 4.1.2 | Desbalanceamento da ventoinha | 62 |
| 4.1.3 | Turbina de sucção frouxa..... | 64 |
| 4.1.4 | Folga tampa frontal do compressor | 66 |
| 4.1.5 | Rolamento do compressor com falha inicial e avançada..... | 68 |
| 4.2 | DISCUSÃO DOS RESULTADOS..... | 72 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 74 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 75 |
| | ANEXOS | 79 |

1 INTRODUÇÃO

Diante das mudanças e evoluções do cenário industrial, todos os setores da indústria devem estar envolvidos na busca de ampliar os resultados positivos para as corporações. E, entre esses setores, destaca-se o de manutenção, que tem como objetivo a conservação dos ativos, bem como prezar pela segurança, disponibilidade e confiabilidade de todos os equipamentos utilizados dentro de uma empresa (FUENTES,2006).

O setor de manutenção recebe destaque, uma vez que a elaboração da estratégia de manutenção dentro da empresa deve estar embasada no gerenciamento e controle de ativos. Além disso, é necessário considerar a criticidade dos processos, optando pelo método que seja mais eficaz e adequado as expectativas de cada setor da empresa. O atendimento destes critérios visa garantir a confiabilidade e disponibilidade das máquinas e equipamentos, proporcionando eficiência e continuidade nos processos (CYRINO ,2015).

De acordo com Costa (2017), as técnicas mais comuns de manutenção ao longo de anos eram realizadas de forma empírica, pouco tecnológicas, tornando-se invasivas ao processo, e pouco programável em função de uma necessidade real de manutenção. Além do que, em alguns casos, percebem-se por vez alguns resultados negativos e inesperados dentro dos processos de manutenção das empresas, devido ao fato de serem baseadas em experiências técnicas pessoais, manuais de fabricantes ou mesmo em históricos de falhas registradas manualmente no decorrer do tempo.

Em contrapartida, com a introdução dos conceitos relacionados à Indústria 4.0, que é baseada na inclusão de tecnologias como os Sistemas Ciber-Físicos e a Internet das Coisas nos processos produtivos, houve um considerável avanço nas pesquisas sobre técnicas de manutenção voltadas à predição. Com isso, as técnicas modernas são capazes de realizar uma análise do comportamento funcional dos equipamentos, auxiliando na prevenção e evitando possíveis paradas por quebras em momentos inoportunos ou inesperados. Além disso, estas técnicas ajudam nas tomadas de decisões e programações dos setores de uma empresa, podendo, também, reduzir as perdas de produção, custos de manutenção e custos operacionais (PEREIRA; SIMONETTO,2018).

Segundo Faccin (2011), os estudos e pesquisas relacionados à manutenção preditiva buscam desenvolver sistemas capazes de obter informações sobre a condição real do equipamento, que aliados a sistemas supervisórios, proporcionam a inspeção, supervisão e controle de equipamentos e processos. E referente à obtenção das informações sobre a condição

do equipamento, Faccin (2011) destaca a importância de definir corretamente as grandezas a serem medidas, os pontos de análise e os parâmetros dentro do processo, bem como quais sensores devem ser utilizados para garantir a confiabilidade dos dados.

Como cita Cyrino (2015), a análise por vibração é comum de ser utilizada como informação de entrada em técnicas de manutenção preditiva. Isso ocorre uma vez que as máquinas e equipamentos produzem vibrações características quando estão em funcionamento. Logo, os sinais de vibração estão relacionados com os esforços dinâmicos e apresentam frequências idênticas às frequências de seus agentes excitadores. Desta forma, a obtenção de sinais vibratórios diferentes dos sinais característicos evidencia potencial desgaste ou falha no equipamento analisado.

Diante do contexto apresentado, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de manutenção preditiva, utilizando sensores acelerômetros para a extração dos sinais, com o propósito de obter as informações necessárias para identificar possíveis desgastes e falhas nos equipamentos, podendo ser utilizada como uma ferramenta de auxílio no planejamento da manutenção, proporcionando uma programação mais eficaz nos processos da empresa.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema de manutenção preditiva, aplicado a compressores radiais industriais a partir de acelerômetros, utilizando análise de vibração no diagnóstico e monitoramento de possíveis falhas mecânicas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com objetivo de atender o objetivo geral, se faz necessário a utilização de alguns objetivos específicos para a execução do sistema proposto:

- a) Definir o modelo do acelerômetro e a quantidade de sensores que serão utilizados na medição de vibração;
- b) Escolher o *hardware* adequado para aquisição, processamento dos dados e que faça a interface entre os acelerômetros e o sistema de monitoramento;

- c) Escolha e implementação dos algoritmos matemáticos que apresentem os valores de vibrações necessários para a análise do equipamento.
- d) Escolha e implementação das técnicas de análise de vibração que melhor identifiquem as falhas;
- e) Desenvolver o sistema de monitoramento e a interface que irá interagir com o setor de manutenção.
- f) Realizar ensaios necessários para a avaliação do sistema em condições de falha.

1.3 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho é apresentado na forma de capítulos, com a seguinte descrição:

- a. No capítulo 2 é descrito uma revisão bibliográfica, onde aborda os conceitos fundamentais do projeto desenvolvido;
- b. No capítulo 3 é descrito a implementação do projeto, assim relatando sua estrutura e metodologia utilizada;
- c. No capítulo 4 é apresentando os resultados obtidos através das simulações de falhas no projeto implementado, comparando os dados com os valores e referência.
- d. No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais;
- e. No capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas.

1.4 ESCOPO E RESTRIÇÕES

- a) O sistema proposto se restringirá à medição de vibrações em um compressor radial, que se encontra instalado na indústria de Plásticos Zandei;
- b) A escolha do *hardware* e o *software* estará restrita à integração entre os acelerômetros e o sistema integrado de monitoramento (SIMZ) que se encontra em funcionamento na empresa.
- c) Na análise de vibração, os sinais relacionados as falhas mecânicas, demonstram que frequências de até 120Hz são suficientes para que seja feito a análise de falha. Sendo assim, a análise de frequências superiores a 120 Hz não faz parte do escopo deste trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Com a finalidade de fundamentar a metodologia a ser utilizada no decorrer do desenvolvimento deste trabalho, a seguir serão apresentados assuntos considerados necessários para a compreensão e elaboração do estudo a ser realizado.

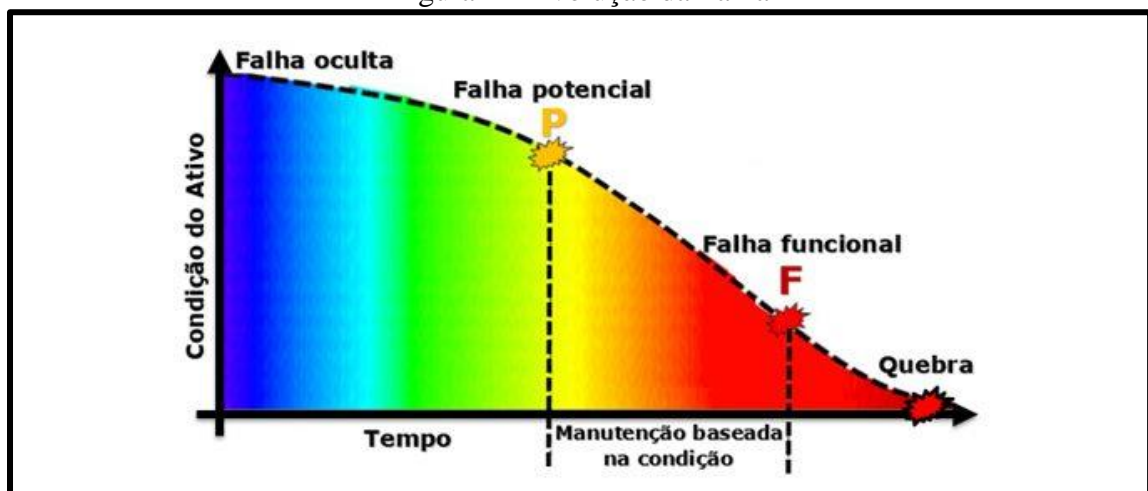
Desta forma, inicialmente se apresenta a evolução da falha para entendimento de cada estágio e das principais estratégias de manutenção. Na sequência, apresenta-se um estudo sobre os princípios básicos da vibração mecânica, os principais transdutores de vibração e as diferentes técnicas de análise de vibração. Por fim, é realizado um estudo das relações entre os parâmetros analisados nas falhas e as principais causas de vibração.

2.1 EVOLUÇÃO DA FALHA

Segundo a norma (NBR 5462:1994), um defeito é o desvio das características de um item, podendo ou não afetar a funcionalidade específica de um equipamento. Já uma falha é um evento, e este impossibilita que um determinado item de um equipamento desempenhe suas atividades. No mesmo contexto, uma quebra é um estado, e normalmente está vinculado a uma falha, sendo que a quebra é uma consequência ou evolução da falha.

Conforme descrito por Cyrino (2017), a evolução de uma falha em um equipamento ou processo passa por alguns estágios até chegar à quebra, que consiste na perda total de sua funcionalidade. A Figura 1 apresenta a evolução de uma falha ao longo do tempo, sendo que o período entre os estágios pode ser maior ou menor, dependendo da característica de cada processo ou equipamento.

Figura 1 – Evolução da Falha



Fonte: Cyrino (2017).

Segundo Cyrino (2017), a evolução da falha ao longo do tempo tem seu início na falha oculta ou invisível, conforme visto na Figura 1. Este estágio inicial da falha é quase imperceptível pelos operadores e profissionais de manutenção, podendo em alguns casos colocar em risco a continuidade do processo produtivo.

Já a falha potencial pode ser monitorada por meios de manutenção preditiva, onde já pode ser visto o desenvolvimento de degradação de itens do equipamento. Sendo assim, este é o ponto que determina a tendência de um determinado processo ou equipamento apresentar perdas funcionais.

No caso da falha funcional, ela surge quando não são entendidas e tratadas as falhas potenciais. Neste estágio, os equipamentos já apresentam deficiências em desempenhar suas tarefas operacionais previstas conforme parâmetros de projeto, afetando a funcionalidade e qualidade do processo.

Por fim, a falha total ou quebra é o último estágio do processo. Não sendo conhecidos ou tratados os estágios anteriores à falha, esta evolui até a quebra do equipamento, ou seja, neste estágio, o equipamento encerra suas operações por completo, e para restabelecer sua funcionalidade novamente, deve-se recorrer à manutenção corretiva.

2.2 MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

O conceito de manutenção surgiu na revolução industrial, quando se iniciou a substituição do trabalho humano por máquinas e as mesmas ainda desempenhavam funções simples. Neste período, a preocupação maior estava voltada ao reparo do equipamento posterior à falha, não levando em conta sua produtividade (FACCIN,2011).

Segundo a norma (NBR 5462:1994), a manutenção é uma tarefa que envolve diversos procedimentos, com o propósito de manter os processos em condições normais de funcionalidade. Já Marçal (2015), define a manutenção como sendo todas as atividades que buscam manter um equipamento ou máquina em condições ideais de funcionalidade, a fim de garantir sua confiabilidade, reduzindo sua probabilidade de falhar em momentos inesperados.

Dentro do contexto de manutenção industrial existem diversas estratégias, onde a escolha do tipo de manutenção pode ser definida perante sua característica ou relevância do processo em que o equipamento está inserido.

A seguir, serão apresentadas as principais estratégias de manutenção, bem como a demonstração de um comparativo referente às características específicas de cada manutenção apresentada por meio de tabela.

2.2.1 Estratégias de manutenção

Existem diversas estratégias de manutenção, onde são considerados alguns fatores para a sua escolha, como a importância do equipamento para o processo produtivo, suas características construtivas, e se em caso de uma falha há algum risco para as pessoas e ou meio ambiente. Marçal (2015) elenca as três principais formas de manutenção, bem como suas principais características, conforme pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Estratégias de manutenção

| | Manutenção Corretiva | Manutenção Preventiva | Manutenção Preditiva |
|---------------------------------------|-----------------------------|---|---------------------------------|
| Estado de funcionamento da máquina | fora de serviço | fora de serviço | em serviço ou fora |
| Motivo da intervenção | Falha | inspeção programada | controle programado ou contínuo |
| Tarefas a serem realizadas na máquina | troca de componentes | desmontagem para inspeção e troca de componentes | medições |
| Objetivo da intervenção | retorno ao serviço | garantir o funcionamento por um determinado período | predizer e detectar falhas |

Fonte: Adaptado de Marçal (2015).

A manutenção corretiva é a técnica de manutenção efetuada após a ocorrência de uma falha, e destina-se a recolocar um item em condições de executar suas funções normais (NBR 5462:1994). Já Marçal (2015), descreve a manutenção corretiva como uma atividade que tem como objetivo restabelecer a funcionalidade de um equipamento que esteja comprometido ou parado em consequência de uma falha.

Conforme Marçal (2015), a manutenção preventiva é caracterizada por tarefas planejadas em intervalos de tempos bem definidos, com a intenção de inspecionar e substituir peças ou componentes, a fim de garantir sua funcionalidade por um determinado período. Uma manutenção dita preventiva é aquela efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com

critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item (NBR 5462:1994).

As formas mais modernas de manutenção, como no caso da manutenção preditiva, visam garantir uma qualidade de serviço desejado, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva (NBR 5462:1994).

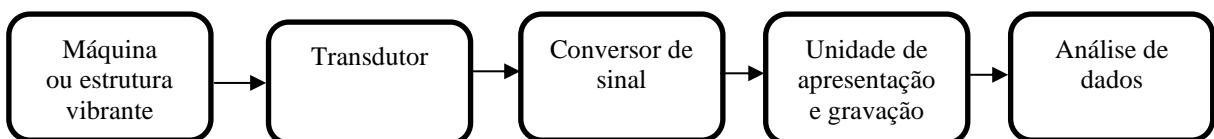
Conforme destaca Telang (2010), a manutenção preditiva é uma técnica utilizada com o propósito de fazer acompanhamento de determinado equipamento ou processo, onde através de dados extraídos é possível monitorar as condições físicas dos equipamentos, e assim auxiliar nas decisões e ações da manutenção.

De acordo com LLK (2019), na manutenção preditiva podem ser destacados alguns métodos de análise que auxiliam na antecipação do diagnóstico de defeitos e falhas. Entre eles estão a termografia, que consegue antecipar de 3 a 12 semanas a detecção de uma falha. A análise de partículas metálicas pode antecipar detecção da falha de 1 a 6 meses e a análise de vibração, quando utilizada no monitoramento de equipamentos industriais, consegue antecipar de 1 a 9 meses a detecção de uma falha potencial.

2.3 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES

De acordo com Balbinot e Brusamarello (2019), o processo de medição de vibrações mecânicas passam por diversos estágios, conforme apresentado na Figura 2. No início deste processo se faz necessária a identificação de um determinado fenômeno vibratório, e por meio da introdução de um transdutor de vibração, que tem como função converter a vibração mecânica em sinal elétrico, é possível à amplificação deste sinal para que o mesmo possa ser processado e armazenado se necessário, possibilitando assim, que seja feito a análise.

Figura 2– Esquema básico de medição de vibrações.



Fonte: Adaptado de Balbinot e Brusamarello (2019).

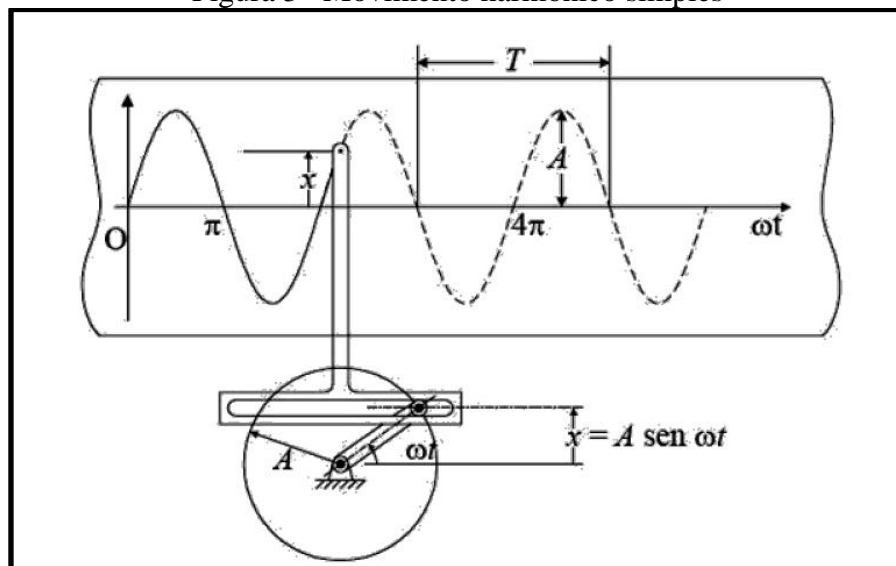
Com a intenção de melhor compreender as etapas apresentadas na Figura 2 e citadas pelo autor, serão abordadas nos capítulos a seguir as informações pertinentes na medição de vibração.

2.3.1 Vibrações mecânicas

As vibrações mecânicas podem ser descritas como movimentos oscilatórios resultantes de uma força aplicada em um ponto, ou em torno de uma posição de referência. Estes movimentos podem ser caracterizados através dos termos deslocamento, velocidade e aceleração (MARÇAL,2000).

De acordo com Jesus (2010), o deslocamento é a distância percorrida por uma massa em relação à sua posição de repouso, podendo o deslocamento ser caracterizado como um movimento harmônico simples, sendo a forma mais simples de vibração. O autor representa de forma ilustrativa na Figura 3, o movimento oscilatório característico gerado por vibrações de um sistema rotativo. Estas vibrações estão representadas através da trajetória de um braço imaginário, que descreve o movimento harmônico do sistema rotativo em função do tempo.

Figura 3– Movimento harmônico simples



Fonte: Jesus (2010).

De acordo com Marçal (2000), o movimento harmônico simples, quando analisado em função do tempo, pode ser representado por uma função senoidal, podendo ser expresso conforme Equação 1:

$$x(t) = A \sin(\omega t) \quad (1)$$

Onde:

$x(t)$ = Valor instantâneo do movimento [m];

A = Amplitude máxima do movimento [m];

ω = Velocidade angular [rad/s];

t = Tempo [s].

Se a origem do movimento não for $\sin(\omega t) = 0$, é preciso descrever a função do deslocamento pela expressão 2:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

$$\varphi = A \sin^{-1}\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (3)$$

Onde:

A_0 = Amplitude inicial do movimento [m];

A = Amplitude final do movimento [m];

φ = Ângulo de fase.

Considerando que a amplitude A , representa o valor máximo da função $x(t)$ em qualquer instante de tempo, então o valor de A pode ser considerado como valor de pico da função (MARÇAL,2000). E o percurso efetuado pelo deslocamento pode ser expresso conforme Equação 4:

$$x(t) = A_{pico} \sin(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

Na Figura 3, Jesus (2010) representa o movimento harmônico através do movimento de deslocamento. Para caracterizar níveis de vibrações em máquinas, podem ser consideradas outras duas propriedades deste movimento, como velocidade e aceleração.

As grandezas de deslocamento, velocidade e aceleração, representadas na Figura 4, estão relacionadas entre si. As mesmas podem ser matematicamente representadas por equações

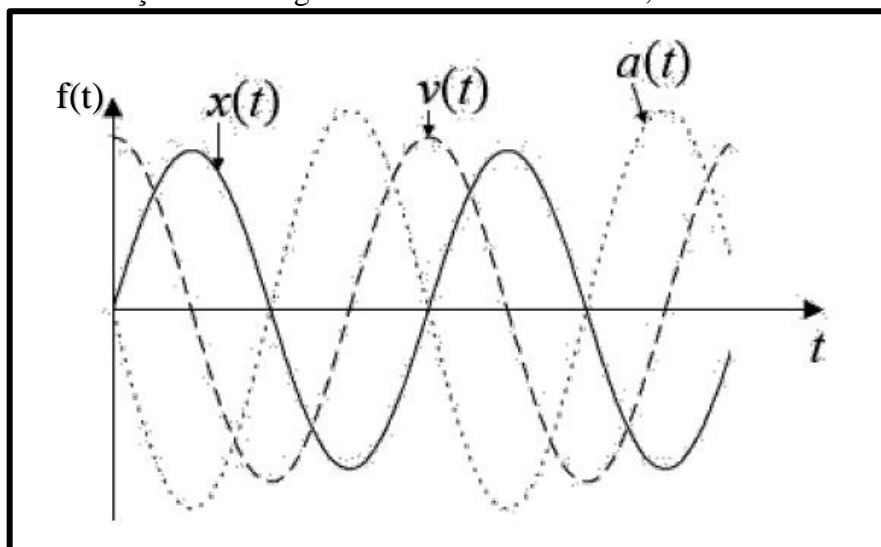
diferencias. No caso da velocidade, esta grandeza é a taxa de variação do deslocamento em função do tempo, conforme a Equação 7.

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = A\cos(\omega t + \varphi) \quad (7)$$

Já a aceleração, é a taxa de variação da velocidade em função do tempo, expressa em metros por segundo ao quadrado, sendo expressa matematicamente na Equação 8, como a derivada segunda do deslocamento.

$$a(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2} = -A\cos(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

Figura 4 – Relação entre as grandezas de deslocamento, velocidade e aceleração



Fonte: Jesus (2010).

2.3.2 Transdutores de vibração

Os transdutores de vibração são responsáveis em converter um sinal de vibração mecânica em um sinal elétrico. Geralmente necessitam de condicionamento do sinal antes de ser processado, e posteriormente ser analisado (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019).

Conforme destaca Marçal (2000), alguns fatores são importantes para a escolha dos sensores de vibração. Inicialmente, observa-se quais parâmetros serão analisados, e qual o tipo de análise que se pretende realizar. No entanto, Balbinot e Brusamarello (2019) afirmam que

as faixas de frequências e amplitudes são os principais parâmetros na escolha de sensores de vibração.

Em baixas frequências, as amplitudes do deslocamento são elevadas (BALBINOT; BRUSAMARELLO,2019). Nestes casos, os transdutores de deslocamento são os mais indicados, porque são sensíveis a um movimento relativo, como no caso da medição de uma distância entre o sensor fixo em um mancal, em relação a um eixo vibrando.

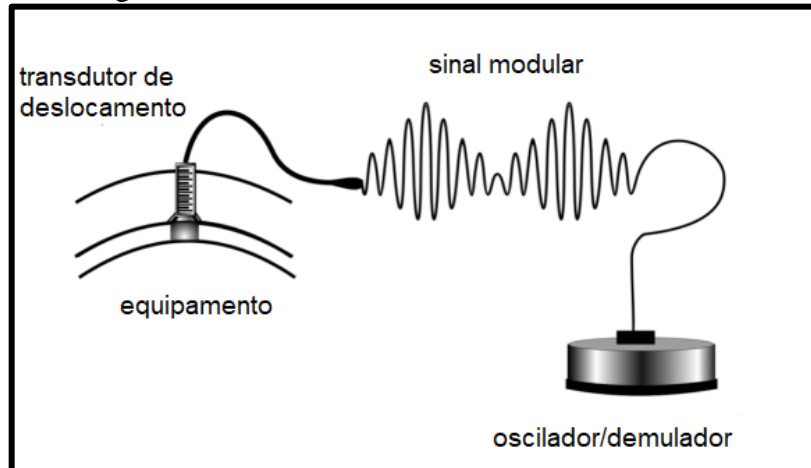
Já, nas altas frequências, as amplitudes dos deslocamentos são baixas, em contrapartida a amplitude de aceleração e elevada (BALBINOT; BRUSAMARELLO,2019). A aceleração é escolhida na medição de choques de vibração de alta frequência, onde são feitos os diagnósticos de defeitos em rolamentos, e aparecem os primeiros sinais de fadigas ou desgastes em máquinas. Para altas frequências, o acelerômetro é o sensor mais indicado (MARÇAL,2000).

De acordo com Balbinot e Brusamarello (2019), os sensores de velocidades apresentam desempenho razoável em altas e baixas frequências. A velocidade de vibração é um parâmetro indicativo, utilizado no monitoramento de condições de máquinas em programas de manutenção preditivas. O autor também salienta, que a relação entre a massa do sensor utilizado e a massa da máquina, ou estrutura a ser medida, deve ser levado em consideração, pois a vibração depende da massa do sistema. Sensores que possuem grandes massas comparados aos sistemas vibratórios, podem distorcer os valores medidos e interferir nos resultados. O autor ainda cita, que os sensores de vibração, quando instalados em ambientes com condições adversas de trabalho tais como, locais úmidos, radiativos, corrosivos ou abrasivos, podem ter suas características de funcionamento alteradas, resultando em valores medidos com distorções.

2.3.2.1 Transdutores de Deslocamento

Segundo Marçal (2000), os transdutores mais utilizados para medidas de deslocamento são os sensores de deslocamento sem contato (*eddy current probe*) Figura 5. O princípio de funcionamento deste tipo de sensor baseia-se em um oscilador de alta frequência, aproximadamente 2MHz, que excita um transdutor através de um cabo de conexão. Quando o transdutor é aproximado da peça de uma máquina, as correntes parasitas são induzidas, gerando um campo magnético através da variação do *gap* entre a peça e o transdutor, de tal forma que se obtém um sinal de amplitude modulado, que posteriormente é demodulado e transformado em tensão DC proporcional ao deslocamento de vibração (SCHEFFER; GIRDHAR,2004).

Figura 5– Transdutor de deslocamento sem contato



Fonte :Adaptado de Scheffer e Girdhar (2004).

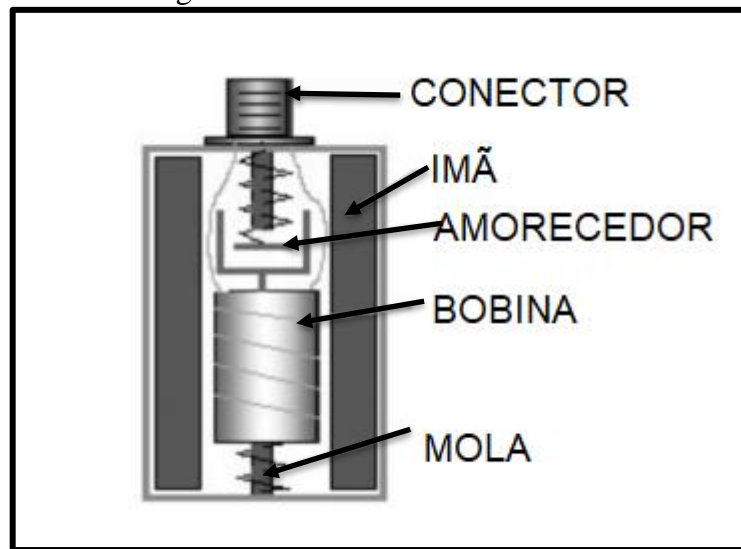
Marçal (2000) destaca que os transdutores de deslocamento devem ser instalados em uma base fixa, na orientação axial do plano que apresente maior vibração, onde devem ser devidamente calibrados no local da instalação.

Balbinot e Brusamarello (2019) também salientam, que os transdutores devem ser instalados em equipamento com variação de frequência de até 200 Hertz. Os sensores de proximidade normalmente têm uma sensibilidade de 10 mV/ μm , com resposta linear na faixa de valores máximos entre 2 a 2,5 mm de deslocamento (SCHEFFER; GIRDHAR,2004). Devido às imperfeições ou alterações nas propriedades magnéticas do equipamento monitorado, os valores de resposta medidos através dos transdutores podem conter erros (MARÇAL, 2000).

2.3.2.2 Transdutores de Velocidade

Os transdutores de velocidade (*pickups*), conforme visto na Figura 6, consistem geralmente de bobinas suspensas em molas finas e planas, posicionadas com precisão no campo do ímã permanente. À medida que a bobina é forçada através do campo magnético pelo movimento vibratório, é produzido um sinal de tensão diretamente proporcional à velocidade absoluta da superfície do movimento relativo entre o ímã e a bobina (SCHEFFER; GIRDHAR,2004).

Figura 6 – Transdutor de velocidade



Fonte :Adaptado de Scheffer e Girdhar (2004).

De acordo com Scheffer e Girdhar (2004) e Marçal (2000), os transdutores de velocidade são autogeradores, gerando um sinal de saída de baixa impedância e não necessitam de fontes externas de alimentação. Sua faixa de operação pode apresentar resposta linear no intervalo de frequência de 10 Hz a 1,5 kHz (Marçal,2000), e possuem valores aproximados de sensibilidade de 20 a 30mV/mm/s (SCHEFFER; GIRDHAR ,2004).

Scheffer e Girdhar (2004) salientam que as interferências magnéticas devem ser levadas em consideração ao medir vibrações de grandes motores e geradores CA. O campo magnético alternado produzido por essas máquinas, pode afetar o condutor da bobina, induzindo uma tensão no sensor que pode ser confundida com uma vibração do equipamento.

2.3.2.3 Acelerômetros

Os acelerômetros são dispositivos de medição inercial, que convertem o movimento mecânico em um sinal de tensão. Estes dispositivos necessitam de fontes de alimentação externa, e geralmente quando utilizados no monitoramento de vibrações em máquinas, são projetados com sensibilidade de 100 mV/g. Além disso, eles trabalham em uma ampla faixa de frequências de 1 ou 2Hz a 8 ou 10kHz, e se necessário, estão disponíveis comercialmente com faixas maiores de frequência (SCHEFFER; GIRDHAR,2004). Quando instalados de forma permanente, em local limpo e liso, fixados por parafuso no plano com maior mobilidade, estes sensores apresentam melhor resposta do sistema. Nestas condições, pode ser utilizado o

máximo do valor da faixa de frequências útil do sensor (BALBINOT; BRUSAMARELLO,2019).

A medição de aceleração do movimento de vibração através de acelerômetros é amplamente utilizada em sistemas de monitoramento no setor industrial, uma vez que modernos equipamentos eletrônicos de condicionamento de sinais, utilizando integradores e diferenciadores, permitem avaliar a partir dos acelerômetros os três parâmetros principais de uma vibração, ou seja, a aceleração, deslocamento e velocidade.

Balbinot e Brusamarello (2011) destacam que existem diversos tipos de sensores de aceleração, como os acelerômetros piezelétricos, piezorresistivos, capacitivos e os acelerômetros integrados, que utilizam a tecnologia de sistemas micro eletromecânico (MEMS). De acordo com Fradem (2010), os acelerômetros MEMS têm sido bem aceitos em projetos que precisam componentes pequenos, com alta sensibilidade e ampla faixa dinâmica.

2.3.2.3.1 Acelerômetros Piezelétricos

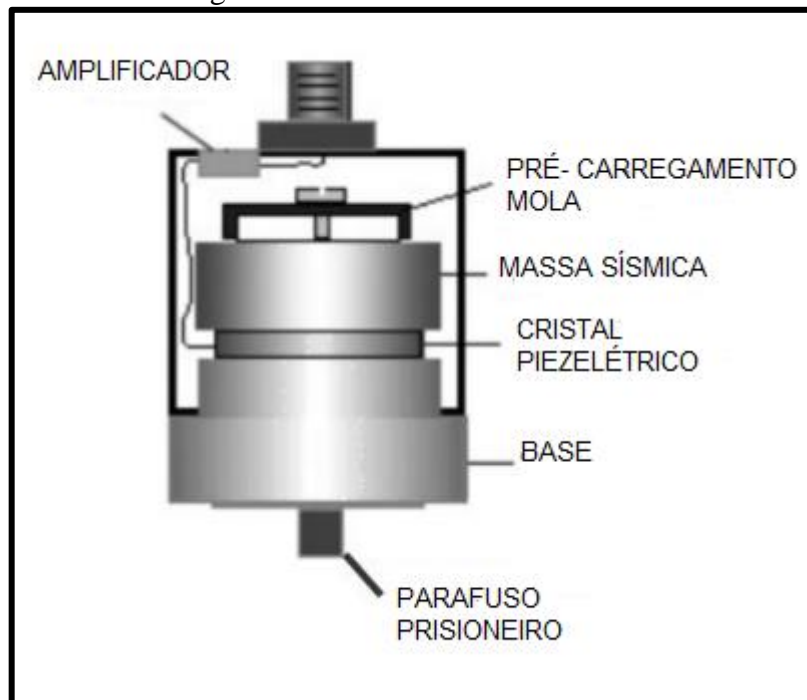
De acordo com Fradem (2010), os acelerômetros piezelétricos, conforme a Figura 7, são dispositivos que convertem energia mecânica em energia elétrica, por meio de um material cristalino composto por dipolos elétricos. Os acelerômetros consistem em um cristal piezoelétrico e uma pequena massa normalmente envolvida em uma caixa de metal protetora. Quando o acelerômetro é submetido à vibração, a massa exerce uma força sobre o cristal piezoelétrico, que é diretamente proporcional à aceleração vibratória.

Scheffer e Girdhar (2004), descrevem que a carga produzida pelo cristal piezelétrico é proporcional à força vibratória variável, e o valor da saída de carga é medido em pico-coulombs por g (pC/g), onde g é a aceleração gravitacional. Também destacam, que os valores de saídas do cristal são convertidos através de amplificadores de carga para valores adequados de tensão(mV/g).

Já, Balbinot e Brusamarello (2011), destacam que os acelerômetros piezelétricos possuem ampla faixa de frequência de trabalho de 0,1 Hz a 30 kHz, baixo consumo de energia e alta sobrevivência a choques. Ressaltando que os matérias piezelétricos possuem sensibilidade à temperatura, onde devem operar até a temperatura de Curie¹, também possuem alta impedância e, para medir o sinal gerado, é necessária a utilização de circuito condicionador.

¹ Temperatura de Curie: temperatura limite para que os materiais piezoelétricos não percam suas propriedades principais.

Figura 7– Acelerômetro Piezelétrico



Fonte :Adaptado de Scheffer e Girdhar (2004).

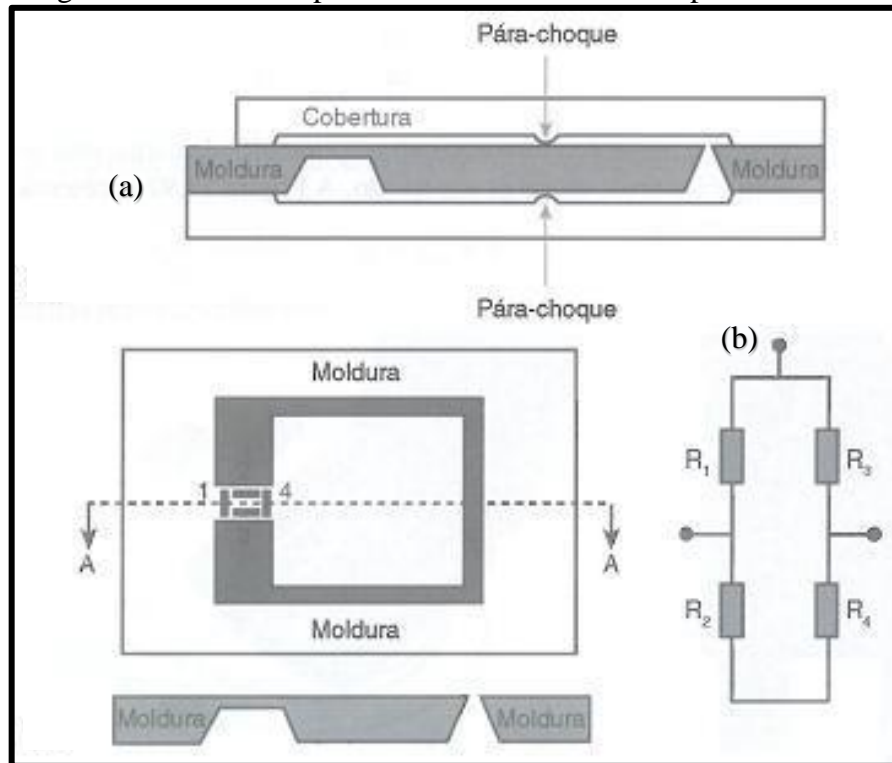
2.3.2.3.2 Acelerômetros Piezorresistivos

De acordo com Balbinot e Brusamarello (2019), os acelerômetros piezorresistivos são implementados com o uso de sensores *strain-gages* semicondutores instalados em ponte ou meia ponte de Wheatstone, o que permite sua miniaturização, estes acelerômetros pertencem à classe de sensores membros da família MEMS. O sinal de saída destes sensores tem correlação direta entre a magnitude e a taxa de deslocamento da massa e, posteriormente, com uma aceleração (FRADEN,2010).

No quesito característica construtiva, os acelerômetros piezorresistivos apresentam proteções contra sobrecarga, o que evita danos no sensor em amplitudes elevadas e são indicados em implementações de baixas frequências, ou seja, inferiores a 1 Hertz (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019). Também possuem ampla faixa de frequência de trabalho, podendo ser utilizados para detectar frequências próximas ao nível DC até 13kHz (FRADEN,2010).

Um esboço da estrutura típica de um acelerômetro MEMS piezorresistivo com amortecimento a ar é apresentado na Figura 8, onde pode ser visualizado o mecanismo de proteção contra amplitude excessiva (a) e os quatro elementos piezorresistivos que formam a ponte Wheatstone (b), esquema de montagem que permite a medição do valor de uma resistência elétrica desconhecida.

Figura 8 – Estrutura típica de acelerômetro MEMS piezorresistivo



Fonte: Balbinot e Brusamarello (2011).

2.3.2.3.3 Acelerômetros Capacitivos

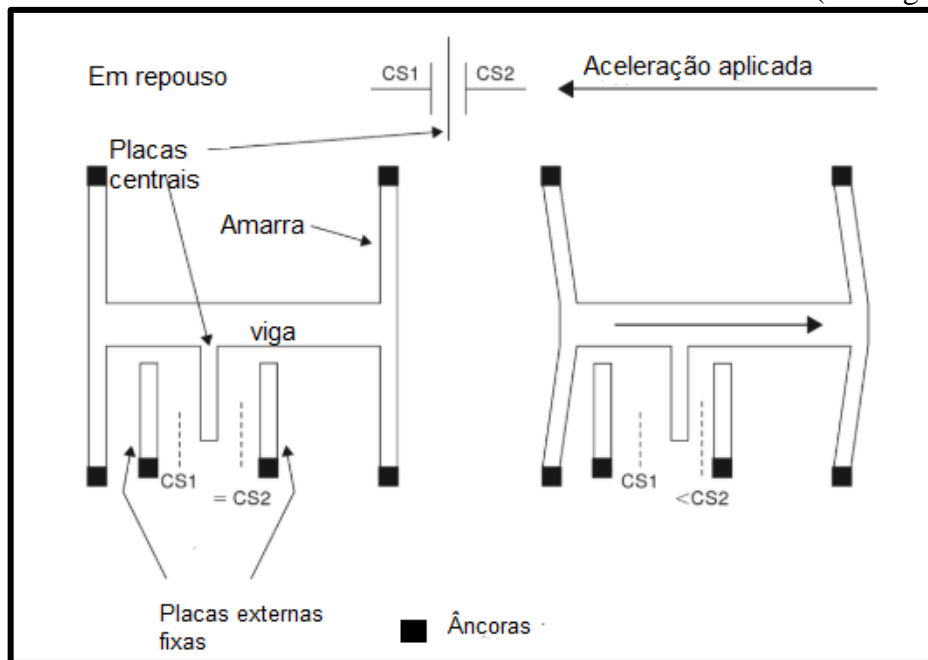
De acordo com Balbinot e Brusamarello (2011), os acelerômetros capacitivos são classificados como membros da família MEMS, e seu princípio de funcionamento é baseado na mudança de capacitância relacionada a variação proporcional ao movimento de aceleração do sistema (Hank, 2008). O valor da capacitância extraída pelo movimento possui um valor típico de 0,1 pF. Atualmente são fabricados acelerômetros MEMS capacitivos, com faixas que vão desde 2 g até 50 g (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011).

Balbinot e Brusamarello (2011) também salientam, que estes sensores apresentam uma resposta em frequência estável em função da temperatura, mas são inerentemente não-lineares. Estes sensores apresentam dificuldade de medição, quando utilizados para medir estruturas com pequenas dimensões, devido os efeitos parasitas e interferências eletromagnéticas do ambiente (FRADEN, 2010).

O princípio de funcionamento do sensor baseado em tecnologia iMEMS capacitiva da Analog Devices, é caracterizado na Figura 9, podendo ser observado que a base elétrica deste sensor é o capacitor diferencial CS1 e CS2. Quando o sistema se encontra em repouso, o valor da saída diferencial entre os capacitores é nulo. No instante em que é exercida uma aceleração

sobre o sensor, a massa sísmica (viga) se movimenta, alterando a disposição entre a placa central móvel e as duas placas externas fixas. Como consequência disso, a capacitância diferencial de CS1 e CS2 também é alterada, gerando um sinal elétrico proporcional ao valor diferencial.

Figura 9 – Estrutura básica - acelerômetro iMEMS da família ADXL (Analog Devices)



Fonte: Adaptado de Zumbahlen Hank (2008).

2.3.3 Plataformas de aquisição e tratamento de dados dos sensores

No desenvolvimento de sistemas de monitoramento de vibração, existem diversas plataformas de aquisição e tratamento de dados dos sensores, onde são frequentemente usados os microprocessadores ou microcontroladores de placa única. Eles são baseados nas diferentes arquiteturas de *hardware*, onde incluem as principais unidades funcionais de um computador, a unidade central de processamento, memória e periféricos de entrada/saída (GONZÁLEZ,2014).

Diante das diversas plataformas existentes e utilizadas na análise de vibração, são apresentadas na Tabela 2, as características principais das plataformas do Arduino Mega e Raspberry Pi. O que diferencia sua escolha é o tipo de aplicação e a função que a plataforma irá exercer dentro do projeto a ser executado.

Tabela 2 – Comparação entre as plataformas de aquisição de sinal

| CARACTERÍSTICAS | | |
|------------------------|--|---|
| Modelo | Raspberry Pi 3 B | Arduino MEGA2560 |
| Processador | Broadcom BCM2837 64bit ARMv8 Cortex-A53 Quad-Core Clock 1.2 GHz | Atmega2560 Clock 16MHz |
| Memória | 1GB LPDDR2-900 SDRAM (900MHz) | Flash 256KB, SRAM 8KB, EEPROM 4KB |
| Portas | 4 portas USB 2.0 Conector de vídeo HDMI Conector Ethernet Conector de áudio e vídeo Slot para cartão micros 40 pinos GPIO | 1 porta USB 2.0 Conector de alimentação 54 portas digitais 16 portas analógicas Conector ICSP |
| Wifi | 802.11n Wireless LAN | Não possui |
| Bluetooth | 4.1 (incluindo Bluetooth Low Energy) | Não possui |
| Dimensões | 85 x 56 mm | 101.52 x 53.3 mm |

Fonte: Adaptado Raspberry Pi Foundation (2019); Arduino (2019).

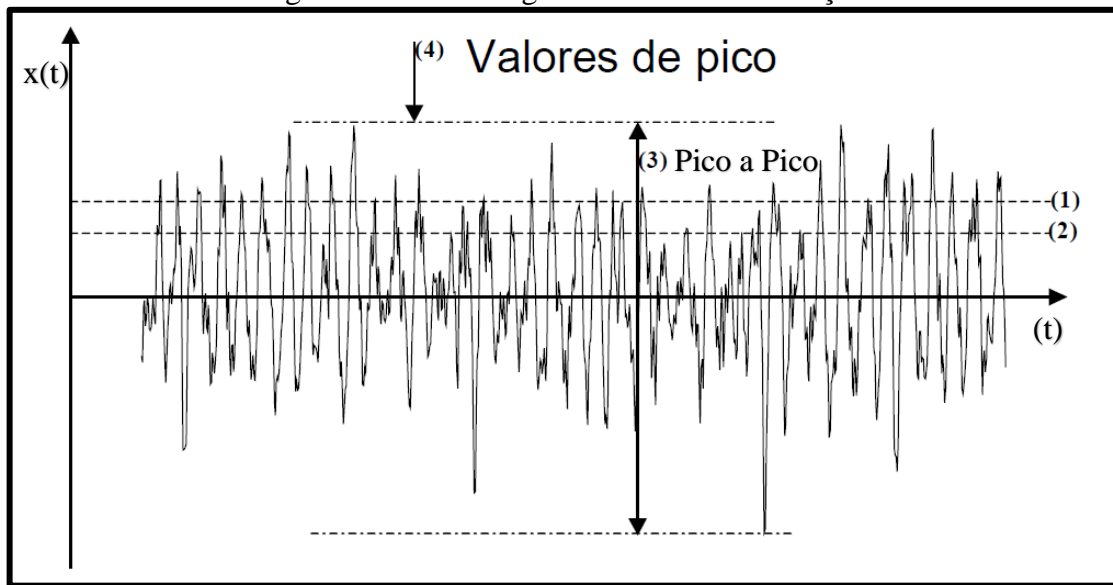
2.4 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

De acordo com Antonioli (1999), devido ao aprimoramento das técnicas de análise de sinais, têm sido possível o desenvolvimento e a implantação de programas de manutenção preditiva, baseados no controle e análise de vibrações, podendo-se destacar entre as técnicas de análise de vibrações mais utilizadas: o nível global de vibrações; severidade; fator de crista e análise espectral.

2.4.1 Nível Global

O nível global de vibração está relacionado com a vibração total do sistema, resultante da ação de todas as frequências presentes no sinal, Figura 10, podendo ser um sinal de deslocamento, velocidade ou aceleração. Os valores medidos, quando comparados com valores de referência da máquina ou valores de normatizados, indicam a severidade da vibração, auxiliando na detecção de defeitos e sua evolução (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004).

Figura 10 – Valores global do sinal de vibração



Fonte: Adaptado de Vendrame (2019).

O valor global consiste em medir o valor eficaz do sinal no tempo. Através do valor da raiz do valor quadrático médio (RMS) é estimada a energia contida no sinal de vibração da máquina. Também com os valores de pico, podem ser obtidas informações referentes a choques mecânicos provenientes de falhas (JESUS,2010). Na Figura 10, pode ser observado o valor eficaz (1) e o valor médio do sinal (2), podendo ser matematicamente calculados pelas Equações 7 e 8.

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (7)$$

$$X_{médio} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (8)$$

2.4.2 Severidade

A norma (ISO 10816-3:2009) e a (NBR 10082:2011) adotam o valor eficaz da velocidade do sinal de vibração como padrão para a identificação da severidade de vibração em máquinas girantes, com velocidades de rotação na faixa de 600 a 12000rpm. Para análise da severidade de vibração, as normas estabelecem alguns parâmetros como valores de referência, entre eles estão as condições de funcionamento, tipo de fixação e potência das máquinas Tabela 3, onde são classificadas por nível e classes, conforme abaixo:

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

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

Nível C – Limite tolerável. Faixa não aceitável para operação continuada.

Nível D – Não permissível. A severidade neste nível é considerada danosa para o equipamento.

Classe I – Máquinas pequenas, com acionamento por motor elétrico diretamente acoplado, potência máxima de 15 KW.

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

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

Classe IV – Máquinas do tipo da classe III, montadas sobre fundações relativamente flexíveis na direção de medição de vibração.

Tabela 3 – Severidade de vibração

| Severidade de Vibração ISO 10816 | | | | | |
|----------------------------------|------|----------|-----------|------------|-----------|
| Máquina | | Classe I | Classe II | Classe III | Classe IV |
| Velocidade de vibração V_{rms} | mm/s | | | | |
| | 0,28 | A | A | A | A |
| | 0,45 | | | | |
| | 0,71 | | | | |
| | 1,12 | B | B | B | B |
| | 1,80 | | | | |
| | 2,80 | C | C | C | C |
| | 4,50 | | | | |
| | 7,10 | D | D | D | D |
| | 11,2 | | | | |
| | 18,0 | | | | |
| | 28,0 | | | | |
| 45,0 | | | | | |

Fonte: Adaptado da NORMA ISO 10816-3:2009.

2.4.3 Fator De Crista (FC)

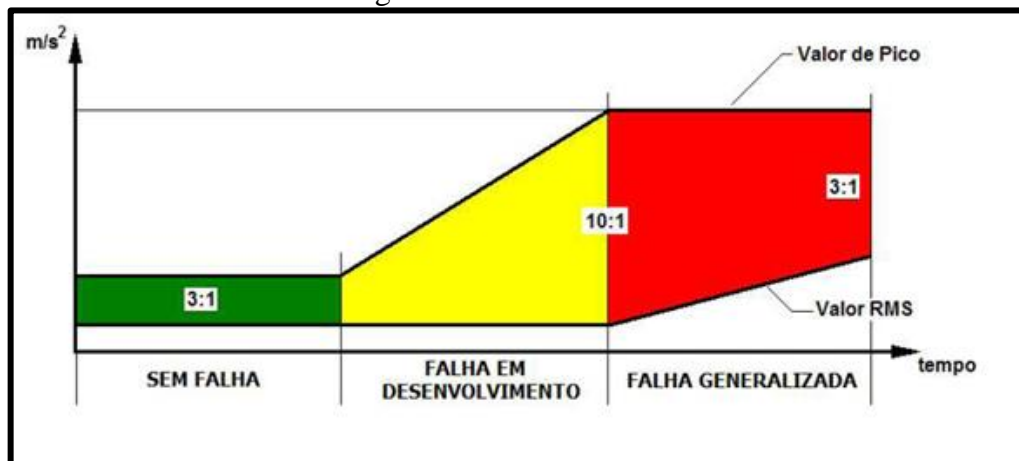
O fator de crista é uma informação importante para a detecção de falhas em mancais de rolamentos. Os defeitos nas pistas, ou nos elementos rodantes, são responsáveis por picos de altas frequências no sinal de vibração (TEKNOKAO,2011). O fator de crista é obtido através da razão entre o valor de pico e o valor RMS do sinal, podendo ser expresso matematicamente conforme a Equação 9.

$$FC = \frac{x_{pico}}{x_{rms}} \quad (9)$$

Teknokao (2011) descreve a variação do fator de crista durante o processo de degradação de um rolamento e classifica conforme a Figura 11. Observa-se que quando o rolamento não apresenta falhas, os valores de pico e RMS do sinal não sofrem alterações.

No entanto, quando há uma falha em desenvolvimento, o valor de pico apresenta valores altos, porém não tem interferência no valor RMS do sinal. Neste estágio, o valor do fator de crista aumenta consideravelmente. Já, quando uma degradação é generalizada no rolamento, o valor do fator de crista diminui em consequência do aumento do valor RMS do sinal.

Figura 11 – Fator de crista



Fonte: Teknokao (2011).

2.4.4 Análise Espectral

De acordo com Marçal (2015), a análise da frequência do sinal através da transformada de Fourier é a técnica de análise que permite extrair o espectro de vibração do sistema rotativo, e posteriormente avaliar sua condição de funcionamento, comparando os valores coletados com valores da frequência fundamental do sistema.

A transformada de Fourier, desenvolvida por Jean Baptiste Joseph Fourier, é uma ferramenta matemática de auxílio para vários problemas nas áreas da ciência, matemática e engenharia. Fourier descreve que qualquer função periódica no tempo $g(t)$ pode ser representada como uma soma de funções senos e cossenos, com frequências distintas e múltiplas harmônicas da frequência fundamental (OPPENHEIM,2010). As transformadas de Fourier são representadas pelas equações:

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-j\pi ft} dt \quad (10)$$

As Transformadas de Fourier assumem no processamento digital, por meios de sinais discretos a seguinte forma:

$$G_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} g_i e^{-\frac{j\pi ki}{N}} \quad (11)$$

Onde:

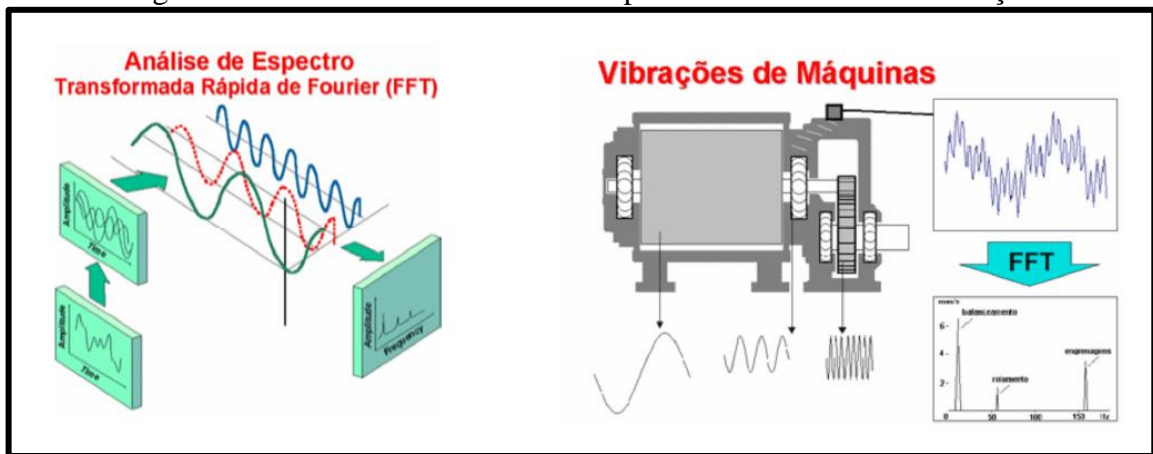
N = comprimento do sinal (número de amostras);

i = amostra que está sendo considerada;

k = frequência que está sendo considerada.

Conforme destaca Mais e Brady (2002), com a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transformation, FFT), Figura 12, o sinal obtido dos sensores de vibração do domínio do tempo é convertido no domínio da frequência, denominado espectro de frequência. A análise de vibração através do espectro de frequência é uma ferramenta importante na detecção de falhas em equipamentos rotativos, porque consegue distinguir as diversas frequências que estão presentes no sinal de vibração, podendo ser diagnosticado com antecedência os defeitos e identificar suas possíveis causas.

Figura 12 – Transformada de Fourier aplicada em um sinal de vibração



Fonte: adaptado Silva, Gomes e Rodrigues (2010).

2.4.5 Medição de vibração como ferramenta para manutenção preditiva

A utilização da análise de vibração como uma técnica aplicada à manutenção preditiva, tem como premissa fundamental que, cada componente ou cada tipo de deficiência mecânica de uma máquina em operação, produz uma vibração de frequência específica que, em condições normais de operação, pode atingir uma amplitude máxima conhecida. Dessa forma, é possível identificar cada componente da máquina, o tipo de falha presente e estabelecer sua origem, medindo e analisando o padrão de vibração, bem como avaliar as condições mecânicas dos componentes defeituosos e a gravidade dos defeitos detectados (MARÇAL; HATAKEYAM; CZELUSNIAK, 2015).

2.4.5.1 Detecção da falha

De acordo com Arco-Verde (2008), os sistemas mecânicos rotativos industriais tais como turbomáquinas, bombas, sopradores, compressores, ventiladores, geradores e laminadores, apresentam uma série de falhas características destes equipamentos. Já Ya' Cubsohn (1983), cita que as principais falhas destes sistemas podem ser divididas em duas classes genéricas: as falhas de baixa frequência como (desbalanceamento, falta de firmeza mecânica, correias frouxas e eixo torcido, desalinhamento ou eixo torto e folga nos mancais) e

falhas de alta frequência (engrenagens defeituosas, almofadas antifricção deterioradas, rolamentos deteriorados e lubrificação).

Marçal, Hatakeyam e Czelusniak (2015) descrevem que é essencial para o diagnóstico da falha conhecer o valor absoluto de cada frequência, relacionado com velocidade de rotação do eixo. A medição da frequência permite a identificação do componente da máquina ou a natureza da falha que produz a vibração.

Já, a medição da amplitude, permite avaliar por comparação, com valores previamente estabelecidos, se a vibração corresponde a uma operação normal ou anormal, como também o nível de importância da falha detectada.

A Tabela 4 relaciona as variáveis frequência de rotação, amplitude e a causa das vibrações, sugerindo quais grandezas (**deslocamento**, **velocidade** ou **aceleração**) devem ser monitoradas no diagnóstico de falhas na manutenção preditiva. Para melhor entendimento da tabela são utilizados dois exemplos de falhas comuns, onde é descrita a causa de vibração e a associação entre os parâmetros a serem analisados na análise de vibração.

No primeiro exemplo é utilizado o desbalanceamento, que é caracterizado como um dos defeitos de baixa frequência, defeitos que apresentam falhas nos múltiplos e submúltiplos da frequência de rotação do equipamento.

A falha relacionada ao desbalanceamento pode ser percebida no primeiro harmônico da frequência de rotação do equipamento, onde a variável de análise que melhor identifica esta falha é o deslocamento. A amplitude do deslocamento é proporcional ao nível em que se encontra o desbalanceamento, sendo que seu valor é maior e melhor percebido no sentido radial de funcionamento.

No segundo exemplo é utilizado o defeito de rolamento, que é caracterizado como um dos defeitos de alta frequência, defeitos que apresentam falhas nas frequências acima de 5 vezes a rotação do equipamento.

A falha relacionada aos rolamentos pode ser percebida entre 15000 e 40000 rpm, onde a variável de análise que melhor identifica esta falha é a aceleração, a amplitude de aceleração é caracterizada através de picos de alta frequência.

Tabela 4 – Relação entre variáveis e causas de vibração

| CAUSA | FREQUÊNCIA | VARIÁVEL | AMPLITUDE | OBSERVAÇÃO |
|------------------------------------|------------------------------|----------|--|---|
| Desbalanceamento | 1 X rpm | d | Proporcional ao desbalanceamento. Maior no sentido radial | Geralmente aparece no primeiro harmônico |
| Desalinhamento ou eixo torto | 1/2/3/4 X rpm | d | Grande em direção axial (maior que 50% da amplitude, radial) | Desalinhamento entre mancais ou entre ambas metades do “manchón” |
| Folga nos mancais | ½ X rpm | d | Grande no sentido vertical | Como a frequência é menor que ½ rpm a fase pode ser variável |
| Falta de firmeza mecânica | 2 X rpm | d | Instável | Geralmente afeta o alinhamento |
| Correias frouxas | 1 X rpm | d | Instável | |
| Engrenagens defeituosas | alta, número de dentes X rpm | a/d | “blips” | Frequência entre 15000 e 40000 rpm |
| Almofadas antifricção deterioradas | Alta | a | “blips” | A frequência alcança valores maiores do que os registrados para engrenagens ou rolamentos |
| Rolamentos deteriorados | Alta | a | “blips” | Frequência entre 15000 e 40000 rpm |
| Lubrificação | Alta | a | - | A amplitude se modifica notadamente em função da lubrificação |
| Eixo torcido | 1 X rpm | d | Grandes valores no sentido axial | A amplitude pode se apresentar de forma pulsátil |
| | | | | |

Fonte: Adaptado de Ya’Cubsohn (1983).

2.5 TRABALHOS RECENTES RELACIONADOS COM O SISTEMA PROPOSTO

Neste capítulo são abordados alguns trabalhos recentes e que têm como tema principal a análise de vibração, com o intuito de proporcionar a compreensão do contexto ao qual o trabalho está inserido e, também, realizar uma pesquisa sobre as diversas áreas as quais envolvam manutenção preditiva, com foco na análise de vibração e utilização de acelerômetros, descrevendo quais técnicas foram aplicadas, a metodologia experimental e métricas utilizadas, bem como os resultados obtidos.

Baldissarelli e Fabro (2019) apresentam em seu trabalho o desenvolvimento de uma solução em manutenção preditiva para equipamentos rotativos industriais. Os autores buscavam

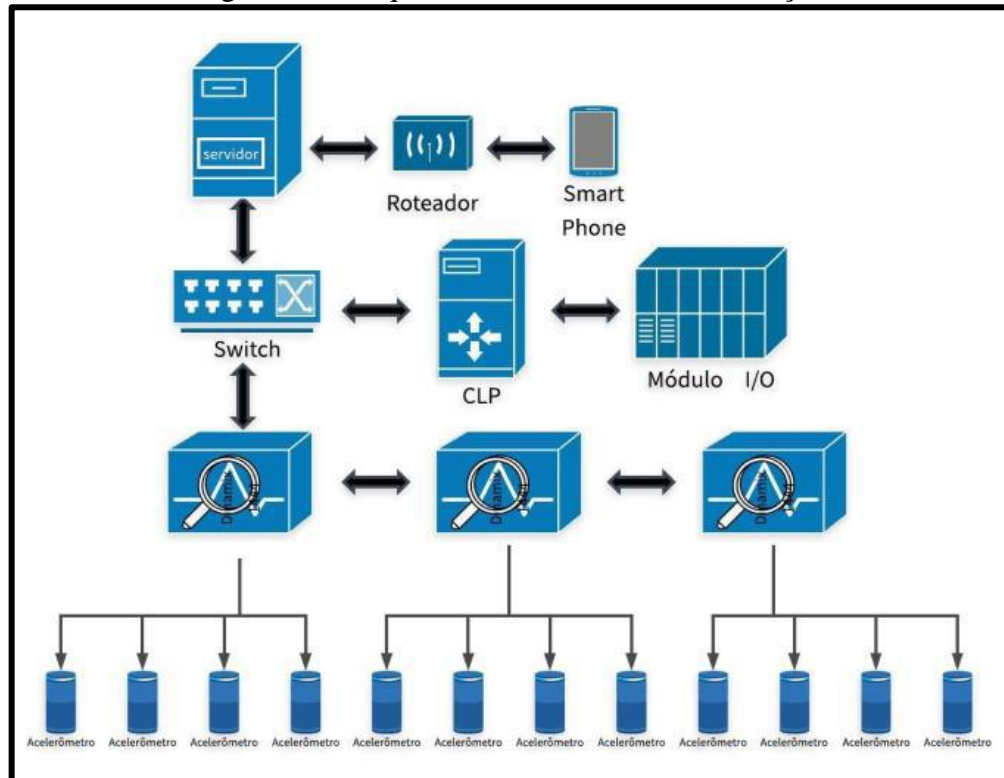
neste trabalho identificar vibrações de um motor e mancais instalados em um exaustor industrial, através da análise de severidade de vibração do equipamento.

O exaustor industrial foi escolhido devido à sua criticidade dentro da indústria em que se encontra instalado. Uma parada deste tipo de equipamento corresponderia em uma perda produtiva elevada, pois sem a sua operação, o setor inviabilizaria o trabalho de outros 35 equipamentos que estão presentes no processo produtivo da empresa.

O sistema de monitoramento utiliza sensores de vibração, no caso os acelerômetros, instalados nas posições axial, vertical e horizontal nos mancais do eixo principal do exaustor, e também nas tampas do motor principal, com o intuito de monitorar o estado dos rolamentos.

Os dados são coletados pelo sistema via módulo de interface da Rockwell Dynamics 1444, o qual faz o tratamento das informações recebidas pelos sensores e envia os dados para um CLP via cabo ethernet. O CLP se encontra conectado em uma rede junto a um servidor, por meio de um *switch*, podendo ser acessado remotamente de qualquer computador, ou até mesmo de um *smartphone* conectado à rede *wifi* da fábrica. A Figura 13 representa o esquema do sistema de monitoração utilizado pelos autores.

Figura 13 – Esquema do Sistema de Monitoração



Fonte: Baldissarelli e Fabro (2019).

Os autores utilizam as grandezas de velocidade(mm/s) e aceleração(g) na medição de vibração do sistema (conjunto motor e ventilador), e utilizam como base para indicação da

severidade de vibração, os valores de referência das normas NBR 10082 e ISO 20816. Após os valores limites de vibração serem ajustados, quando os valores medidos ultrapassam estes limites, geram-se sinais de alarme indicando que o equipamento está apresentando algum tipo de defeito, podendo este alarme ser visualizado pelo setor de manutenção através de um sistema supervisor.

Após um período de aproximadamente um ano de acompanhamento do sistema implantado, os autores descreveram que foi possível diagnosticar com antecedência defeitos como desbalanceamento e desalinhamento do equipamento. Logo, com este diagnóstico, foi possível programar a interferência da manutenção e evitar paradas inesperadas, reduzindo significativamente os custos financeiros relacionados às perdas do processo produtivo.

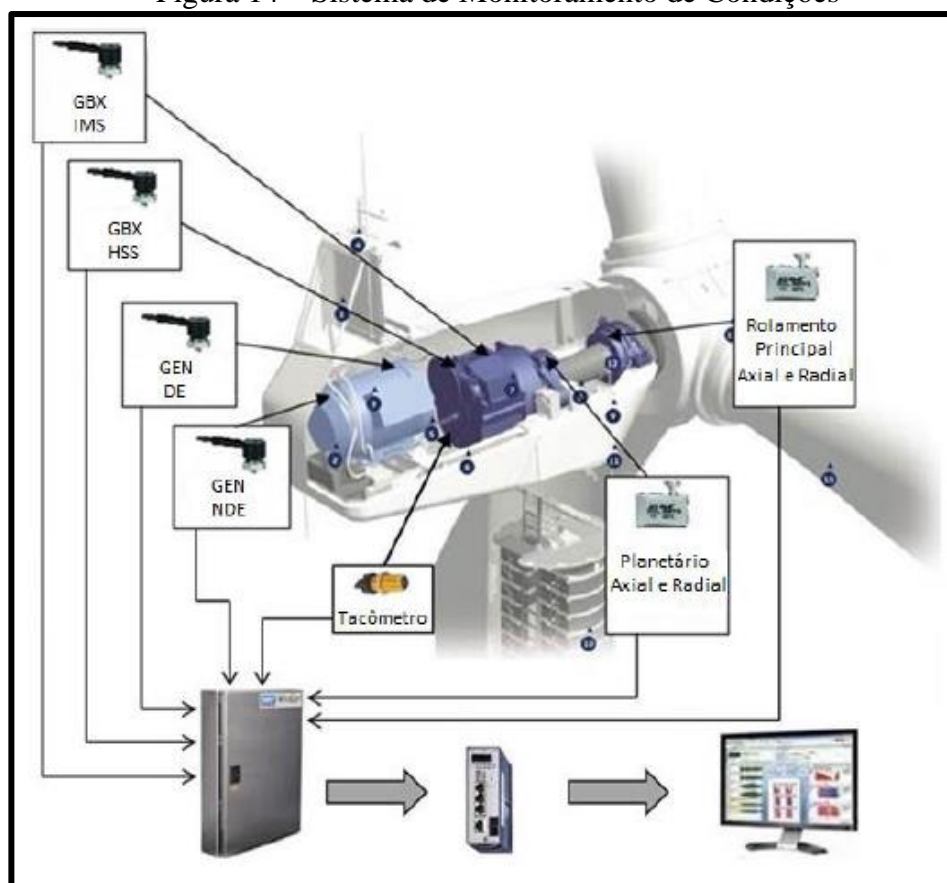
Os autores também demonstram através do comparativo entre indicadores de manutenção o impacto financeiro nos resultados da empresa, onde é descrito que no período de 09/2016 a 09/2017, período este anterior ao sistema implementado, o equipamento teve 5 paradas por problemas de manutenção. O impacto destas paradas gera uma perda produtiva, que pode chegar a 41.860 peças por dia. Transformando em valores financeiros da época, a perda estimada seria superior a R\$500.000,00/dia.

Já, Azevedo (2015), apresenta em seu trabalho um sistema de monitoramento de condições (CMS) através da análise de vibração, utilizando acelerômetros para a captação dos sinais do equipamento. O autor busca através de seu trabalho, identificar possíveis defeitos presentes em uma turbina eólica, instalada em um parque eólico.

O sistema de monitoramento Figura 14, foi instalado de forma permanente, onde é composto por: oito acelerômetros, um tacômetro, duas fibras ópticas, um *datalogger* e dois comutadores (*switches*). Permitindo análise online e acompanhamento contínuo do equipamento.

Devido à turbina eólica possuir componentes que trabalham em baixa e alta frequência, são instalados dois tipos diferentes de acelerômetros. As pás, o rolamento principal, e o planetário trabalham em frequências baixas. Nestes componentes foram instalados dois acelerômetros cada, na direção radial e axial. Os outros acelerômetros são colocados no eixo intermediário e eixo de alta velocidade da caixa de engrenagem. No lado acoplado do gerador e não acoplado do gerador, todos utilizam um acelerômetro na direção radial.

Figura 14 – Sistema de Monitoramento de Condições



Fonte: Azevedo (2015).

Para a medição em baixas frequências foi utilizado o acelerômetro marca SKF, modelo CMSS-WIND-2200, com sensibilidade padrão de $375 \text{ mV/g} \pm 10\%$ (Nominal a 80 Hz); Resposta de frequência de 0.2 Hz a 10 kHz; Ressonância devido à montagem de 18 kHz (nominal) e Intervalo dinâmico ($\pm 80\text{g}$).

Já, nas altas frequências, foi utilizado o acelerômetro marca SKF, modelo CMSS-WIND-2100F, com sensibilidade padrão de $100 \text{ mV/g} \pm 10\%$; Resposta de frequência de 0.5 Hz à 10 kHz; Ressonância devido à montagem de 25 kHz e Intervalo dinâmico ($\pm 50\text{g}$).

Os acelerômetros são colocados nos pontos de medição e os sinais obtidos desses sensores vão para o *datalogger*, que é utilizado com receptor dos dados dos sensores e gerenciador dos dados que serão enviados para a central de controle.

Para estabelecer a conexão dos dados do *datalogger* com a central de controle que se encontra distante da central eólica, foram utilizados switches Hirschmann, RED25 e fibra ótica.

O *Datalogger* utilizado foi um SKF Multilog On-line System IMx-M. Esse *datalogger* possui um intervalo dinâmico de 120 dB; Intervalo de frequência digital de 0,1 Hz a 12,5 k Hz; Intervalo de frequência analógico (DC a 40 kHz). Este equipamento possui dezesseis canais analógicos e dois canais digitais onde são conectados os acelerômetros e tacômetro. Seu sistema foi especificamente desenvolvido para o monitoramento *on-line* de vibração.

O CMS desenvolvido funciona com a coleta de um sinal no domínio do tempo e um espectro por dia por sensor; e, se algum sensor ultrapassar um critério de alarme, outros espectros só do sensor alarmante são salvos e enviados para a central de controle.

O sistema tem como objetivo receber os dados dos sensores e fazer uma primeira interpretação quanto à necessidade de enviar os dados para a central de controle, que posteriormente serão analisados. Normalmente, o IMx-M armazena os dados da turbina uma vez por dia, ou tantos quantos forem os alarmes de vibração na turbina.

O método de análise proposto pelo autor baseia-se em técnicas de sinais temporais de vibração, nas transformadas rápidas de Fourier e análises envelope obtidas através da transformada de Hilbert.

O autor descreve que foram monitorados e analisados os dados de vibração gerados no período de julho a outubro de 2014. Na análise dos dados foi possível observar amplitudes de aceleração com valores maiores que o limite estipulado de 10 m/s². Os valores de amplitude apresentavam os indícios de uma falha potencial, onde foi possível identificar um defeito na pista interna do rolamento do lado não acoplado do gerador.

Com a identificação do componente que estava apresentando o defeito, foi possível programar a intervenção da manutenção com antecedência, evitando assim, a falha total do equipamento. O rolamento foi substituído, confirmando o defeito, sendo possível avaliar a eficácia das informações enviadas pelo sistema.

Em caso de uma falha total neste equipamento, o tempo para restabelecer sua funcionalidade seria em torno de 10 dias, isso considerando um cenário positivo, em uma central eólica ideal, com boa localização, com todas as peças sobressalentes a disposição e com guindaste registrado previamente contratado. Enquanto que, em um cenário negativo, em uma central eólica remota, sem componentes/subcomponentes à disposição, e sem guindaste registrado pelo parque, o tempo de parada total da máquina é em média 30 dias ou mais.

Após serem analisados os dados financeiros, considerando os dois cenários possíveis, o autor estima que com o sistema de monitoramento através da análise de vibração, foi possível obter uma redução de custo entre R\$ 243.850,00 e R\$ 345.050,00.

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Expandindo para os próximos capítulos, estão sendo apresentadas as etapas de desenvolvimento do trabalho, sendo que os temas abrangidos irão desde a fixação dos acelerômetros no compressor radial, até as ferramentas de *hardware* e *software* implementadas. Os materiais e métodos utilizados são abordados de acordo com o diagrama apresentado na metodologia de projeto.

3.1 METODOLOGIA DE PROJETO

Neste capítulo será abordada a metodologia de projeto que foi executada ao longo deste trabalho. Descrevendo a ordem de execução e o que cada etapa representa no projeto

A primeira etapa do projeto é a construção do sistema de medição. Nesta etapa são especificadas as características do compressor que foi monitorado, bem como a especificação do tipo de sensor utilizado na medição, descrevendo os locais e formas como os mesmos serão fixados. Nesta etapa, também, será especificado o meio de comunicação entre os sensores e a plataforma de aquisição dos sinais.

A segunda e a terceira etapa está relacionada à plataforma de aquisição/recepção, tratamento e processamento matemático dos sinais de vibração, logo, o microcomputador Raspberry Pi 3 B, é responsável pela execução destas etapas.

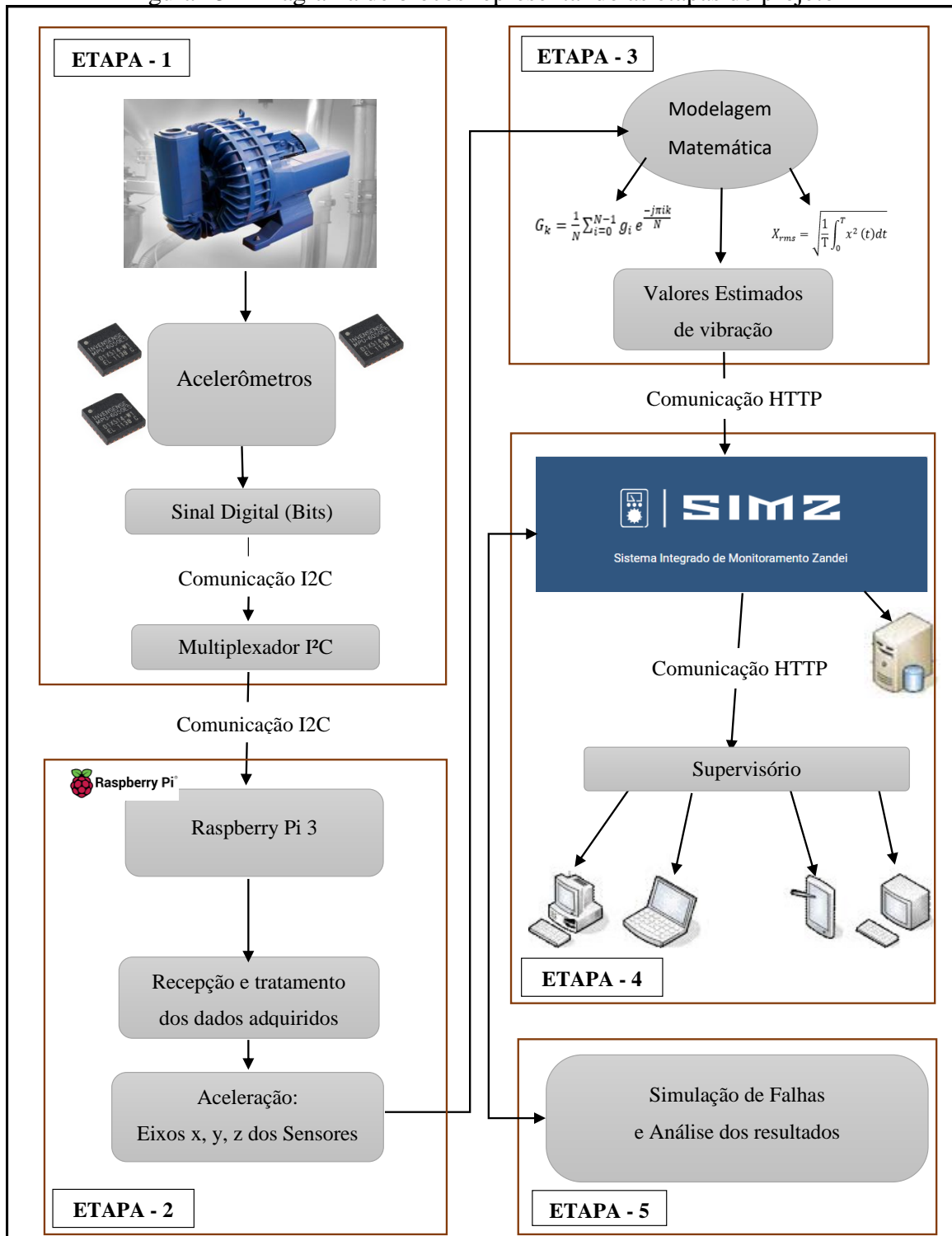
Na segunda etapa são especificados os meios de comunicação entre os acelerômetros e o microcomputador, também é descrito nesta etapa, como será o recebimento, armazenamento e processamento dos dados de vibração do equipamento. Já a terceira etapa está relacionada ao processamento matemático dos valores de aceleração, onde são apresentadas as técnicas de análises e valores de referência utilizados neste trabalho.

A quarta etapa está condicionada ao desenvolvimento do sistema de monitoramento e manipulação dos valores de vibração recebidos do microcomputador. Nesta etapa é descrito como o sistema de monitoramento manipula os valores recebidos e como estes valores são apresentados para o setor da manutenção.

Na quinta e última etapa é feita a avaliação do sistema, onde são feitas as simulações inserindo falhas no compressor e analisado os dados extraídos relacionados a estas falhas, comparando-os com os valores de referência. Nesta etapa também é feita a análise dos resultados, buscando determinar os valores limites que são utilizados no sistema de monitoramento.

A partir das várias etapas de desenvolvimento envolvidas, foi elaborado o diagrama em blocos apresentado na Figura 15, com o objetivo de segmentar o processo em etapas. Cada etapa do projeto será caracterizada de acordo com a sequência estabelecida, a fim de se obter um sistema que monitore a vibração de um compressor radial e que auxilie o setor de manutenção.

Figura 15 – Diagrama de blocos representando as etapas do projeto



3.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO

A etapa relacionada à construção do sistema de medição é a fase do projeto de maior relevância, devido que se não for bem analisada a escolha e posição de instalação dos sensores, poderá comprometer os resultados esperados. Normalmente os sensores são fixados nos mancais, pois é no rolamento onde se concentra toda a força de desequilíbrio causadora das vibrações (MARÇAL; SANTOS,2013).

Conforme referencial teórico e características construtivas do compressor a ser analisado, com objetivo de extrair os sinais de vibração do eixo principal e rolamentos, foram instalados de forma permanente dois acelerômetros nas tampas frontal e traseira do motor elétrico, na posição horizontal e um acelerômetro na tampa frontal do compressor, na posição axial.

3.2.1 Compressor Radial

Os compressores radiais são eficientes máquinas de vento, porque são as únicas que atuam com igual eficiência na sucção e no sopro. Esses compressores são confeccionados em alumínio fundido com uma aproximação mínima entre a carcaça e o rotor. Isso resulta em um melhor aproveitamento do ar que entra, fazendo com que o mesmo alcance um excelente rendimento tanto no vácuo quanto na pressão (IBRAN,2019).

Os compressores radiais são utilizados em tratamento de efluentes, transporte pneumático, vácuo em mesas, esteiras, em aspiração de resíduos, exaustão de gases em túneis e poços, mais uma infinidade de aplicações. Nas indústrias de plásticos, estes equipamentos são utilizados em alimentadores, injetoras de plástico, extrusoras de plástico, transporte de granulados.

O compressor radial foi o equipamento escolhido, devido sua criticidade no processo produtivo da empresa Zandei Plásticos, onde o mesmo se encontra instalado. Este equipamento é utilizado para o transporte de matéria-prima, e se o mesmo estiver fora de operação, afeta em média 50% da produção total da fábrica.

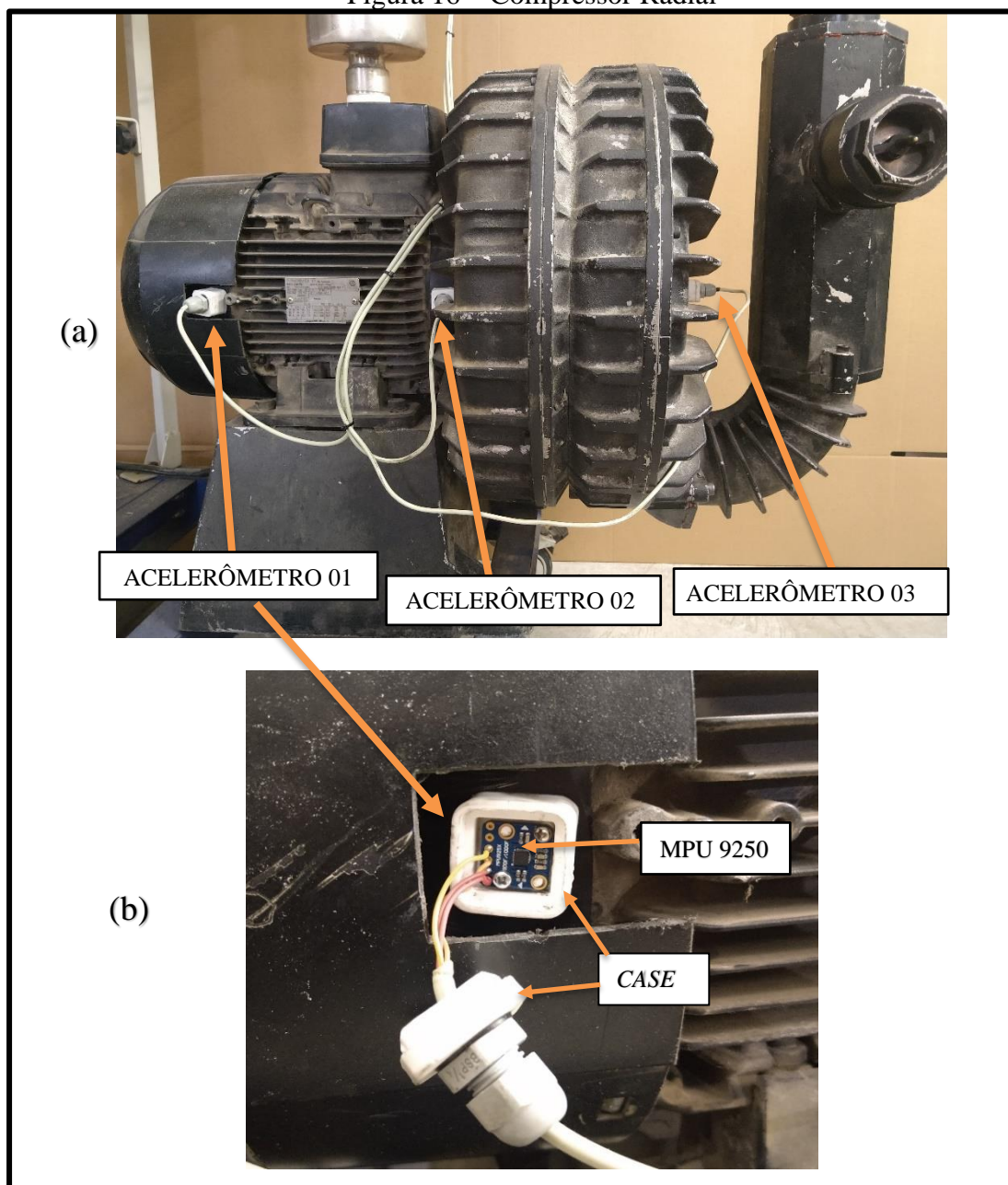
Dentre as principais características presentes no compressor, estão:

- Vazão máxima: 7,6 m³/min;
- Pressão máxima: 6800 mm CA;
- Vácuo máximo: 5500 mm CA;

- Potência do motor: 10CV;
- Tensão de alimentação: 220/380V;
- Frequência: 60 Hz;
- Rotação do eixo: 3550 RPM.

A Figura 16(a), apresenta o compressor radial, com as posições em que estão instalados os acelerômetros para a medição de vibração, conforme apresentado no projeto. Para acondicionamento e fixação dos sensores, foram confeccionados *cases* em impressora 3D, conforme pode ser observado na Figura 16(b).

Figura 16 – Compressor Radial



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.2.2 Definição do sensor a ser utilizado

Nesta linha de captura dos sinais de vibração com o uso de sensores acelerômetros, os trabalhos de Silva et al. (2014), Chan e Huang (2017), e Sousa (2018), adotam acelerômetros do tipo digital, com comunicação I2C, fabricados com tecnologia MEMS. Já Khademi, Raji e Sadeghi, (2019) utiliza os acelerômetros analógicos da família ADXL (Analog Devices).

Dentre os diversos tipos de tecnologias existentes e as respectivas comparações realizadas no referencial bibliográfico, o acelerômetro escolhido para a medição do sistema deste projeto foi o acelerômetro MPU 9250, do tipo MEMS, com saída digital, sensibilidade ajustável e *firmware* de calibração incorporado (INVENSENSE, 2014). Os critérios de seleção nesta escolha foram: resolução, sensibilidade, tamanho, consumo de corrente, tensão de operação, número de eixos, tipo de saída.

3.2.2.1 Acelerômetro MPU-9250

O MPU-9250 é um módulo multichip (MCM) dividido em duas partes, que combina um giroscópio de 3 eixos, acelerômetro de 3 eixos, magnetômetro de 3 eixos e Digital Motion Processor TM (DMP) em um único encapsulamento, que possui três conversores analógico-digital integrado de 16 bits, para medir suas grandezas nos três eixos. Os dados da saída digital são fornecidos em uma das faixas de medições programáveis conforme características a seguir e sua comunicação pode ser feita pelo protocolo I2C. Além disso, essa placa contém um sensor de temperatura, permitindo medições entre -40 e 85 graus (INVENSENSE, 2014).

Tabela 5 – Principais características presentes no acelerômetro MPU-9250

| | |
|--------------------------------|-------------------------|
| Frequência de aquisição máxima | 4 kHz |
| Resolução de saída | 16 bits |
| Ajuste de sensibilidade | (±2g, ±4g, ±8g ou ±16g) |
| Baixo consumo de corrente | 450 µA |
| Baixa tensão de operação | 2,4 V/3,6 V |
| Filtro passa-baixas integrado | ajuste de 5 a 260 Hz |

Fonte: Invensense (2014).

A frequência de saída da parte do acelerômetro do MPU-9050 é fixada em 4 kHz, portanto a largura de banda é de 2 kHz. No entanto, a taxa de amostragem do sistema pode ser

programada entre 4 Hz e 4 kHz, alterando o tempo de atraso entre os comandos de medição, na estrutura do programa.

Com base no teorema da amostragem de Nyquist, para reproduzir adequadamente o sinal coletado pelo acelerômetro, a taxa de frequência de amostragem, deve ser no mínimo duas vezes maior que a frequência do sinal de vibração amostrado. Desta forma a análise de vibração fica limitada a uma frequência máxima de 2kHz, sem que o sinal amostrado apresente distorções, fenômeno conhecido como aliasing.

O circuito integrado do MPU-9250 possui conversor analógico-digital (ADC) de 16 bits, que codifica os sinais analógicos em uma saída discreta de -32768 a +32768. Embora o número de níveis de saída seja constante, quatro faixas de medição (± 2 g, ± 4 g, ± 8 g e ± 16 g) estão disponíveis. No entanto, a resolução da medição diminui se a faixa de medição aumentar (CHAN; HUANG,2017).

Considerando a aceleração da gravidade da cidade (Guaporé - RS), segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), (2009) é de 9,7908793 m/s². Multiplicando por uma faixa de medição 2g e dividindo por 32768 representações, o sensor pode informar variações com escala de 0,00059 m/s², ao passo que em 16g essas variações passariam para 0,0048 m/s².

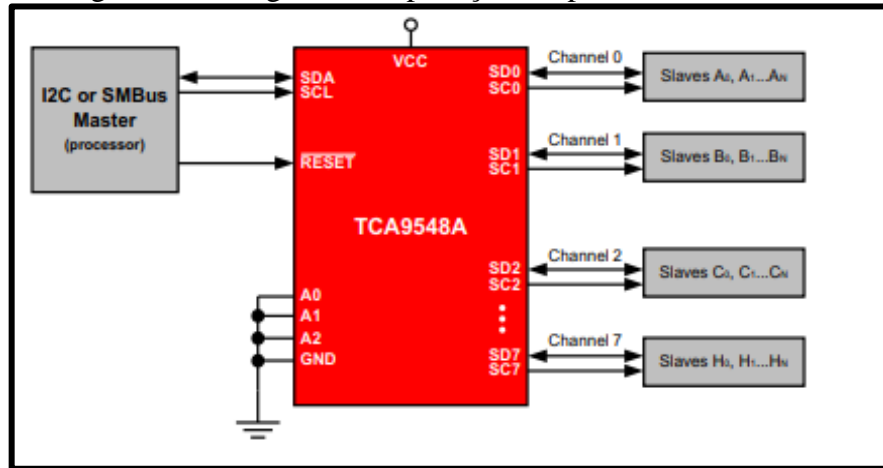
O acelerômetro MPU-9250, encontra-se inserido na placa GY-9250, onde sua comunicação é feita através dos pinos SDA, que é responsável pela transferência de dados e o SCL, que define a temporização da comunicação entre os dispositivos e o de endereço AD0, que é responsável pelo endereçamento do CI no barramento I2C. Quando esse pino está desconectado, define que o endereço I2C do sensor é 0x68. Quando conectado a 3,3 V, define o endereço 0x69 (INVENSENSE, 2014).

O acelerômetro MPU-9250 só pode ter dois endereços diferentes, determinados pelo fabricante e prefixados aos hexadecimais 0x68 e 0x69. Pelo fato de que para a medição de vibração do equipamento apresentado neste trabalho se faz necessária a utilização de cinco acelerômetros idênticos, necessitando assim de mais endereços I2C, será utilizado no projeto um multiplexador I2C TCA9548A.

O TCA9548A é um multiplexador I2C, seu diagrama é apresentado na Figura 17, este multiplexador possui oito comutadores de conversão bidirecional, que podem ser controlados através do barramento I2C. O par de pinos SCL/SDA controla o fluxo de dados dos oito pares de canais SCn/SDn. Os dados do canal podem ser controlados individualmente ou pela combinação com outros canais (TEXAS INSTRUMENTS,2016).

Considerando o diagrama simplificado do multiplexador, sendo o mesmo utilizado no desenvolvimento deste trabalho, o microcontrolador será o mestre, podendo desta forma endereçar e controlar as informações de até 8 acelerômetros escravos.

Figura 17 – Diagrama de aplicação simplificado TCA9548A



Fonte: Texas Instruments (2016).

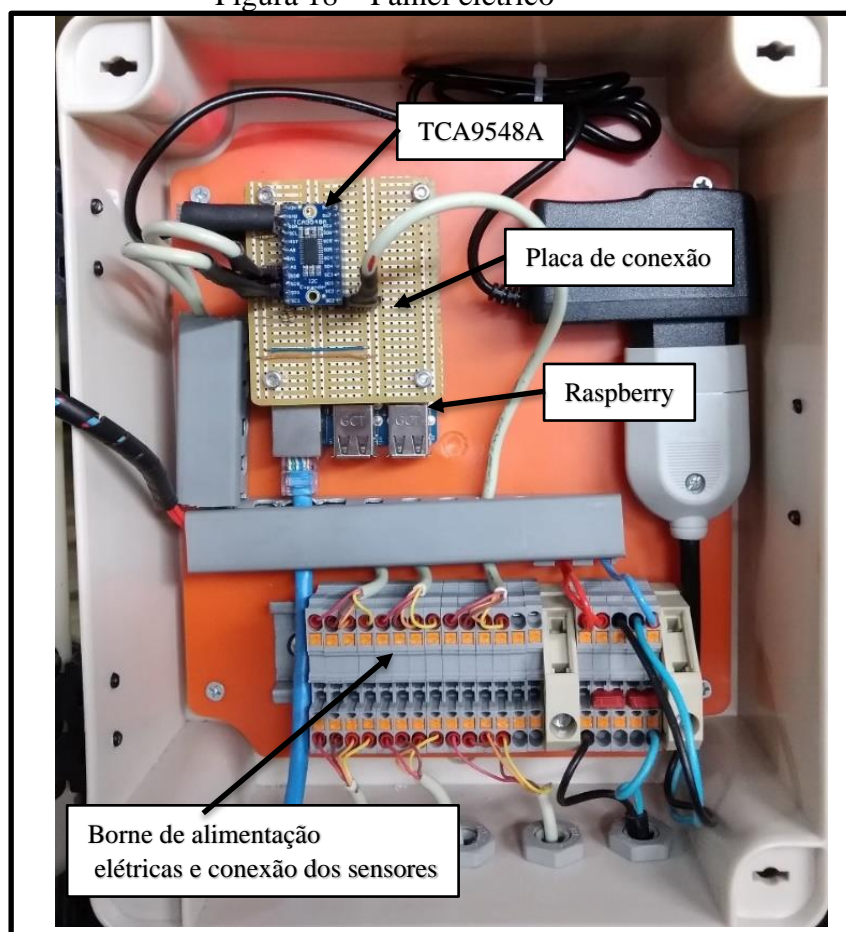
3.3 PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO/RECEPÇÃO E TRATAMENTO DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO

Dentre as limitações a que o projeto se propõe, a plataforma de aquisição/recepção e tratamento dos sinais de vibração foi escolhida, levando-se em consideração a interface de comunicação dos acelerômetros e o sistema integrado de monitoramento Zandei (SIMZ).

Considerando o comparativo dos dispositivos apresentados na Tabela 2, seção 2.3.3 do referencial bibliográfico, visando atender o objetivo deste projeto, a plataforma escolhida foi a Raspberry Pi 3 B, com processador Broadcom BCM2837 de 64bit, ARMv8 Cortex-53 Quad-Core de 1.2 GHz, além de possuir comunicação I2C e HTTP via cabo Ethernet, que são utilizadas neste projeto.

Visando deixar os dispositivos deste projeto mais organizado e acessível caso alguma alteração de configuração ou manutenção futura, foi confeccionado um painel elétrico, Figura 18, para acondicionamento e conexão da Raspberry Pi 3 B e o multiplexador TCA 9548A. Também são disponibilizados bornes para alimentação elétrica dos mesmos e conexão com os sensores que se encontram instalados no compressor radial.

Figura 18 – Painel elétrico



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A Raspberry Pi 3 B, utiliza o Raspbian como sistema operacional padrão, podendo ser instalados outros sistemas como o Linux ou Windows 10 IoT, também aceita diversas linguagens de programação, incluindo C, C++, Python e Java, o que deixa o sistema mais flexível.

A execução feita pela Raspberry abrange as etapas 2 e 3 deste projeto está representada através do diagrama de blocos na Figura 19, os códigos do programa relacionados a execução da Raspberry podem ser visualizados no anexo A e B deste trabalho.

Inicialmente, o microcomputador efetua a comunicação I2C com o multiplexador, enviando o endereço do acelerômetro que pretende receber os dados. Uma vez estabelecida a comunicação com o dispositivo, os dados são recebidos, lidos e armazenados.

Os dados dos eixos x, y e z enviados do acelerômetro para o microcontrolador estão no formato de LSB/g e devem ser manipulados utilizando o fator de escala de sensibilidade, a fim de obter valores de aceleração. No interesse de ter uma sensibilidade maior dos valores medidos pelo acelerômetro, será configurada inicialmente uma sensibilidade para leitura de 2g, utilizando o fator de sensibilidade conforme a Equação 12.

$$Acl = \frac{2g * \text{valor medido}}{\text{fator sensibilidade}} \quad (12)$$

Onde:

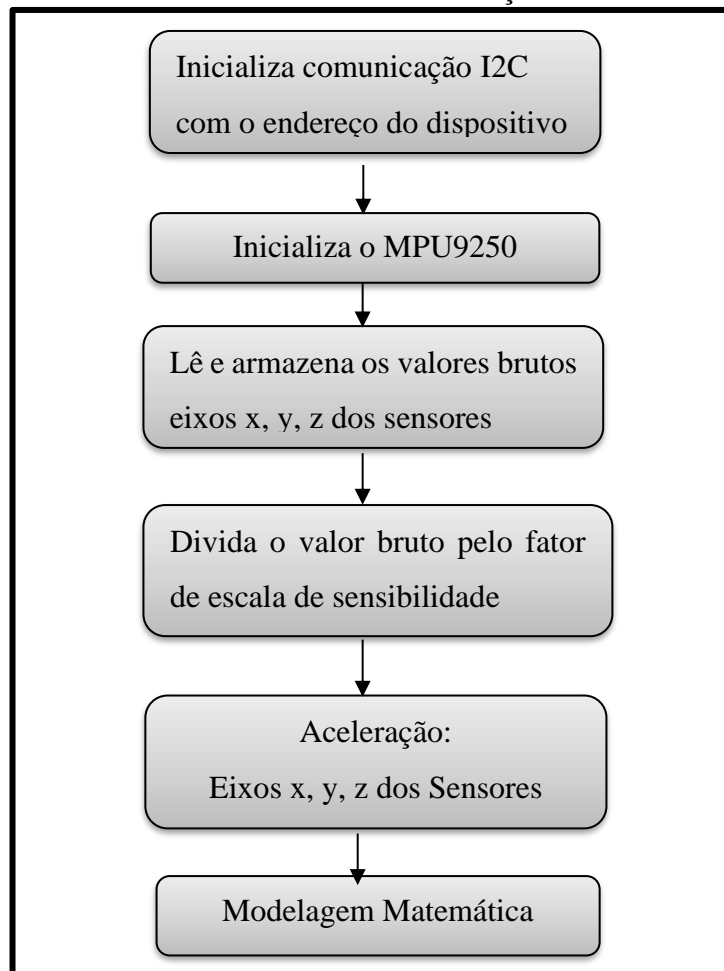
Acl = Valor de aceleração (m/s²);

g = 9,7908793(m/s²);

Fator sensibilidade = 32768 (LSB/g).

Após a obtenção dos valores de aceleração, o microcomputador executa o processamento matemático. A modelagem matemática é a etapa que será abordada no próximo capítulo, onde é explicada qual metodologia utilizada na obtenção dos valores de vibração.

Figura 19 – Diagrama de blocos representando interface de recepção e manipulação dos valores de vibração



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.4 PROCESSAMENTO MATEMÁTICO

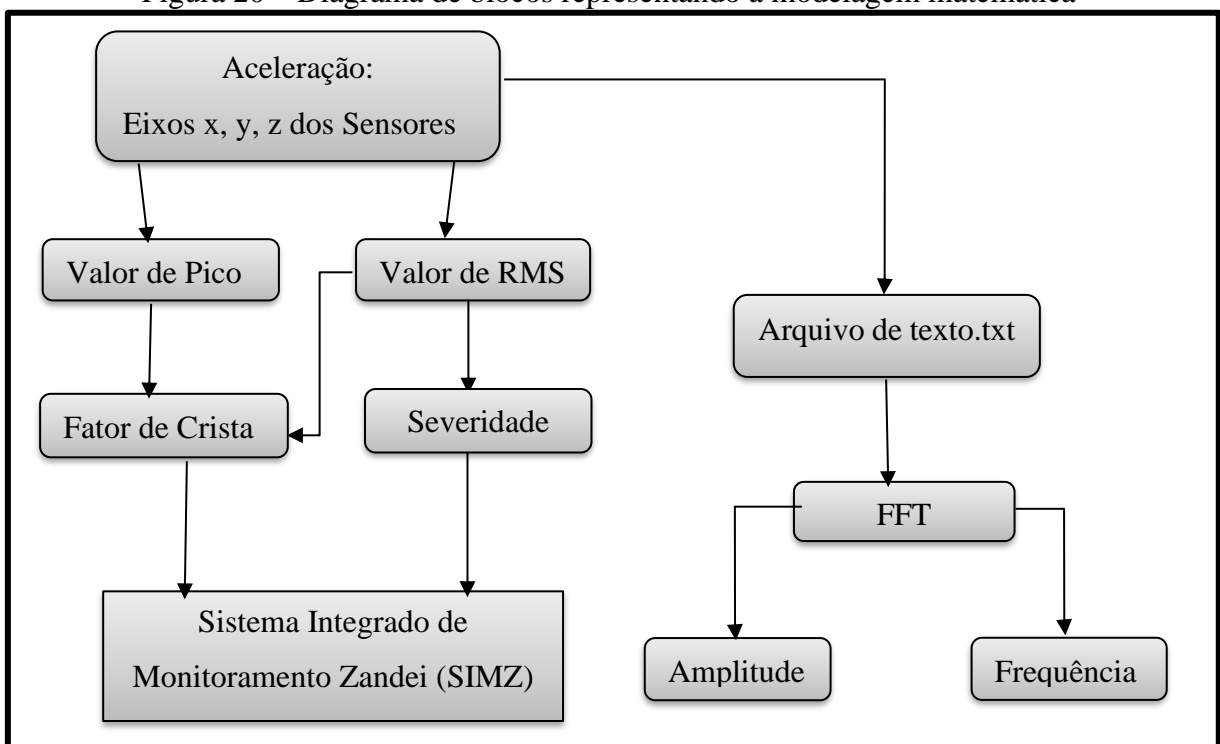
O processamento matemático é a etapa do projeto onde são implementados os algoritmos matemáticos, buscando a obtenção dos valores que serão enviados ao sistema de monitoramento e, posteriormente, serem utilizados na análise de vibração do equipamento.

A modelagem matemática relacionada ao processo de obtenção dos valores que são enviados para o sistema de monitoramento, está representada pelo diagrama de blocos na Figura 20. Conforme apresentado no diagrama de blocos, os valores de aceleração dos sensores passam por algumas etapas, com o objetivo de obter valores que representem as reais condições do equipamento analisado e torne confiável o sistema desenvolvido.

Inicialmente é extraído o valor de pico, calculado o valor RMS e obtido a severidade de vibração, posteriormente é calculado o fator de crista que é a relação entre o valor de pico e o valor RMS. Por fim os valores RMS e fator de crista são enviados para o SIMZ.

Se caso algum dos três eixos dos sensores ultrapassar o valor RMS limite estipulado no programa, é gerado um arquivo de texto (.txt) para cada eixo do sensor que apresentou alteração, onde são armazenados os dados de vibração. Podendo posteriormente ser implementado o algoritmo FFT e através do espectro do sinal de vibração apresentar os valores de amplitudes e frequências presentes no equipamento analisado.

Figura 20 – Diagrama de blocos representando a modelagem matemática



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.5 VALORES DE REFERÊNCIA

Com base nos referencias teóricos e dados de vibração que foram extraídos dos eixos x, y e z dos três acelerômetros Tabela 6, que apresenta as condições normais de funcionamento do equipamento analisado, serão uma das referências para estipular os valores de aceleração RMS(m/s^2) e o fator de crista, que serão utilizados na escolha dos parâmetros de indicação de falhas do equipamento.

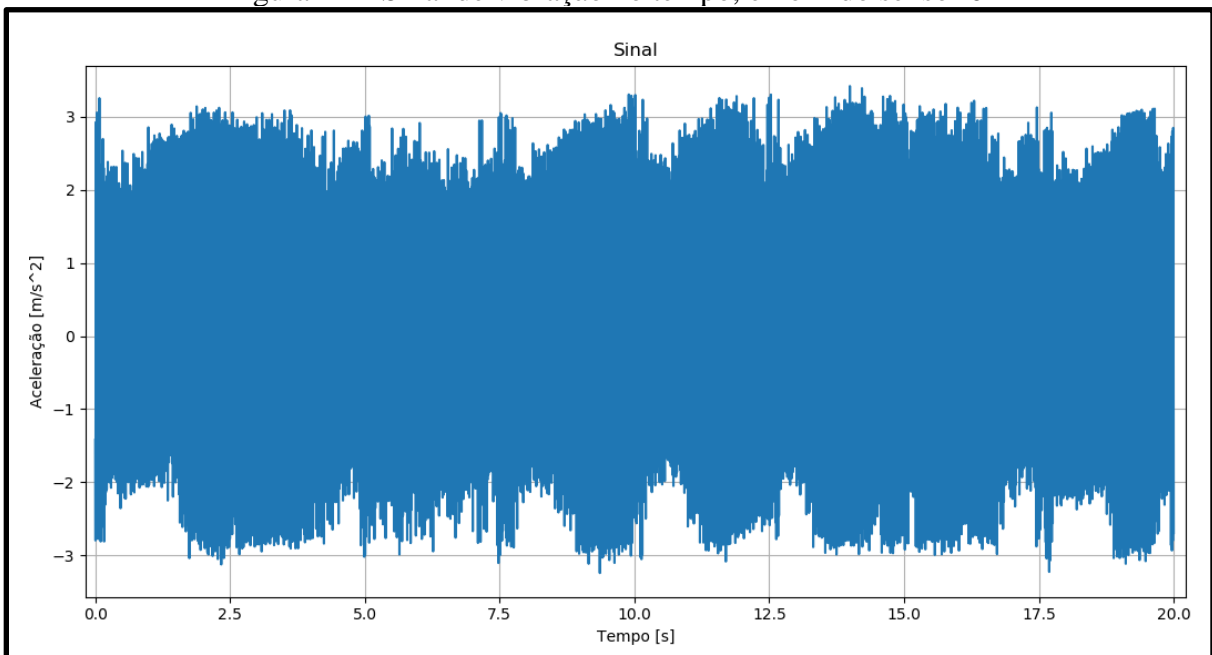
Já o sinal de vibração no tempo em condições normais, Figura 21, e a FFT do sinal, Figura 22, são utilizados como referência para indicar qual as amplitude e frequências que se encontram fora do limite, auxiliando no diagnóstico de falhas na análise de vibração deste trabalho. Os dados apresentados na sequencia deste trabalho foram extraídos de 4800 amostras, com frequência de amostragem de 240Hz.

Tabela 6 – Dados do compressor em condições normais de funcionamento

| Sensor | 01 | | | 02 | | | 03 | | |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| RMS | 1,42 | 1,92 | 2,75 | 0,96 | 1,72 | 2,31 | 2,29 | 3,49 | 0,51 |
| FC | 3,8 | 5,05 | 2,11 | 5,63 | 5,61 | 2,51 | 2,36 | 2,77 | 11,46 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 21 – Sinal de vibração no tempo, eixo Z do sensor 01

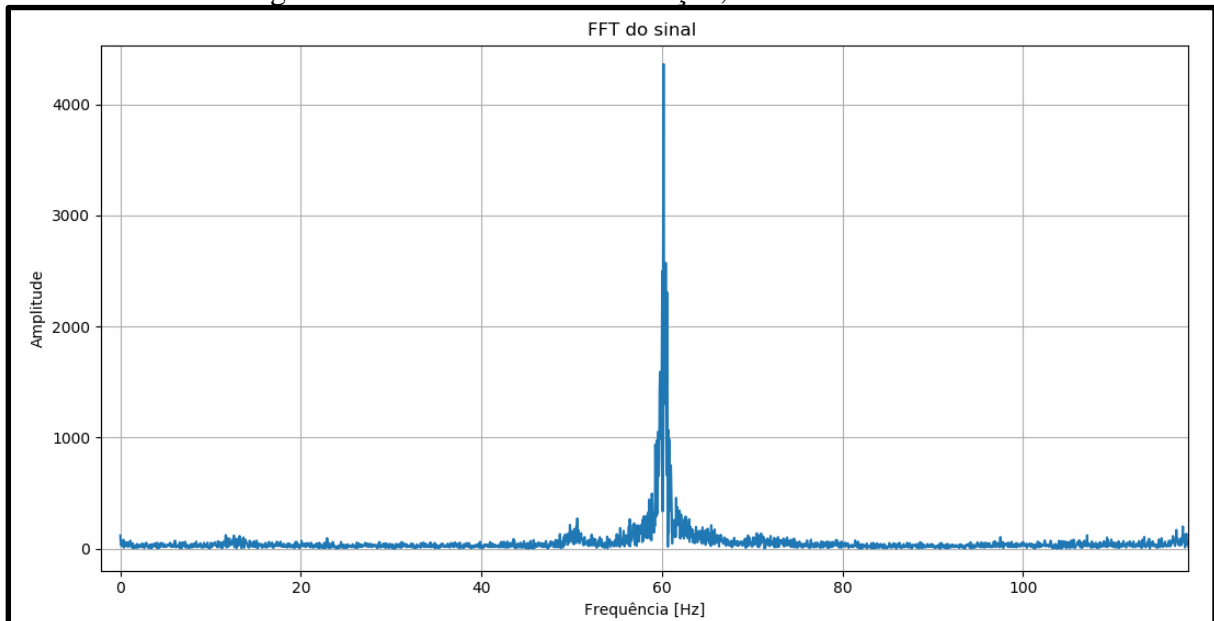


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Na FFT do sinal de vibração Figura 22, pode ser observado que a frequência predominante do sinal está em torno dos 60Hz. Se tratando de uma máquina de 2 polos, com 3550 rpm, a FFT gerada representa a frequência natural da máquina. Podendo ser obtido a frequência de funcionamento através da Equação 13.

$$\text{Hz} = \frac{\text{RPM}}{60} \quad (13)$$

Figura 22 – FFT do sinal de vibração, eixo Z do sensor 01



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.6 SISTEMA DE MONITORAMENTO

A quarta etapa do projeto se refere a construção do sistema de monitoramento, que tem como finalidade a recepção dos valores de vibração vindos da modelagem matemática e a identificação das condições reais de funcionalidade do equipamento analisado. Nesta etapa também é definido os critérios de envio das mensagens relacionadas aos defeitos do equipamento, podendo assim, ser uma ferramenta de auxílio na programação do setor de manutenção.

O Sistema Integrado de Monitoramento Zandei (SIMZ), é uma plataforma construída sobre o sistema open-source Thingsboard, que recebe, armazena e mostra os dados obtidos pelos sensores, além de disparar notificações em casos de valores anormais nas leituras dos sensores ou na falta de leitura dos mesmos. O compressor é cadastrado e identificado no sistema como dispositivo bomba de vácuo e o monitoramento é através da análise de vibração, conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Sistema Integrado de Monitoramento Zandei

The screenshot displays the SIMZ interface. On the left is a navigation sidebar. The main area shows the 'Devices' section for 'BOMBA DE VACUO'. A table lists the latest telemetry data:

| Last update time | Key | Value |
|---------------------|----------------|-------|
| 2020-11-09 18:31:35 | RMSY_01 | 0.039 |
| 2020-11-09 18:30:11 | RMSY_02 | 0.022 |
| 2020-11-09 18:30:53 | RMSY_03 | 0.043 |
| 2020-11-09 18:31:36 | RMSZ_01 | 0.045 |
| 2020-11-09 18:30:11 | RMSZ_02 | 0.05 |
| 2020-11-09 18:30:53 | RMSZ_03 | 0.034 |
| 2020-11-09 18:30:55 | Teste_Sensor_1 | 1 |

A red circle highlights a 'Details' button in the top right corner of the device details panel. A text label 'Cadastro do dispositivo' with an arrow points to the first row of the telemetry table.

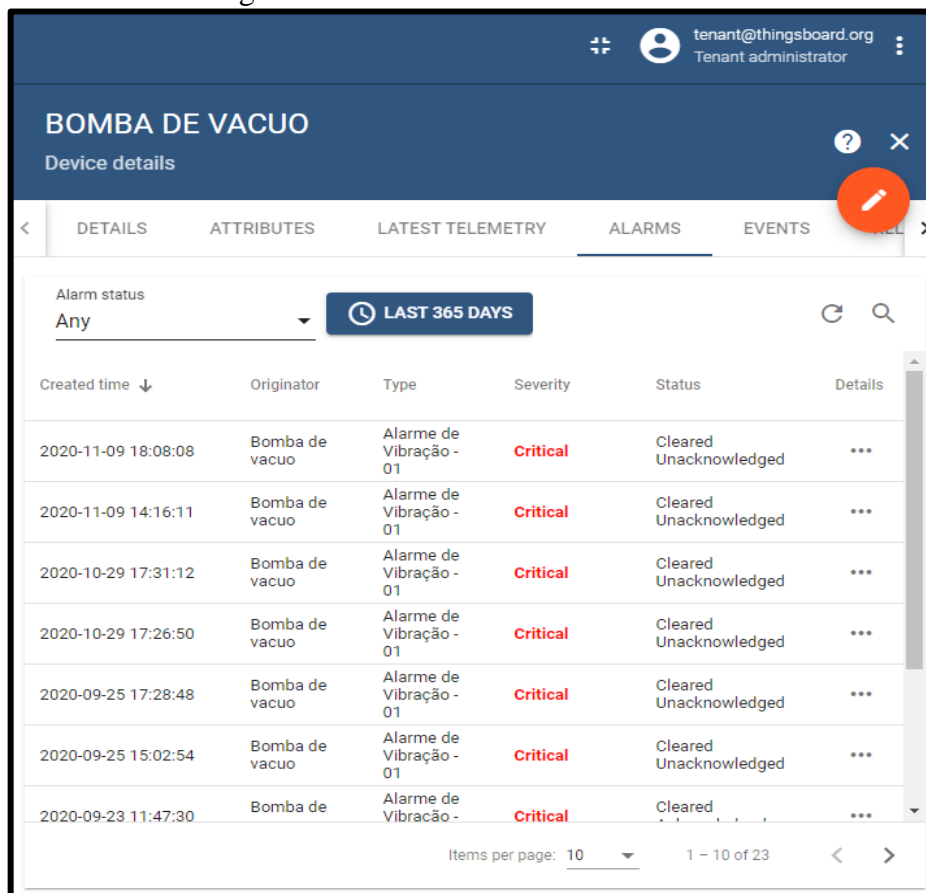
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O SIMZ suporta os protocolos padrões de comunicação para internet das coisas (IoT), sendo eles o Hypertext Transfer Protocol (HTTP), Constrained Application Protocol (CoAP) e o Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). No trabalho proposto conforme descrito na

etapa 2, a interface entre o microcomputador e o SIMZ será feita através do protocolo de comunicação HTTP.

Quando o microcomputador envia uma requisição de inclusão de dados dos sensores, o sistema recebe e trata os dados de acordo com as regras definidas, verificando se a faixa de valor lido está dentro dos valores pré-definidos. Diante desta verificação poderá ser incluído, mantido ou excluído um alarme. Os valores de leitura e alarmes ficam armazenados em um banco de dados interno do sistema, onde é possível ser acessado posteriormente se for necessário, conforme Figura 24, que apresenta os alarmes criados nos últimos 365 dias.

Figura 24 – Banco de dados dos alarmes



| Created time ↓ | Originator | Type | Severity | Status | Details |
|---------------------|----------------|-------------------------|----------|------------------------|---------|
| 2020-11-09 18:08:08 | Bomba de vacuo | Alarme de Vibração - 01 | Critical | Cleared Unacknowledged | ... |
| 2020-11-09 14:16:11 | Bomba de vacuo | Alarme de Vibração - 01 | Critical | Cleared Unacknowledged | ... |
| 2020-10-29 17:31:12 | Bomba de vacuo | Alarme de Vibração - 01 | Critical | Cleared Unacknowledged | ... |
| 2020-10-29 17:26:50 | Bomba de vacuo | Alarme de Vibração - 01 | Critical | Cleared Unacknowledged | ... |
| 2020-09-25 17:28:48 | Bomba de vacuo | Alarme de Vibração - 01 | Critical | Cleared Unacknowledged | ... |
| 2020-09-25 15:02:54 | Bomba de vacuo | Alarme de Vibração - 01 | Critical | Cleared Unacknowledged | ... |
| 2020-09-23 11:47:30 | Bomba de | Alarme de Vibração - | Critical | Cleared | ... |

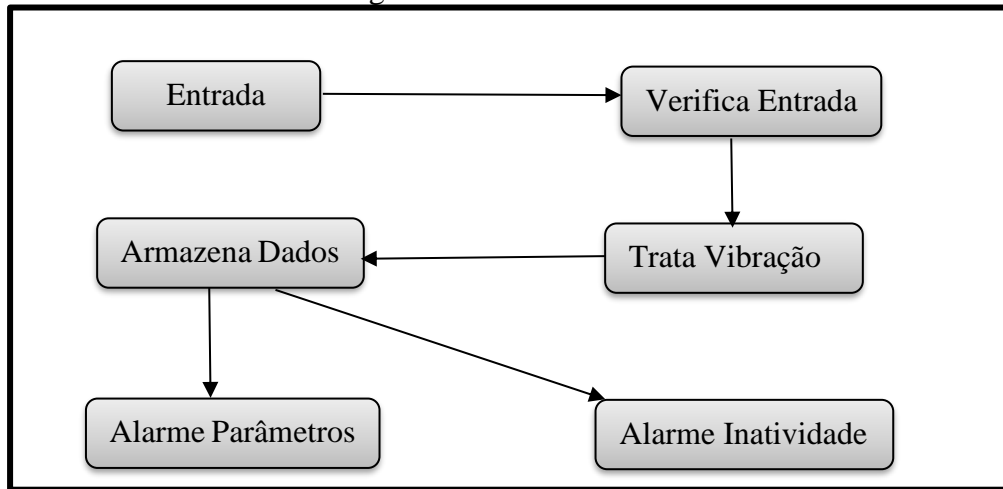
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O tratamento de dados é realizado através de uma cadeia de blocos, conforme Figura 25, onde cada bloco é configurado para realizar uma determinada ação sobre os dados recebidos. Internamente nos blocos é possível personalizar certas ações, alterando o código de programação JavaScript.

Os dados dos sensores de vibração são enviados pelo microcomputador e recebido pelo bloco de entrada do sistema, passando pelos blocos de verificação e de tratamento de dados, se no caso os dados recebidos não precisarem de nenhum tratamento, serão somente armazenados

no banco de dados pelo bloco que armazena os dados nessa cadeia. Após isso, ele irá para a cadeia de alarmes de parâmetros ou de inatividade.

Figura 25 – Cadeia de blocos

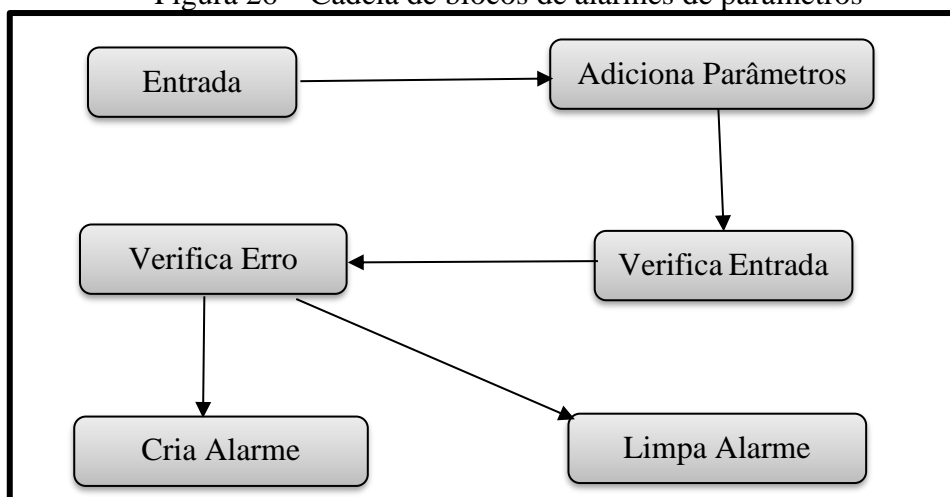


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Na cadeia de blocos de alarmes Figura 26, o dado entra no bloco de entrada, passando pelo bloco que adiciona os parâmetros, buscando no banco de dados os valores de referência. Após isso, no bloco que verifica a entrada, os valores recebidos serão comparados com os valores de referência obtidos no banco de dados. Caso estejam fora da faixa definida, passam pelo bloco que verifica o erro, verificando qual é o parâmetro que está fora da faixa definida e, em seguida o alarme referente ao defeito é criado, conforme apresentado na Figura 25. Se nenhum valor estiver fora da faixa, o dado é encaminhado para o bloco que limpa os alarmes ativos, caso haja algum.

Na cadeia de alarmes de inatividade, quando o sistema observar que passou um tempo sem recebimento de dados de um sensor específico, o sistema dispara um alarme indicando que sensor está inativo.

Figura 26 – Cadeia de blocos de alarmes de parâmetros

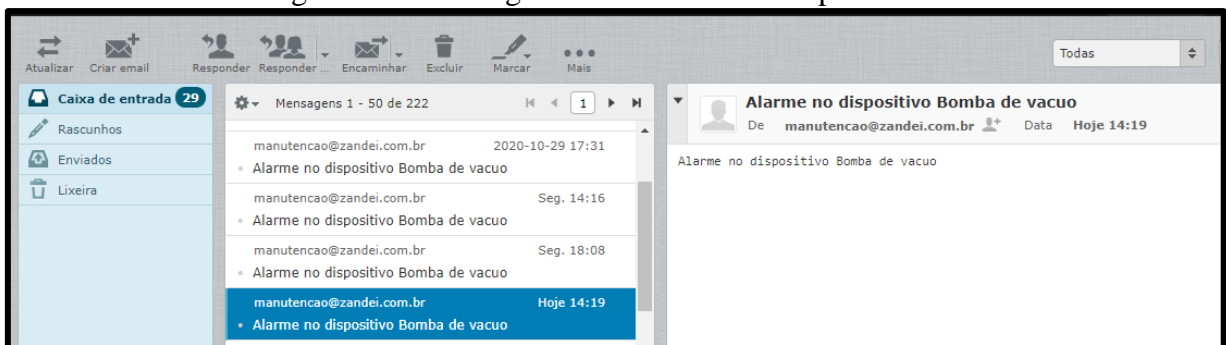


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O sistema disponibilizará uma interface de usuário Figura 23, que pode ser acessada de um celular ou de outro equipamento, por meio de um navegador web, onde é possível a visualização das informações referentes aos sensores e suas medições, além de ser possível configurar os valores de referência para a criação dos alarmes.

Os alarmes criados nas leituras dos instrumentos são monitorados por um dispositivo, que em caso de haver algum alarme ativo, dispara avisos através de mensagens de e-mail para os usuários cadastrados, conforme apresentado na Figura 27. As mensagens de alarmes são disparadas diariamente respeitando um nível de escalonamento, que vão do mecânico ao diretor. Se o alarme não for silenciado por alguém ou o parâmetro não voltar ao normal, o nível de disparo é alterado, aumentando a quantidade e o nível de hierarquia dos usuários que recebem as mensagens.

Figura 27 – Mensagem de alarme recebida por e-mail



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4 AVALIAÇÃO DO SISTEMA E ANÁLISE DOS DADOS

A última etapa está relacionada a avaliação do sistema e a análise dos dados, com objetivo de caracterizar o comportamento do equipamento em condições anormais de funcionamento, e em conjunto com os valores de referência, servir como parâmetro na determinação dos valores utilizados no Sistema Integrado de Monitoramento Zandei (SIMZ).

Na análise dos dados são comparados os valores de RMS em condição de falha e os valores de referência, buscando quais sensores e eixos sofrem maiores alterações quando relacionados aos valores de referência Tabela 5. Entre os valores RMS analisados é extraído o que tem maior variação de todos, afim de que seja feito à FFT do sinal de vibração, relacionada ao eixo do sensor com maior variação de valor RMS.

4.1 RESULTADOS

Para avaliar o desempenho do sistema foram feitas simulações de falhas, sendo inseridas algumas alterações no equipamento, as quais são submetidas posteriormente à análise de dados.

As alterações inseridas na simulação de falhas tiveram como finalidade causar modificações incipientes e defeitos que comprometeriam o funcionamento do compressor, o que exigiria uma imediata paralisação do equipamento. As alterações foram:

1. desbalanceamento do eixo da tampa traseira do motor;
2. desbalanceamento do eixo da turbina;
3. desbalanceamento da ventoinha;
4. turbina de sucção frouxa;
5. folga tampa frontal do compressor;
6. rolamento com defeito inicial;
7. rolamento com defeito avançado.

4.1.1 Desbalanceamento do eixo, tampa traseira do motor e turbina

Na simulação de desbalanceamento do eixo tampa traseira do motor, posição sensor 01, foi adicionado um metal de 38,2g ao eixo, conforme pode ser observado na Figura 28.

No desbalanceamento do eixo turbina, foi adicionado ao eixo o mesmo metal conforme foi feito na simulação do desbalanceamento do eixo da tampa no motor, onde foi trocado a posição de fixação do mesmo, ficando entre o sensor 02 e 03, aonde se encontra a turbina.

Figura 28 – Desbalanceamento eixo do motor



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Na análise dos dados tabela 7, pode ser observado que no caso de uma falha 01, desbalanceamento do eixo na tampa traseira do motor, os valores RMS sofrem alterações em 8 de 9 eixos dos sensores. A alteração mais significativa é de 3,28 vezes, no eixo X do sensor 03, sensor opostos a posição do defeito.

Já no caso de uma falha 02, desbalanceamento do eixo da turbina, os valores RMS que tem alterações mais significativas são as dos eixos Y do sensor 02, com valores de amplitude de 2,54, eixo X e eixo Z do sensor 03 que tem amplitude de 3,08 e 2,14 respectivamente. Ambos sensores que apresentam alterações a cima da nominal abrangem a posição do defeito. Os demais valores ficam abaixo do valor RMS nominal.

Diante do critério para escolha do sensor e eixo que é feito a análise da FFT do sinal de vibração, nos dois casos o eixo X do sensor 03 foi escolhido.

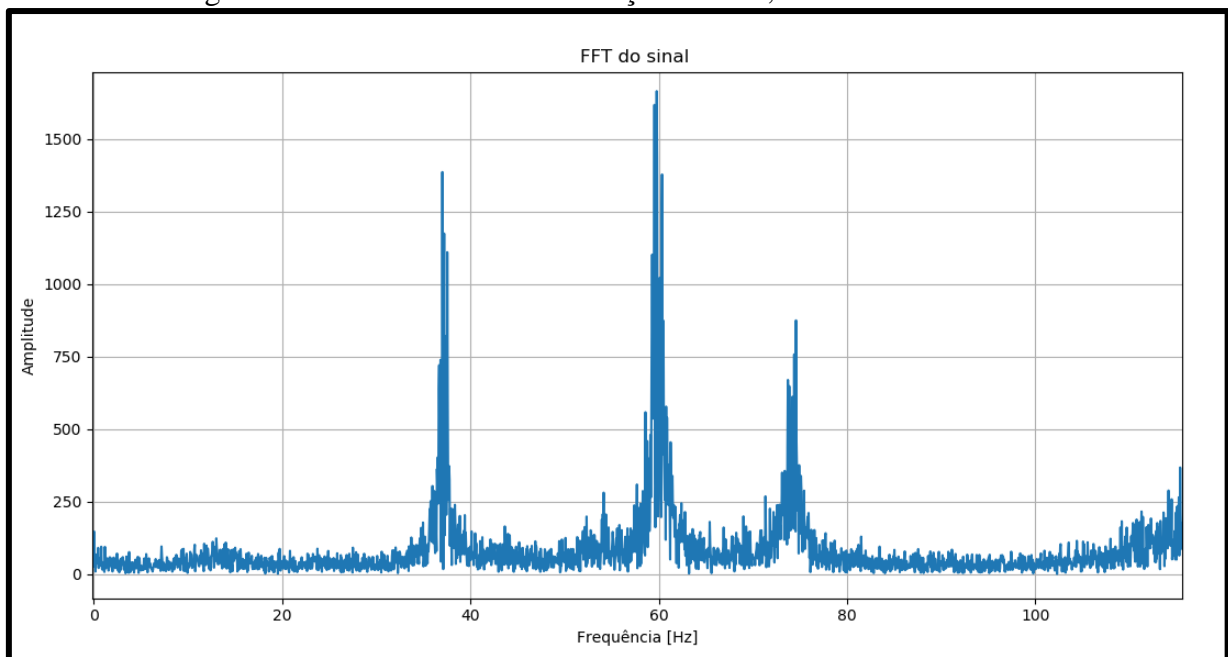
Tabela 7 – Valores em condições de desbalanceamento do eixo, falha 01 e 02

| Sensor | 01 | | | 02 | | | 03 | | |
|--------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|-------------|
| | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| RMS falha 01 | 2,41 | 3,87 | 4,56 | 2,63 | 2,96 | 1,23 | 7,52 | 5,4 | 1,18 |
| RMS falha 02 | 0,57 | 0,99 | 1,92 | 0,72 | 4,36 | 1,83 | 7,05 | 0,97 | 1,09 |
| Alteração 01 | 1,7 | 2,02 | 1,66 | 2,74 | 1,72 | 0,53 | 3,28 | 1,55 | 2,31 |
| Alteração 02 | 0,4 | 0,52 | 0,7 | 0,75 | 2,54 | 0,79 | 3,08 | 0,28 | 2,14 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A Figura 29, representa o espectro do sinal de vibração do sensor 3 eixo X em condições normais, podendo ser observado três frequências predominantes, sendo elas de 37Hz, com amplitude de 1387,59HZ, com amplitude de 1665 e 74Hz, com amplitude de 890.

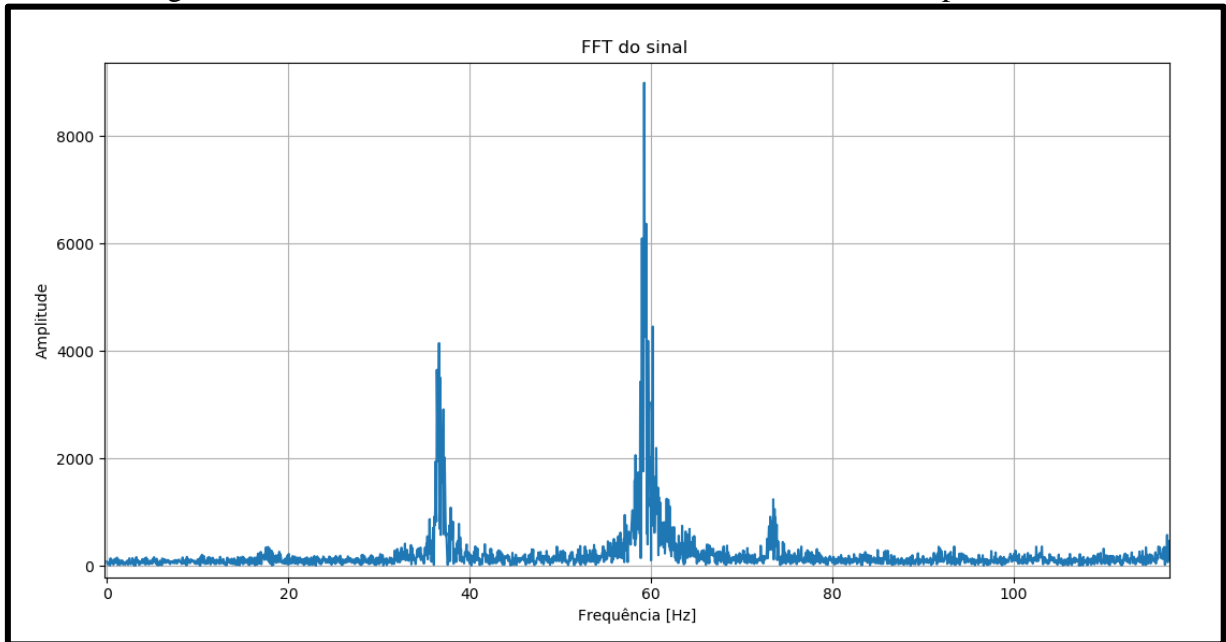
Figura 29 – FFT do sinal em condição normal, eixo X do sensor 03



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Na figura 30 que representa o espectro do sinal em condições de falha de desbalanceamento do eixo, tampa traseira do motor, observa-se que, duas das três frequências predominantes no sinal sofrem alterações em suas amplitudes, principalmente as frequências de 59Hz e 37Hz, chegando a amplitudes de 9000 e 4150 respectivamente.

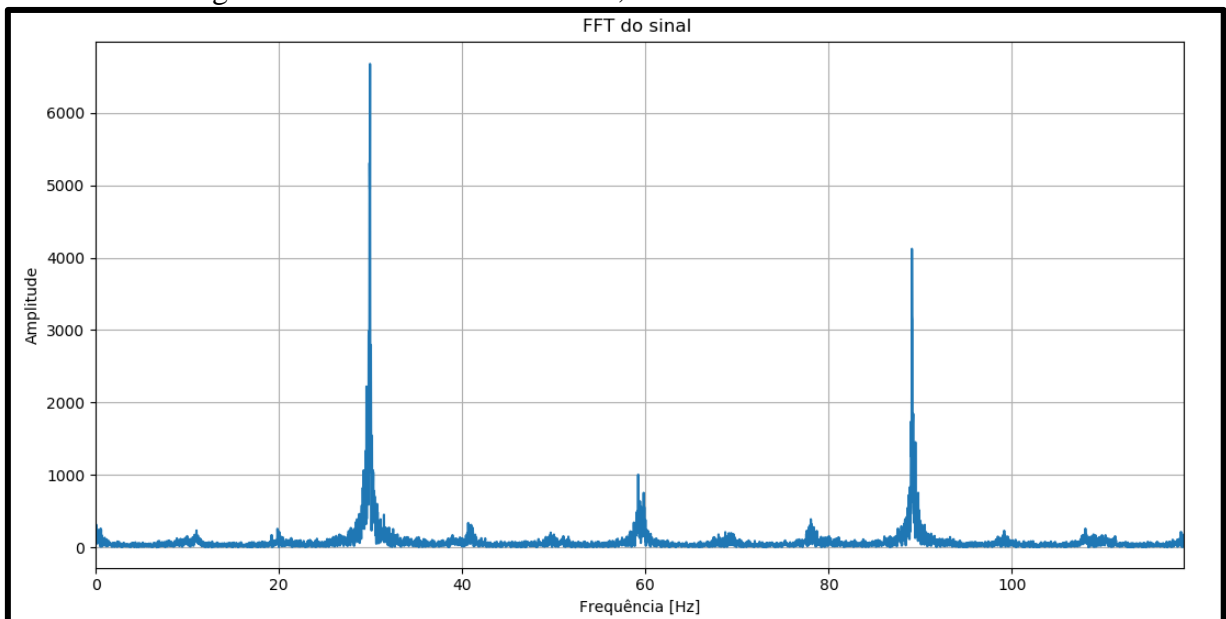
Figura 30 – FFT do sinal falha 01, desbalanceamento eixo tampa traseira



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Já a Figura 31, que representa o espectro do sinal em condições de falha de desbalanceamento do eixo da turbina do compressor, pode ser observado o surgimento de outras frequências, principalmente as com amplitude de 6700 em 30Hz e 4120 em 89Hz. As frequências predominantes tiveram uma leve diminuição no seu valor de amplitude.

Figura 31 – FFT do sinal falha 02, desbalanceamento eixo turbina

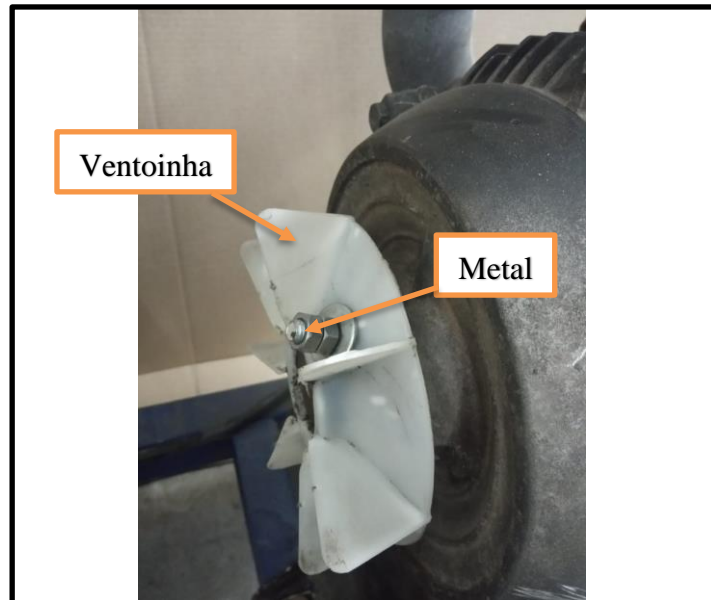


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.1.2 Desbalanceamento da ventoinha

Na simulação de desbalanceamento da ventoinha, posição sensor 01, foi adicionado um metal de 30,2g ao eixo, conforme pode ser observado na Figura 32.

Figura 32 – Desbalanceamento da ventoinha



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Na análise dos dados tabela 8, pode ser observado que no caso de uma falha 03, desbalanceamento ventoinha, o valor RMS que sofre alteração mais significativa é de 2,63 vezes o valor nominal, no eixo X do sensor 01, sensor este instalado próximo ao local da falha. Os demais sensores têm alterações de menor valor em 3 dos seus 6 eixos. Diante disso, o eixo X do sensor 01 foi escolhido para que seja feito a análise da FFT do sinal de vibração.

Tabela 8 – Valores em condições de falha 03, desbalanceamento da ventoinha

| Sensor | 01 | | | 02 | | | 03 | | |
|--------------|-------------|------|------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|
| | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| RMS falha 03 | 3,74 | 1,53 | 2,16 | 0,97 | 3,28 | 2,58 | 4,26 | 3,7 | 0,85 |
| Alteração 03 | 2,63 | 0,8 | 0,79 | 1,01 | 1,91 | 1,12 | 1,86 | 1,06 | 1,67 |

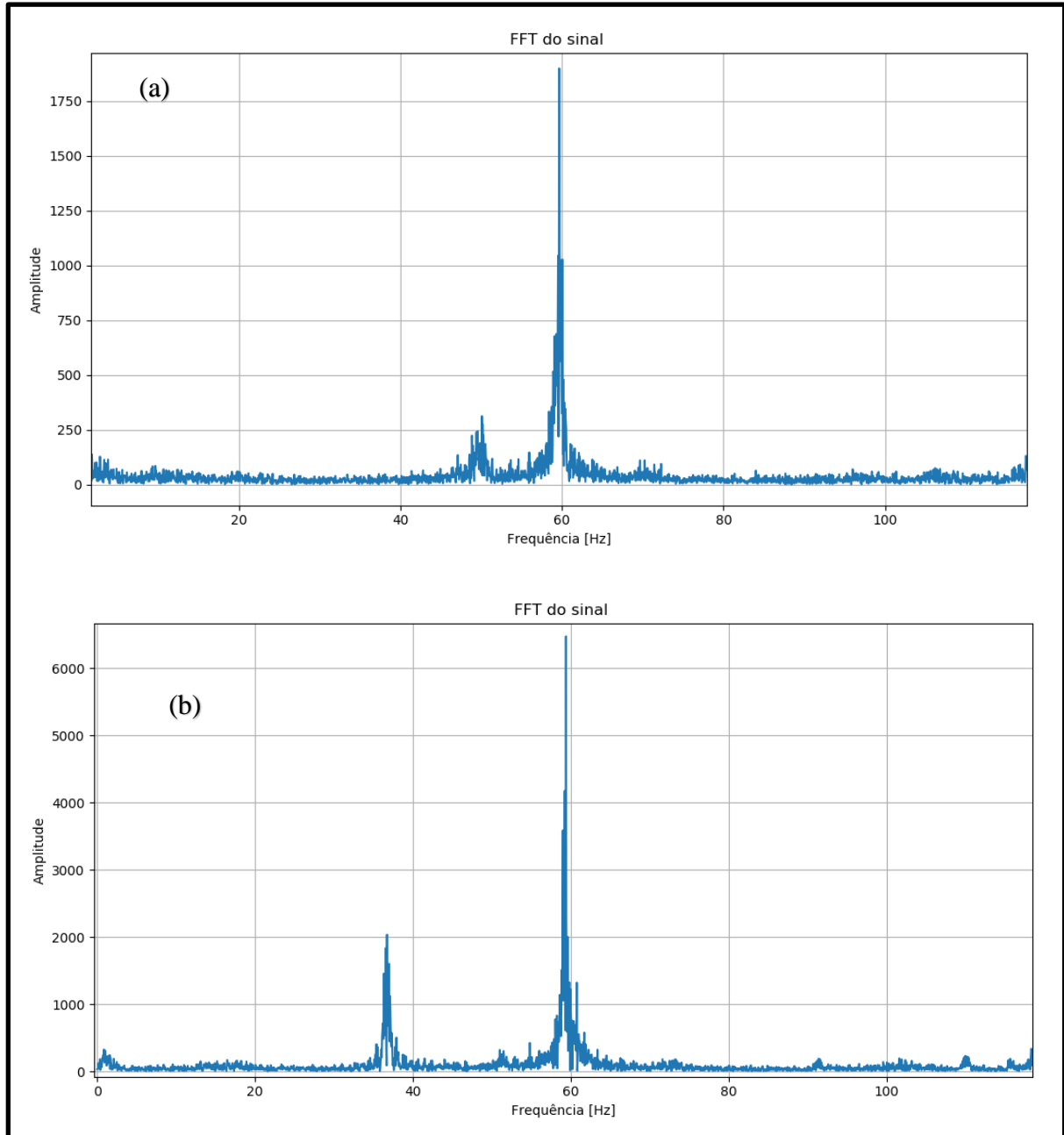
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Na figura 33(a) demonstra o espectro do sinal de vibração do sensor 02 eixo X em condições normais, podendo ser observado os valores de amplitude de 310 na frequência de 50Hz e 1900 na frequência de 59Hz.

Já a figura 33(b) que representa o espectro do sinal em condições de falha, pode ser observado que a frequência de 50Hz não sofre alteração, já a frequência de 59Hz tem seu valor

de amplitude alterado para o valor de 6470 e também surge uma nova frequência de 37Hz com valor de amplitude de 2030.

Figura 33 – FFT do sinal, em condição normal (a) e desbalanceamento da turbina (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.1.3 Turbina de sucção frouxa

Na simulação de turbina do compressor frouxa, falha que se encontra na posição entre o sensor 02 e 03 do sistema, foi deixado sem aperto a turbina de sucção Figura 34.

Figura 34 – Turbina do compressor



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Analisando os dados da tabela 9, pode ser observado que no caso de uma falha 04, turbina de sucção frouxa, os valores RMS que sofrem alterações mais significativas são os do eixo X sensor 01, eixo Y sensor 02 e eixo Z sensor 3.

Dos três sensores o que mais sofreu alteração foi o sensor 01, tendo uma alteração de 3,72 vezes seu valor RMS, sensor este que se encontra instalado em posição mais distante da falha do que os demais sensores. Conforme critério de escolha para que seja feito o análise FFT do sinal de vibração o sensor 01 eixo X, foi escolhido.

Tabela 9 – Valores em condições de falha 04, turbina de sucção frouxa

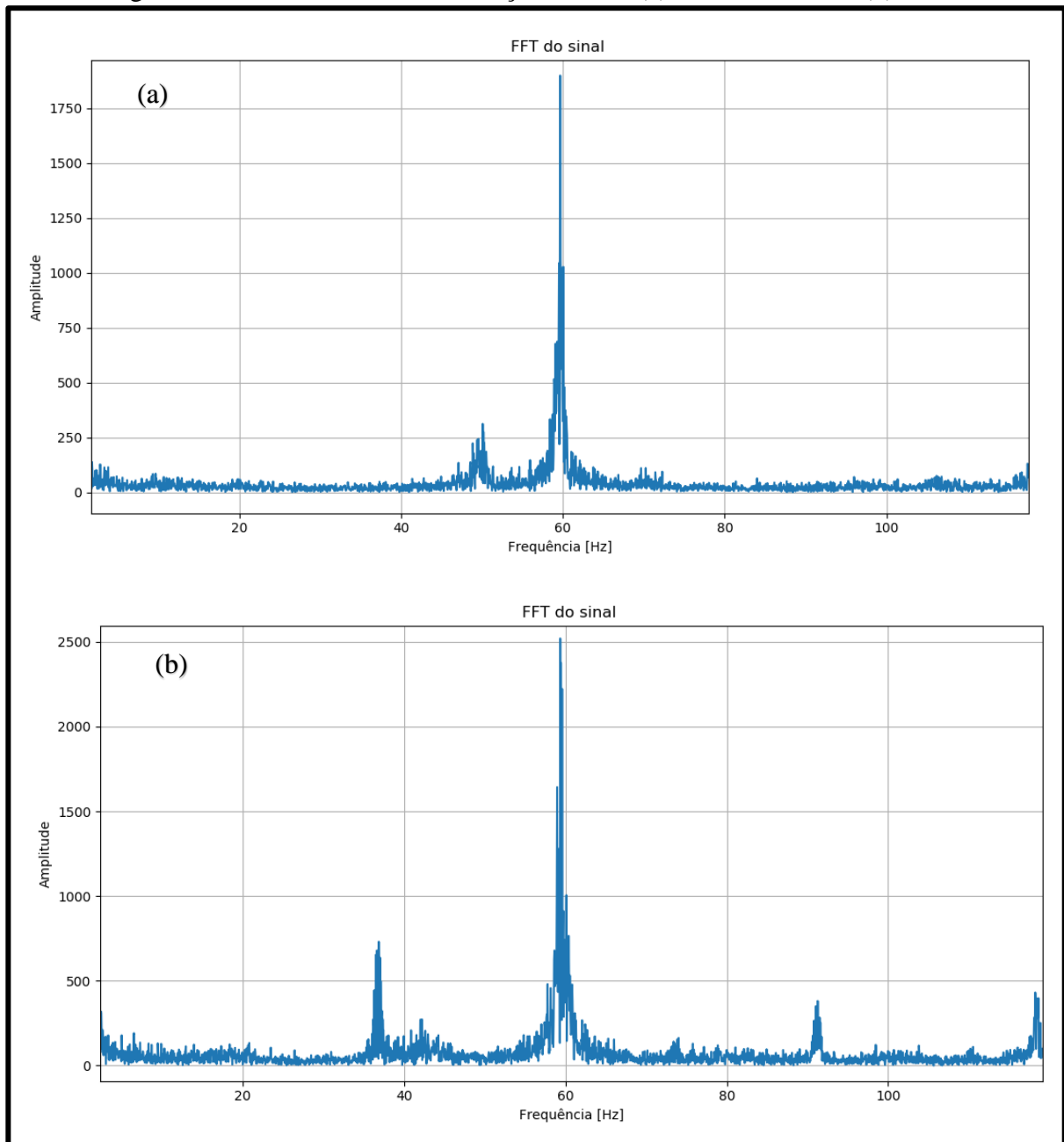
| Sensor | 01 | | | 02 | | | 03 | | |
|--------------|-------------|------|------|------|-------------|------|------------|-------------|-------------|
| | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| RMS falha 04 | 5,28 | 1,76 | 1,94 | 1,06 | 5,7 | 2,06 | 2,98 | 6,46 | 1,4 |
| Alteração 04 | 3,72 | 0,92 | 0,71 | 1,1 | 3,31 | 0,89 | 1,3 | 1,85 | 2,75 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Na Figura 35(a) demonstra o espectro do sinal de vibração do sensor 01 eixo X em condições normais, podendo ser observado os valores de amplitude de 310 na frequência de 50Hz e 1900 na frequência de 59Hz.

Já a Figura 35(b) que representa o espectro do sinal em condições de falha de turbina frouxa, pode ser observado que a frequência de 59Hz tem seu valor de amplitude alterado para o valor de 2520 e também surgem as frequências de 37Hz, 91Hz e 119Hz, com valores de amplitude de 730, 380 e 430 respectivamente.

Figura 35 – FFT do sinal, em condição normal (a) e turbina frouxa (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.1.4 Folga tampa frontal do compressor

Na simulação de folga na tampa frontal do compressor, falha que se encontra na posição do sensor 03, foi deixado uma folga entre o rolamento e tampa frontal, Figura 36.

Figura 36 – Tampa frontal do compressor



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Analisando os dados da tabela 10, pode ser observado que no caso de uma falha 05, folga na tampa frontal do compressor, os valores RMS que sofrem alterações mais significativas são os dos eixos X e Y do sensor 2, com valores de amplitude de 3,29X e 3,27Y. Como os valores de amplitude dos dois eixos ficaram próximos, poderia ser escolhido qualquer um dos dois eixos. No momento da análise do FFT percebeu-se que o eixo Y tem uma alteração maior de amplitude, desta forma foi o eixo escolhido para representar o espectro da falha.

Tabela 10 – Valores em condições de falha 05, folga na tampa frontal do compressor

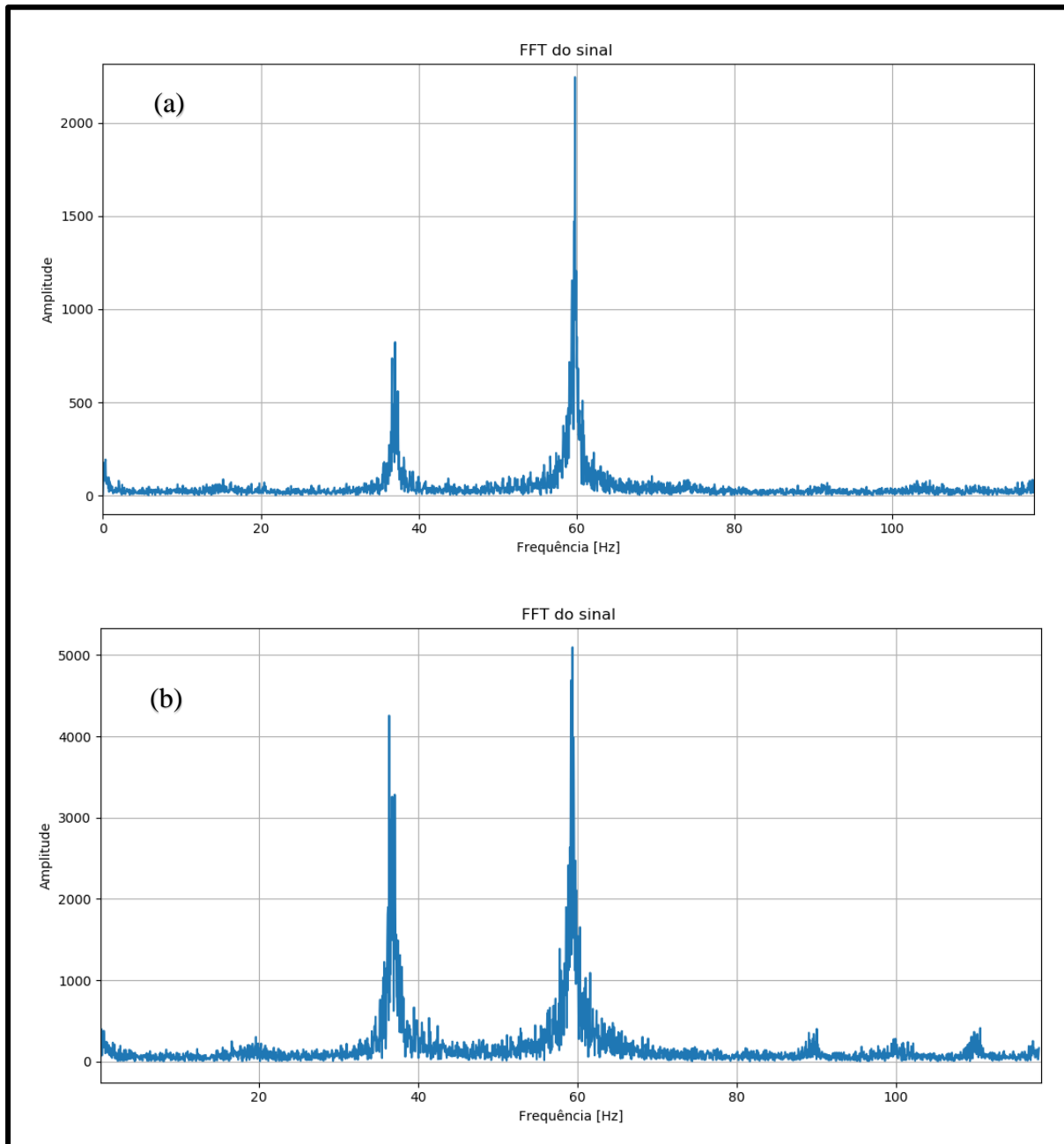
| Sensor | 01 | | | 02 | | | 03 | | |
|--------------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|-------------|------|
| | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| RMS falha 05 | 1,28 | 3,91 | 3,97 | 3,16 | 5,62 | 2,67 | 2,52 | 4,47 | 0,54 |
| Alteração 05 | 0,9 | 2,04 | 1,44 | 3,29 | 3,27 | 1,16 | 1,1 | 1,28 | 1,06 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A figura 37(a), demonstra o espectro do sinal de vibração do sensor 02, eixo Y em condições normais de funcionamento, onde pode ser observado os valores de amplitude de 830 na frequência de 37Hz e 2250 na frequência de 59Hz.

Já a figura 37(b), que representa o espectro do sinal em condições de falha de folga na tampa frontal do compressor, podendo ser observado que a frequência de 37Hz tem seu valor de amplitude alterado para o valor de 4250 e a amplitude da frequência de 59Hz passa a ter um valor de 5100.

Figura 37 – FFT do sinal, em condição normal (a) e folga na tampa frontal do compressor (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.1.5 Rolamento do compressor com falha inicial e avançada

Para simulação de falha de rolamento do compressor, ilustrado na Figura 38, foram feitos testes com rolamento apresentando início de desgaste e rolamento com falha avançada. No caso de falha avançada, se o rolamento não for substituído por outro, poderá comprometer a funcionalidade do compressor.

Figura 38 – Rolamento do compressor



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para análise de falhas em rolamentos o valor do fator de crista deve ser feito em conjunto com o valor RMS, devido que, os rolamentos com falhas apresentam picos altos de aceleração, alterando de forma significativa o valor do FC.

Analisando os dados Tabela 11, pode ser observado que no caso de uma falha 06, que representa a uma falha inicial de rolamento do compressor, os valores RMS sofrem alterações em 5 dos 9 eixos dos sensores, com alteração mais significativa no eixo X do sensor 01. Os valores de fator de crista ficam próximo aos valores nominal, com pequena variação em um dos eixos.

No caso de uma falha 07, que é uma falha avançada de rolamento do compressor, os valores RMS sofrem alteração maiores que a falha 06 e em 6 dos 9 eixos, onde o eixo Z do sensor 01 apresenta maior alteração, sendo o sensor escolhido para a análise do FFT do sinal.

Os valores do fator de crista também sofrem alterações significativas, em 8 dos 9 eixos dos sensores.

Tabela 11 – Valores em condições de falha no rolamento, inicial 06 e avançada 07

| Sensor | 01 | | | | 02 | | | | 03 | | |
|------------------|-------------|-------------|-------------|--|------------|-------------|-------------|--|-------------|-------------|-------------|
| | X | Y | Z | | X | Y | Z | | X | Y | Z |
| RMS falha 06 | 2,35 | 1,8 | 2,44 | | 1,07 | 2,46 | 2,18 | | 1,98 | 3,82 | 0,48 |
| FC falha 06 | 2,23 | 5,36 | 2 | | 3,7 | 3,93 | 2,22 | | 2 | 2,53 | 6,76 |
| Alteração RMS 06 | 1,66 | 0,94 | 1,25 | | 1,11 | 1,43 | 0,94 | | 0,86 | 1,09 | 0,95 |
| Alteração FC 06 | 0,59 | 1,06 | 0,95 | | 0,66 | 0,7 | 0,88 | | 0,85 | 0,91 | 0,59 |
| RMS falha 07 | 2,13 | 3,98 | 6,57 | | 0,86 | 2,51 | 2,18 | | 2,03 | 3,66 | 0,65 |
| FC falha 07 | 2,95 | 5,71 | 3,65 | | 10,7 | 9,85 | 6,92 | | 4,45 | 6,69 | 24,3 |
| Alteração RMS 07 | 1,5 | 2,07 | 2,39 | | 0,9 | 1,46 | 0,94 | | 0,89 | 1,05 | 1,27 |
| Alteração FC 07 | 0,78 | 1,13 | 1,73 | | 1,9 | 1,76 | 2,76 | | 1,89 | 2,42 | 2,12 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

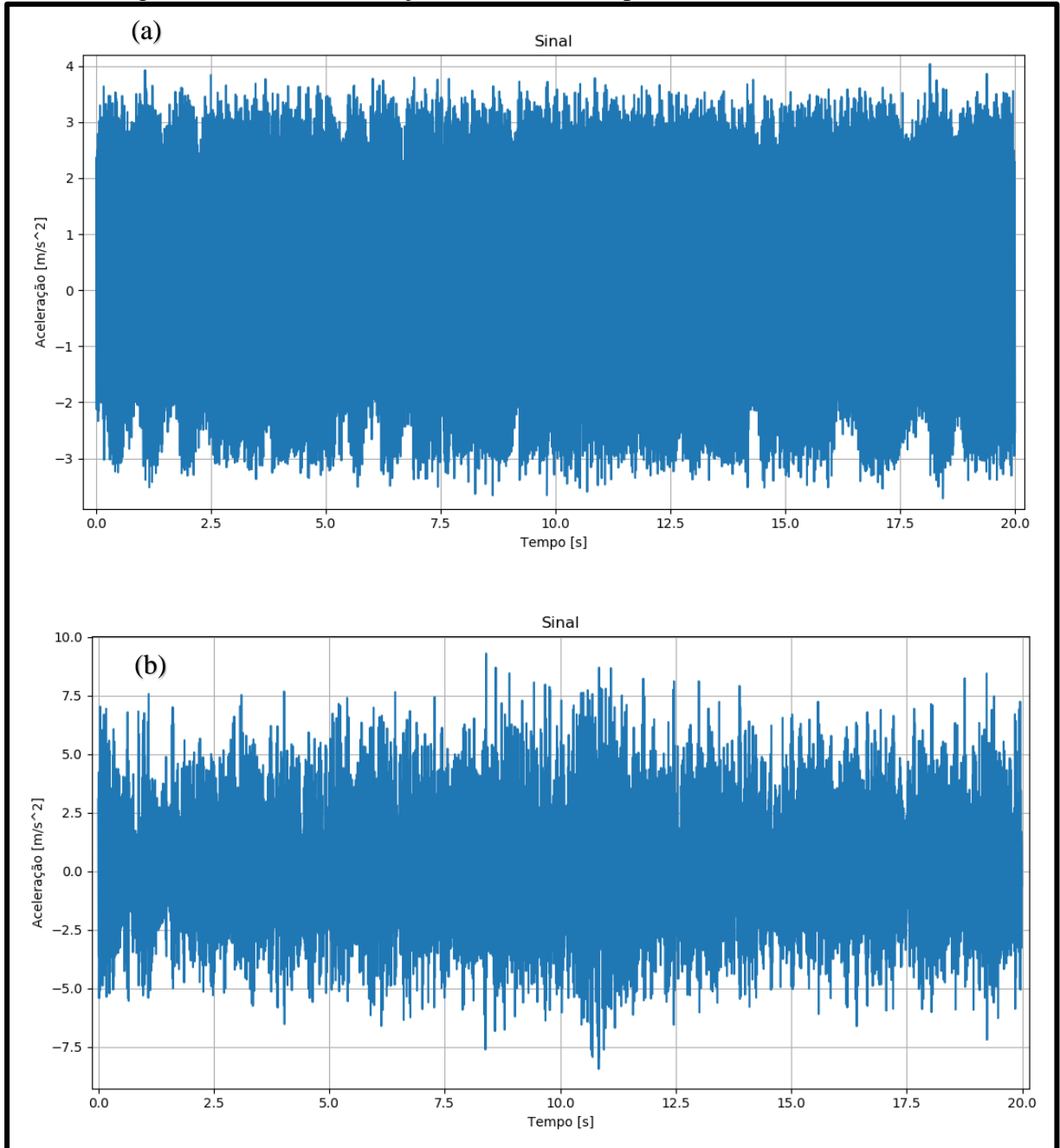
Com objetivo de melhor representar as alterações do sinal na falha de rolamento, a análise será feita através do sinal de vibração no tempo e também a FFT do sinal.

Na análise do sinal de vibração do domínio no tempo, a Figura 39(a) representa uma falha de rolamento inicial, podendo ser observado que os picos máximos de aceleração estão em torno de 4m/s^2 , pouco acima dos valores de referência representados anteriormente na Figura 21. No caso de uma falha avançada de rolamento Figura 39(b), o sinal de vibração tem um aumento considerável de picos de aceleração, onde alguns valores chegam ficar próximos a 10m/s^2 . Como o valor do fator de crista está diretamente relacionado ao valor de pico, quanto maior o valor de pico maior vai ser o FC, conforme valores representados na Tabela 11.

Ao ser analisado o FFT do sinal de vibração da falha avançado de rolamento Figura 40(b) e comparado com a Figura 40(a) que representa o início da falha, pode ser observado que a pouca variação de amplitude na frequência de 37Hz, porem na falha avançada a uma diminuição na amplitude da frequência de 59Hz, e o surgimento de novos valores de amplitudes entre a frequência de 59Hz e 120Hz.

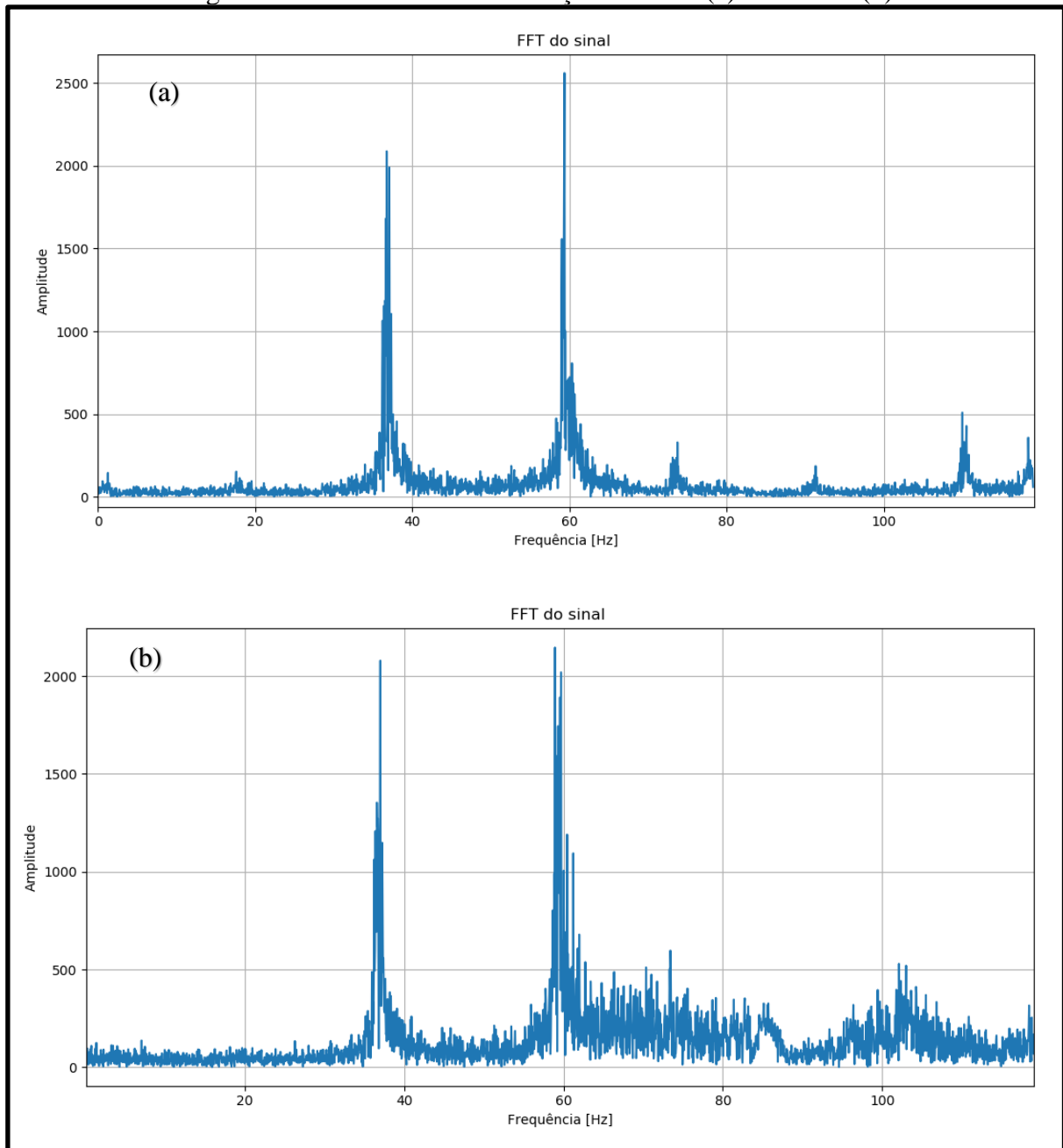
Quando comparado o FFT das duas falhas com a FFT em condições normais Figura 22, é percebido que a uma diminuição no valor de amplitude de 4200, para valores próximos de 2500 na frequência de 59Hz e o surgimento da frequência de 37Hz, com valores de amplitude em torno 2000, em ambos os casos.

Figura 39 – Sinal de vibração domínio do tempo, falha 06 (a) e falha 07 (b)



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 40 – FFT do sinal de vibração falha 06 (a) e falha 07 (b)

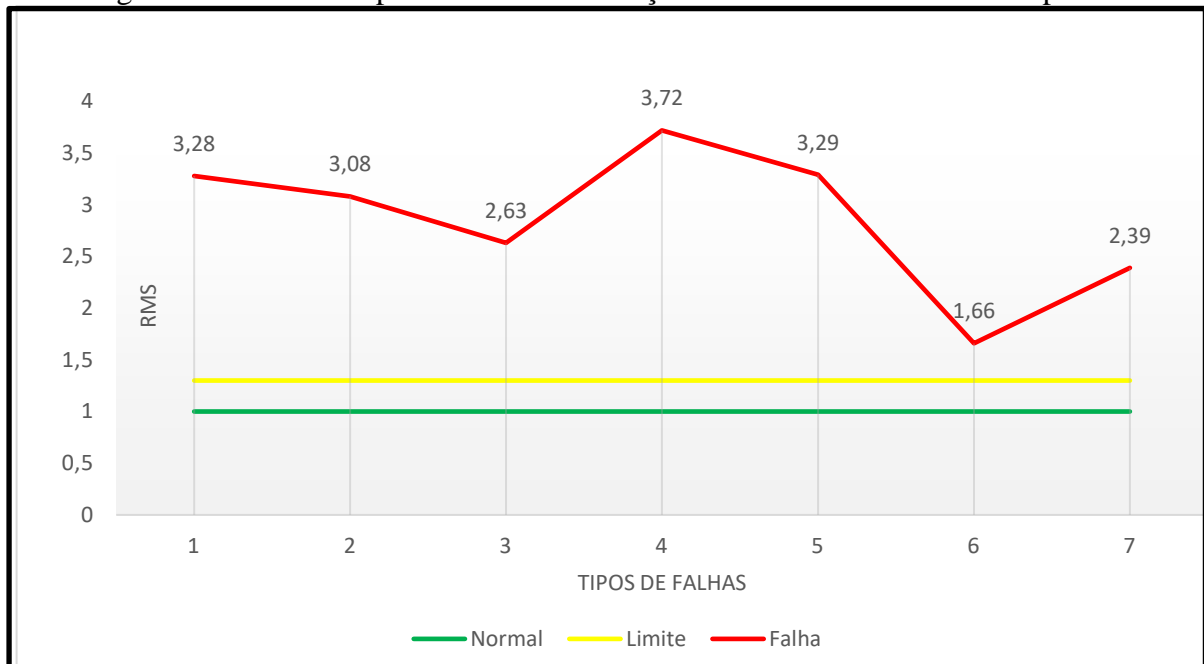


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na análise dos dados de vibração obtidos através das simulações de falhas, verifica-se que o sistema conseguiu detectar todas as falhas inseridas no equipamento, e que os valores RMS que representam as falhas estão entre 1,66 e 3,72 vezes os valores de condições normais de funcionamento do compressor, conforme apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Gráfico representando as condições de funcionamento do compressor



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Diante disso, foi determinado que os valores RMS limites utilizados como referência para alarme de falha no sistema de monitoramento, serão 1,3 vezes o valor dos eixos dos sensores em condição normais, conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Valores RMS normais e limites para alarme de falha

| Sensor | 01 | | | 02 | | | 03 | | |
|------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| RMS normal | 1,42 | 1,92 | 2,75 | 0,96 | 1,72 | 2,31 | 2,29 | 3,49 | 0,51 |
| RMS limite | 1,85 | 2,5 | 3,57 | 1,25 | 2,24 | 3,0 | 2,98 | 4,54 | 0,54 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

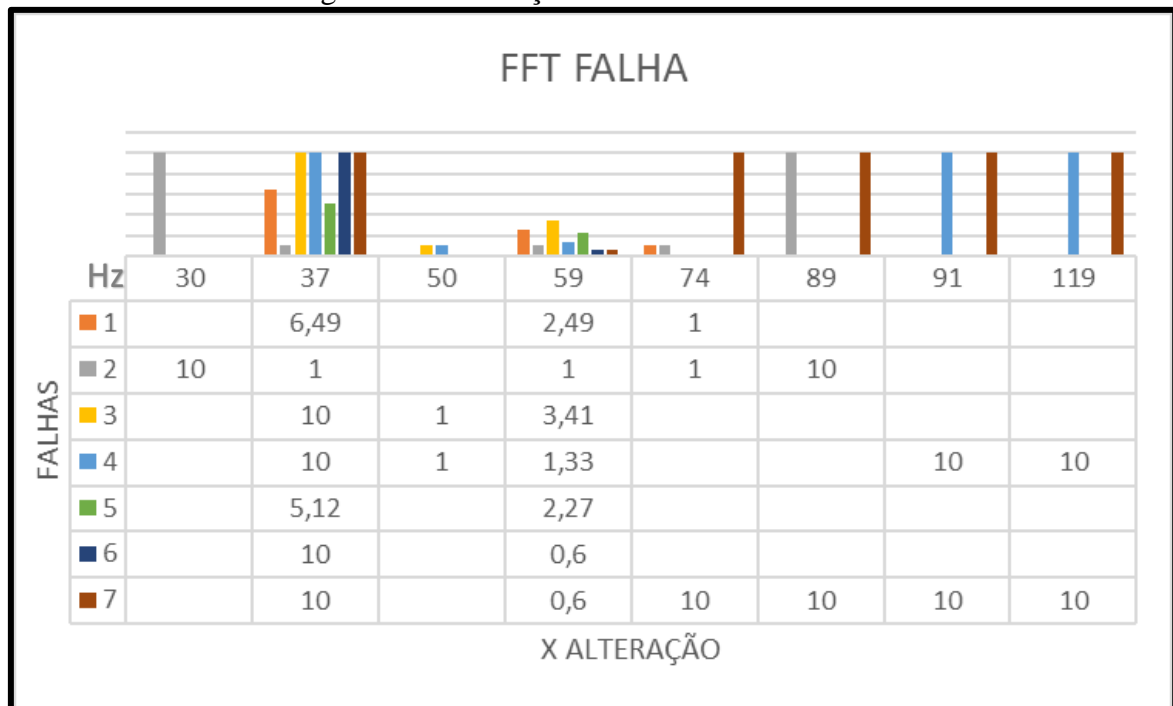
Também na análise dos dados é observado que as maiores alterações dos valores RMS, nem sempre estão nos sensores mais próximos da falha, sendo importante uma avaliação mais

critériora no diagnóstico das falhas. E em casos de uma falha de rolamento, o valor de fator de crista se torna fundamental para o diagnóstico desta falha.

Já na análise do sinal de vibração no tempo e da FFT do sinal, foi visto que esta técnica pode ser utilizada como um auxílio no diagnóstico das falhas que se encontram presentes no compressor, devido que, os valores de aceleração, as amplitudes e as frequências sofrem alterações em caso de falha no equipamento.

Analisando os dados relacionados a FFT das falhas Figura 42, pode ser observado que a frequência de 59Hz sofre alteração em sua amplitude em relação a condição normal, em 6 das 7 falhas simuladas, e que à o surgimento da frequência de 37Hz em quatro falhas. As novas frequências estão identificadas na figura com o valor de alteração 10, no caso da falha 07 que é uma falha avançada de rolamento, é evidenciado o surgimento de novas frequências acima de 59Hz.

Figura 42 – Alterações do FFT em caso de falha



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido ao grande impacto negativo na produtividade causado pelo tempo de parada dos equipamentos em manutenção, a implementação de um sistema de manutenção preditiva se torna extremamente necessária quando se almeja um nível elevado de disponibilidade dos equipamentos. Deste modo o presente trabalho teve uma avaliação positiva, mostrando ser uma ferramenta de diagnóstico e monitoramento de possíveis falhas mecânicas, contribuindo para um melhor planejamento do setor de manutenção.

Através do desenvolvimento e construção do sistema foi possível constatar sua aplicação na manutenção preditiva, conforme previsto, bem como depois da análise dos resultados obtidos das simulações de falha, serviram para comprovar que o sistema conseguiria detectar as falhas mecânicas presentes no compressor.

A escolha do sensor de vibração MPU9250 para leitura dos valores de vibração, se mostrou eficiente diante dos dados apresentados.

A performance obtida com a placa Raspberry Pi se mostrou adequada, conseguindo fazer o recebimento e processamentos matemático dos dados de vibração dentro do esperado. Também demonstrou ser eficaz na comunicação com os sensores de vibração através do multiplexador, bem como transferência dos dados dos sensores e o SIMZ.

Através da técnica de análise de vibração do valor RMS e Fator de Crista, pode ser constatado que o processamento matemático se mostrou eficiente, conseguindo retornar os valores de vibração conforme o esperado, indicando que o equipamento está operando em condições anormais de funcionamento.

A análise de vibração através do sinal no tempo e FFT do sinal mostrou-se satisfatória, podendo ser utilizada como auxílio nos diagnósticos de falhas mecânicas, principalmente as falhas de rolamentos.

O sistema integrado de monitoramento Zandei demonstrou ser uma interface de auxílio para o setor de manutenção, conseguindo informar as condições reais do equipamento e no caso de uma falha disparar mensagens para os e-mails cadastrados.

Como sugestão para trabalhos futuros, o sistema implementado pode ser expandido para análises de outras falhas, como as de origem elétrica, permitindo assim efetuar um diagnóstico mais amplo do equipamento.

Outro intensão para futuras pesquisas podem ser voltada para caracterização dos estágios das falhas, permitindo assim acompanhar a evolução da falha, do nível inicial ao nível avançado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTONIOLLI, Edilar Bento. **Estudo Comparativo De Técnicas De Medição E Análise De Vibrações Para A Manutenção Preditiva Em Mancais De Rolamentos**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.
- ARDUINO. **Arduino MEGA 2560**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560#>>. Acesso em: 30 out. 2019.
- ARCO-VERDE, Melquesedeque Melo. **Identificação de falhas em sistemas rotativos empregando técnicas não-lineares**. 2008. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10082: Ensaio não destrutivo - Análise de vibrações - Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 rpm a 15 000 rpm**. São Paulo, p. 9. 2011.
- AZEVEDO, Henrique Dias Machado de. **Um método para Identificação de falhas em componentes e subcomponentes de turbinas eólicas através de monitoramento de Condição baseado em vibração**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- BALBINOT, Alexandre. 2007. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. Rio de Janeiro: LTC, 2007. Vol. 2. ISBN 978-85-216-1563-7.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO V. J. 2011. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. Vol. 2. ISBN 978-85-216-1879-9.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO V. J. 2019. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. Rio de Janeiro: LTC, 2019. Vol. 2.
- BALDISSARELLI, Luciano; FABRO, Elton. Manutenção Preditiva na indústria 4.0. **Scientia cum Industria**, v. 7, n. 2, p. 12-22, 2019.
- CHAN, Yum Ji; HUANG, Jing-Wei. Multiple-point vibration testing with micro-electromechanical accelerometers and micro-controller unit. **Mechatronics**, v. 44, p. 84-93, 2017.
- COSTA, David Alexandre Germano. **Técnicas avançadas de análise de vibração no âmbito do controlo de condição**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, 2017.
- CYRINO, L. Análise de vibração – método de preditiva, 2015. Disponível em: <<https://www.manutencaoemfoco.com.br/analise-de-vibracao/>>. Acesso em: 26 set 2019.

CYRINO, L. Manutenção Preditiva, conceito e aplicação. **Manutenção em Foco**, 2015. Acesso em: 20 set 2019.

CYRINO, L. Diagnóstico de falhas das vibrações. **Manutenção em Foco**, 2017. Disponível em: <<https://www.manutencaoemfoco.com.br/diagnostico-de-falhas-das-vibracoes/>>. Acesso em: 18 set 2019.

CYRINO, L. Falhas Evolucao até Quebra. **Manutenção em Foco**, 22 Outubro 2017. Disponível em: <<https://www.manutencaoemfoco.com.br/falhas-evolucao-ate-quebra/>>. Acesso em: 15 ago. 2019.

DA SILVA, Marco Antônio et al. Sistema para monitoramento de vibrações utilizando Arduino. **Revista Interatividade**, v. 2, n. 2, p. 142-153, 2014.

DE JESUS, Keliene Maria Sousa. **Implementação e análise do desempenho de técnicas de monitoramento através de medição de vibração e correlação com corrente estatórica**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará. Belém, 2010.

FACCIN, Felipe Carlos. (2011). **Manutenção inteligente: Fusão de sensores aplicada na detecção de falhas em atuadores elétricos**. 2011. Projeto de diplomação (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

FUENTES, F. F. E. **METODOLOGIA PARA INOVAÇÃO DA GESTÃO DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2006.

FRADEN, Jacob. 2010. **Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. 4a. edição**. Springer & ScienceþBusiness Media, LLC 2010; New York Heidelberg Dordrecht London, 2010. ISBN 978-1-4419-6465-6

GONÇALVES, Luiz Fernando. **Desenvolvimento de um sistema de manutenção inteligente embarcado**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

GONZÁLEZ, Roberto Carlos Díaz. **Desenvolvimento de um protótipo analisador de vibração de baixo custo para uso em manutenção preditiva**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

HANK, Zumbahlen. 2008. **Linear Circuit Design Handbook** /edited by Hank Zumbahlen; with engineering staff of Analog Devices. Engineering Staff, Norwood, MA, USA, 2008. ISBN 978-0-7506-8703- 4.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Relatório de Estação Geodésica**, 2011. Disponível em: <<http://www.bdg.ibge.gov.br/bdg/pdf/relatorio.asp?L1=8117201>>. Acesso em: 3 nov 2019.

INVENSENSE. **MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4**, 2013. Disponível em: <<https://www.invensense.tdk.com/wpcontent/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>>. Acesso em: 17 outubro 2019.

INVENSENSE. **MPU-9250 Product Specification Revision 1.0**, 2014. Disponível em: <<https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>>. Acesso em: 13 março 2020.

ISO (International Standard) 10816-3:2009 Mechanical vibration -- Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts-- Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ. Berlin,2009.

LATHI, B. P. **Sinais e Sistemas Lineares**. 2. ed. São Paulo: Bookman, 2007. 856 p.

KHADEMI, Amirhossein; RAJI, Fatemeh; SADEGHI, Mohammadreza. IoT Enabled Vibration Monitoring Toward Smart Maintenance. In: **2019 3rd International Conference on Internet of Things and Applications (IoT)**. IEEE, 2019. p. 1-6.

LLK. Conheça as vantagens da Manutenção Preditiva no monitoramento e inspeção de equipamentos, instrumentos e processos. **LLK ENGENHARIA PARA A INOVAÇÃO**, 2018. Disponível em: <<http://www.llk.com.br/conheca-as-vantagens-da-manutencao-preditiva-no-monitoramento-e-inspecao-de-equipamentos-instrumentos-e-processos/>>. Acesso em: 13 set. 2019.

MAIS, J.; BRADY, S. Introduction Guide to Vibration Monitoring: Measurements, Analysis and Terminology. **SKF Reliability Systems. USA**, 2002. Disponível em: <<http://docshare01.docshare.tips/files/25636/256366115.pdf>>. Acesso em: 30 agosto 2019.

MARCAL, R. F. M. **Um método para detectar falhas incipientes em máquinas rotativas baseado em análise de vibração e lógica Fuzzy**. Tesse (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre. 2000.

MARÇAL, Rui Francisco Martins; HATAKEYAMA, Kazuo; CZELUSNIAK, Dani Juliano. Expert System based on fuzzy rules for monitoring and diagnosis of operation conditions in rotating machines. In: **Advanced Materials Research**. Trans Tech Publications, 2015. p. 950-960.

MARÇAL, R. F.; SUSIN, A. A. Detectando falhas incipientes em máquinas rotativas. **Revista Gestão Industrial**, v. 1, 2005.

OPPENHEIM, A. V. . S. W. **Sinais e sistemas**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

PEREIRA, Adriano; SIMONETTO, Eugênio de Oliveira. **Indústria 4.0: conceitos e perspectivas para o Brasil**. Revista da Universidade Vale do Rio Verde, v. 16, n. 1, 2018.

PIZZETTA, Felipe Boff. **Estudo e implementação de veículo para navegação autônoma em ambientes desestruturados**. 2010. Trabalho de conclusão do curso (Engenharia Elétrica) - Universidade de Caxias do Sul. Bento Gonçalves,2010.

PLANTE, Tristan et al. Rotating machine fault detection using principal component analysis of vibration signal. In: **2016 IEEE AUTOTESTCON**. IEEE, 2016. p. 1-7.

RASPBERRY PI FOUNDATION. **RASPBERRY PI 3 MODEL B**. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>>. Acesso em: 30 out.2019

SCHEFFER, Cornelius; GIRDHAR, Paresh. **Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**. Elsevier, 2004. ISBN 0-7506-6275-1.

SILVA, Vanessa Lima da; GOMES, Evandro de Souza; RODRIGUES, Carlan Ribeiro. **Procedimento para análise de vibrações utilizando coletor Movilog 2 e software Ediag 2.2. 0**. 2010. Trabalho de conclusão do curso (Tecnologia em Manutenção Industrial) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense. Campo dos Goytacazes, 2010.

DE SOUSA, Danilo Castor. **Proposta de sistema de baixo custo de monitoração de vibrações**. 2018. Trabalho de conclusão do curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

TEKNOKAO. **Apostila Vibrações-Medida de vibração-Uma ferramenta para a manutenção**. Disponível em: <<http://www.teknikao.com.br/apostilas/ApostilaVibracoes.pdf>>. Acesso em: 13 agosto 2019.

TEKNOKAO. **Previsão de Falha de Rolamentos por Análise Espectral e de Envelope**, 2011. Disponível em: <<http://teknikao.blogspot.com/2011/05/previsao-de-falha-de-rolamentos-por.html>>. Acesso em: 25 agosto 2019.

TELANG, A. D.; TELANG, Amit. **Comprehensive maintenance management: policies, strategies and options**. PHI Learning Pvt. Ltd., 2010. ISBN 978-81-203-3953-8.

TEXAS Instruments. **TCA9548A**, 2016. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca9548a.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2019.

TONDO, Felipe Augusto. **Protótipo para a estimação de velocidade de caminhada com o uso de sensores de aceleração**. 2013. Trabalho de conclusão do curso (Engenharia Elétrica) - Universidade de Caxias do Sul. Bento Gonçalves, 2013.

VENDRAME, A. C. docplayer. **VIBRAÇÕES OCUPACIONAIS, UM POUCO DE HISTÓRIA**. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/10099030-Vibracoes-ocupacionais-antonio-carlos-vendrame-um-pouco-de-historia.html>>. Acesso em: 27 ago 2019.

YA'CUBSOHN, V. R. **El Diagnostico de fallas por analisis vibratorio**. São Paulo: Die Techik Ltda, 1983.

ANEXOS

ANEXO A – CÓDIGO DE MANIPULAÇÃO DOS VALORES DE VIBRAÇÃO

```

/*
 * Manipulação dos valores de vibração
 * Valores de aceleração enviados para o Sistema de monitoramento e FFT do sinal
 */
#include <wiringPiI2C.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <wiringPi.h>
#include <math.h>
#include <stdint.h>
#include <string.h>
#include <MQTTClient.h>
#include <time.h>

#define MPU_1 0x01
#define MPU_2 0x02
#define MPU_3 0x04
// #define MPU_4 0x08
// #define MPU_5 0x0F

#define Device_Address_TCA9548 0x70 /*Endereço / identificador do dispositivo
TCA9548*/
#define Device_Address 0x68 /*Endereço / identificador do dispositivo MPU6050*/

#define PWR_MGMT_1 0x6B
#define SMPLRT_DIV 0x19
#define CONFIG 0x1A

#define INT_ENABLE 0x38
#define ACCEL_XOUT_H 0x3B
#define ACCEL_YOUT_H 0x3D
#define ACCEL_ZOUT_H 0x3F

#define AMOSTRA 5000
#define FREQ_AMOST 0.25 //ms

#define ADDRESS "tcp://192.168.0.30"
#define CLIENTID "KW0MZT6O2DaxTFmpF3Oc"
#define TOPIC "v1/devices/me/telemetry"

```

```

#define PAYLOAD    "{\"teste\":465}"
#define QOS        1
#define TIMEOUT    10000L

volatile MQTTClient_deliveryToken deliveredtoken;
MQTTClient client;
int fd;

void MPU9250_Init() {

    wiringPiI2CWriteReg8 (fd, SMPLRT_DIV, 0x07);          /* Gravar no registro de taxa de
amostra */
    wiringPiI2CWriteReg8 (fd, PWR_MGMT_1, 0x01);        /* Gravar no registro de
gerenciamento de energia */
    wiringPiI2CWriteReg8 (fd, CONFIG, 0);              /* Gravar no registro de configuração */
    wiringPiI2CWriteReg8 (fd, INT_ENABLE, 0x01); /*Escreva para interromper o registro de
habilitação */

}
short read_raw_data(int addr) {

    short high_byte,low_byte,value;
    high_byte = wiringPiI2CReadReg8(fd, addr);
    low_byte = wiringPiI2CReadReg8(fd, addr+1);
    value = (high_byte << 8) | low_byte;
    return value; //se o sensor estiver desconectado, retorna o valor de -1
}

int MQTT_init() {
    MQTTClient_connectOptions conn_opts = MQTTClient_connectOptions_initializer;
    int rc;
    MQTTClient_create(&client, ADDRESS, CLIENTID,
        MQTTCLIENT_PERSISTENCE_NONE, NULL);
    conn_opts.keepAliveInterval = 20;
    conn_opts.cleansession = 1;
    conn_opts.username = CLIENTID;

    MQTTClient_setCallbacks(client, NULL, NULL, NULL, NULL);
    if ((rc = MQTTClient_connect(client, &conn_opts)) != MQTTCLIENT_SUCCESS) {
        printf("Failed to connect, return code %d\n", rc);
        exit(EXIT_FAILURE);
    }

    return rc;
}

void publish(MQTTClient client, char *topic, char * payload) {
    MQTTClient_message pubmsg = MQTTClient_message_initializer;
    MQTTClient_deliveryToken token;
    pubmsg.payload = payload;
    pubmsg.payloadlen = strlen(payload);
}

```

```

pubmsg.qos = QOS;
pubmsg.retained = 0;
deliveredtoken = 0;

MQTTClient_publishMessage(client, topic, &pubmsg, &token);
printf("Waiting for publication of %s\n"
       "on topic %s for client with ClientID: %s\n",
       payload, topic, CLIENTID);
}

int main(void){

MQTT_init();
int cont=0;
int cont_1=0;
float Acc_x;
float Ax=0;
float somaX=0;
float mediaX=0;
float rmsX=0;
float fator_cristaX=0;
float valX=0;
float soma_quadX=0;
float pico_maxX=0;
float pico_minX=0;

float Acc_y;
float Ay=0;
float somaY=0;
float mediaY=0;
float rmsY=0;
float fator_cristaY=0;
float valY=0;
float soma_quadY=0;
float pico_maxY=0;
float pico_minY=0;

float Acc_z;
float Az=0;
float somaZ=0;
float mediaZ=0;
float rmsZ=0;
float fator_cristaZ=0;
float valZ=0;
float soma_quadZ=0;
float pico_maxZ=0;
float pico_minZ=0;

int end = 0;
float sensor=0;

```

```
char srmsX [20];
char srmsY [20];
char srmsZ [20];
```

```
char str_rmsX [20];
char str_rmsY [20];
char str_rmsZ [20];
```

```
char sfcX [20];
char sfcY [20];
char sfcZ [20];
```

```
char str_fcX [20];
char str_fcY [20];
char str_fcZ [20];
```

```
char teste[20];
char steste[20];
```

```
for(int n=0;n<=1000;n++){//QUANTIDADE DE CICLOS
```

```
    for(int n=0;n<=2;n++){//QUANTIDADE DE SENSORES= n+1
```

```
        fd=0;
        end = pow(2,n); // endereço relacionado ao sensor
        fd = wiringPiI2CSetup(Device_Address_TCA9548); /*Initializes I2C with device Address
TCA9548*/
        wiringPiI2CWrite (fd,end);          /* Write to sample rate register */
        fd = wiringPiI2CSetup(Device_Address); /*Inicializa o I2C com o endereço do dispositivo
MPU9250*/
```

```
        //Teste de Sensor
        sensor =(n+1);
        delay(1000);
        Acc_x = read_raw_data(ACCEL_XOUT_H);
        Acc_y = read_raw_data(ACCEL_YOUT_H);
        Acc_z = read_raw_data(ACCEL_ZOUT_H);
```

```
        //Em condição de falha envia mensagens de erro e passa para o próximo sensor
        if (Acc_x== -1) {
```

```
            sprintf(teste, "{\\\"Teste_Sensor_\"");
            sprintf(steste, \"%f\"\\\".\", sensor); // converte o valor de float na variavel do tipo string
            strcat(teste, steste); //Concatena a string "var" com o conteúdo da string srmsZ
            strcat(teste, "0"); //Concatena a string "var" com o conteúdo da string srmsZ
            printf("%s\\n", teste);
            publish(client, TOPIC, teste);
            teste[0]='\0'; //zerando o valor da string
            delay(1000);
```

```

    continue;
}

if (Acc_x!=-1) {
    sprintf(teste, "\\\"Teste_Sensor_");
    sprintf(steste,"%f\\\";",sensor); // converte o valor de float na variavel do tipo string
    strcat(teste,steste);//Concatena a string "var" com o conteúdo da string srmsZ
    strcat(teste,"1}");//Concatena a string "var" com o conteúdo da string srmsZ
    printf("%s\\n", teste);
    publish(client, TOPIC, teste);
    teste[0]='\0';//zerando o valor da string
    delay(1000);
}

MPU9250_Init(); /* Inicializa MPU9250 */

switch (end) {
case 0x01:

    sprintf(str_rmsX, "\\\"RMSX_01\\\"");
    sprintf(str_rmsY, "\\\"RMSY_01\\\"");
    sprintf(str_rmsZ, "\\\"RMSZ_01\\\"");

    sprintf(str_fcX, "\\\"FCX_01\\\"");
    sprintf(str_fcY, "\\\"FCY_01\\\"");
    sprintf(str_fcZ, "\\\"FCZ_01\\\"");

    break;

case 0x02:

    sprintf(str_rmsX, "\\\"RMSX_02\\\"");
    sprintf(str_rmsY, "\\\"RMSY_02\\\"");
    sprintf(str_rmsZ, "\\\"RMSZ_02\\\"");

    sprintf(str_fcX, "\\\"FCX_02\\\"");
    sprintf(str_fcY, "\\\"FCY_02\\\"");
    sprintf(str_fcZ, "\\\"FCZ_02\\\"");

    break;

case 0x04:

    sprintf(str_rmsX, "\\\"RMSX_03\\\"");
    sprintf(str_rmsY, "\\\"RMSY_03\\\"");
    sprintf(str_rmsZ, "\\\"RMSZ_03\\\"");

    sprintf(str_fcX, "\\\"FCX_03\\\"");
    sprintf(str_fcY, "\\\"FCY_03\\\"");
    sprintf(str_fcZ, "\\\"FCZ_03\\\"");

```

```

    break;

case 0x08:

    break;

case 0x0F:

    break;

default:          // não deveria entrar aqui!!!
    printf("Erro na abertura do arquivo!");
    break;
}

//Calculo do tempo por ciclo
float tempo_final;
clock_t tempo;
tempo = clock();

// DADOS PARA A MÉDIA
for(int i=1;i<=AMOSTRA;i++) {

    /*Ler o valor bruto do acelerômetro da MPU6050*/

    Acc_x = read_raw_data(ACCEL_XOUT_H);
    Acc_y = read_raw_data(ACCEL_YOUT_H);
    Acc_z = read_raw_data(ACCEL_ZOUT_H);

    //Em condição de falha envia mensagens de erro e passa para o próximo sensor
    if (Acc_x==-1||Acc_y==-1||Acc_z==-1) {
        cont = ++cont;

    continue;

    } else if (Acc_x !=-1||Acc_y !=-1||Acc_z !=-1) {

        cont_1=++cont_1;

        /* Divide o valor bruto pelo fator de escala de sensibilidade */
        Ax = (Acc_x*9.81/16384.0);
        somaX = somaX + Ax;
        mediaX = somaX/cont_1;

        Ay = (Acc_y*9.81/16384.0);
        somaY = somaY + Ay;
        mediaY = somaY/cont_1;

        Az = (Acc_z*9.81/16384.0);
        somaZ = somaZ + Az;

```

```

    mediaZ = somaZ/cont_1;
}

delay(FREQ_AMOST);
}
printf("\n cont= %d\n",cont);
printf("\n cont_1= %d\n",cont_1);

cont=0;
cont_1=0;

tempo_final =((clock() - tempo)/ (double)CLOCKS_PER_SEC);
printf("Tempo:%f\n",(clock() - tempo) / (double)CLOCKS_PER_SEC);
//getchar();

// VALOR - MEDIA E FAZ SOMA DOS QUADRADOS
somaX = 0;    //só para fazer o teste de próxima media = 0
somaY = 0;
somaZ = 0;

for(int i=1;i<=AMOSTRA;i++) {

/*Ler o valor bruto do acelerômetro da MPU9250*/
Acc_x = read_raw_data(ACCEL_XOUT_H);
Acc_y = read_raw_data(ACCEL_YOUT_H);
Acc_z = read_raw_data(ACCEL_ZOUT_H);

if (Acc_x==-1||Acc_y==-1||Acc_z==-1) {

    cont = ++cont;

    continue;
}

/* Divide o valor bruto pelo fator de escala de sensibilidade */

else if (Acc_x !=-1||Acc_y !=-1||Acc_z !=-1) {

    cont_1=++cont_1;

/* Divide o valor bruto pelo fator de escala de sensibilidade */
Ax = (Acc_x*9.81/16384.0);
valX = Ax - mediaX;
soma_quadX = soma_quadX + pow(valX, 2);

Ay = (Acc_y*9.81/16384.0);
valY = Ay - mediaY;
soma_quadY = soma_quadY + pow(valY, 2);

Az = (Acc_z*9.81/16384.0);
valZ = Az - mediaZ;

```

```

soma_quadZ = soma_quadZ + pow(valZ, 2);

if (pico_maxX<valX) {

    pico_maxX=valX;
}

if (pico_maxY<valY) {

    pico_maxY=valY;
}

if (pico_maxZ<valZ) {

    pico_maxZ=valZ;
}

}

delay(FREQ_AMOST);
}

//getchar();

//RMS
soma_quadX = soma_quadX/cont_1;
rmsX = pow(soma_quadX, 0.5);

soma_quadY =soma_quadY/cont_1;
rmsY = pow(soma_quadY, 0.5);

soma_quadZ = soma_quadZ/cont_1;
rmsZ = pow(soma_quadZ, 0.5);

sprintf(srmsX,"% .3f} ", rmsX); // converte o valor de float na variavel do tipo string
strcat(str_rmsX,srmsX);//Concatena a string "str_rms" com o conteúdo da string srmsZ
publish(client, TOPIC, str_rmsX);
str_rmsX[0]='\0';//zerando o valor da string

sprintf(srmsY,"% .3f} ", rmsY); // converte o valor de float na variavel do tipo string
strcat(str_rmsY,srmsY);//Concatena a string "str_rms" com o conteúdo da string srmsZ
publish(client, TOPIC, str_rmsY);
str_rmsY[0]='\0';//zerando o valor da string

sprintf(srmsZ,"% .3f} ", rmsZ); // converte o valor de float na variavel do tipo string
strcat(str_rmsZ,srmsZ);//Concatena a string "str_rms" com o conteúdo da string srmsZ
publish(client, TOPIC, str_rmsZ);
str_rmsZ[0]='\0';//zerando o valor da string

if (rmsX<0.5) {
    fator_cristaX=0;
}

```



```

} else {
    fator_cristaX=pico_maxX/rmsX;
}

if (rmsY<0.5) {
    fator_cristaY=0;
} else {
    fator_cristaY=pico_maxY/rmsY;
}

if (rmsZ<0.5) {
    fator_cristaZ=0;
} else {
    fator_cristaZ=pico_maxZ/rmsZ;
}

sprintf(sfcX,"% .3f}", fator_cristaX); // converte o valor de float na variavel do tipo string
strcat(str_fcX,sfcX);//Concatena a string "var" com o conteúdo da string srmsZ
publish(client,TOPIC,str_fcX);
str_fcX[0]='\0';//zerando o valor da string

sprintf(sfcY,"% .3f}", fator_cristaY); // converte o valor de float na variavel do tipo string
strcat(str_fcY,sfcY);//Concatena a string "var" com o conteúdo da string srmsZ
publish(client,TOPIC,str_fcY);
str_fcY[0]='\0';//zerando o valor da string

sprintf(sfcZ,"% .3f}", fator_cristaZ); // converte o valor de float na variavel do tipo string
strcat(str_fcZ,sfcZ);//Concatena a string "var" com o conteúdo da string srmsZ
publish(client,TOPIC,str_fcZ);
str_fcZ[0]='\0';//zerando o valor da string

cont=0;
cont_1=0;
setbuf(stdout, 0);
setbuf(stdin, 0);
system("clear");

//Cria arquivo para FFT se o valor limite de RMS for atingido
if (rmsZ>1||rmsY>1||rmsZ>1) {
    printf("\n Valor RMS\n");

    FILE *pont_arq_FFTX; // cria variável ponteiro para o arquivo
    FILE *pont_arq_FFTY; // cria variável ponteiro para o arquivo
    FILE *pont_arq_FFTZ; // cria variável ponteiro para o arquivo

    //abrindo o arquivo com tipo de abertura w
    switch (end) {

    case 0x01:

```

```

pont_arq_FFTX = fopen("FFT_1X.txt", "w");
pont_arq_FFTY = fopen("FFT_1Y.txt", "w");
pont_arq_FFTZ = fopen("FFT_1Z.txt", "w");

break;

case 0x02:

pont_arq_FFTX = fopen("FFT_2X.txt", "w");
pont_arq_FFTY = fopen("FFT_2Y.txt", "w");
pont_arq_FFTZ = fopen("FFT_2Z.txt", "w");

break;

case 0x04:

pont_arq_FFTX = fopen("FFT_3X.txt", "w");
pont_arq_FFTY = fopen("FFT_3Y.txt", "w");
pont_arq_FFTZ = fopen("FFT_3Z.txt", "w");

break;

case 0x08:

break;

case 0x0F:

break;

default:          // não deveria entrar aqui!!!
printf("Erro na abertura do arquivo!");
break;
}

//Calculo do tempo por ciclo
float tempo_final;
clock_t tempo;
tempo = clock();

// DADOS PARA A MÉDIA
for (int i=1;i<=AMOSTRA;i++) {

/*Ler o valor bruto do acelerômetro da MPU6050*/
Acc_x = read_raw_data(ACCEL_XOUT_H);
Acc_y = read_raw_data(ACCEL_YOUT_H);
Acc_z = read_raw_data(ACCEL_ZOUT_H);

//Em condição de falha envia mensagens de erro e passa para o próximo sensor
if (Acc_x==-1||Acc_y==-1||Acc_z==-1) {

```

```

    cont=++cont;

    continue;
} else if (Acc_x !=-1||Acc_y !=-1||Acc_z !=-1) {

    cont_1=++cont_1;

    /* Divide o valor bruto pelo fator de escala de sensibilidade */
    Ax = (Acc_x*9.81/16384.0);
    somaX = somaX + Ax;
    mediaX = somaX/cont_1;

    Ay = (Acc_y*9.81/16384.0);
    somaY = somaY + Ay;
    mediaY = somaY/cont_1;

    Az = (Acc_z*9.81/16384.0);
    somaZ = somaZ + Az;
    mediaZ = somaZ/cont_1;
}

delay(FREQ_AMOST);
}

cont=0;

tempo_final =((clock() - tempo)/ (double)CLOCKS_PER_SEC);
printf("Tempo:%f\n", (clock() - tempo) / (double)CLOCKS_PER_SEC);
//getchar();

// VALOR - MEDIA E FAZ SOMA DOS QUADRADOS
somaX = 0;      //só para fazer o teste de próxima media = 0
somaY = 0;
somaZ = 0;

for (int i=1;i<=AMOSTRA;i++) {

    /*Ler o valor bruto do acelerômetro da MPU9250*/
    Acc_x = read_raw_data(ACCEL_XOUT_H);
    Acc_y = read_raw_data(ACCEL_YOUT_H);
    Acc_z = read_raw_data(ACCEL_ZOUT_H);

    if (Acc_x==-1||Acc_y==-1||Acc_z==-1) {

        cont = ++cont;

        continue;

    }

    /* Divide o valor bruto pelo fator de escala de sensibilidade */

```

```
Ax = Acc_x*9.81/16384.0;
valX = Ax - mediaX;

Ay = Acc_y*9.81/16384.0;
valY = Ay - mediaY;

Az = Acc_z*9.81/16384.0;
valZ = Az - mediaZ;

fprintf(pont_arq_FFTX, "%.3f\n", valX); //Imprime os valor no arquivo txt
fprintf(pont_arq_FFTY, "%.3f\n", valY); //Imprime os valor no arquivo txt
fprintf(pont_arq_FFTZ, "%.3f\n", valZ); //Imprime os valor no arquivo txt

delay(FREQ_AMOST);
}

cont=0;

//usando fclose para fechar o arquivo
fclose(pont_arq_FFTX);
fclose(pont_arq_FFTY);
fclose(pont_arq_FFTZ);

}
}
}
return(0);
}
```

ANEXO B – CÓDIGO RELACIONADO AO FFT DO SINAL

```

"""
Importando os dados de vibração e fazendo a FFT do sinal em Python

"""

#!/usr/bin/env python3
#BIBLIOTECAS UTILIZADAS
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import scipy.fftpack

#ABRINDO O ARQUIVO E IMPORTANDO DADOS:
arq = open('FFT_1X.txt', 'r') # Nome do arquivo que contém os dados
valor = arq.readlines()
arq.close()
ndados=0
FFT=[]

for linha in valor:
    FFT.append(float(linha))
    ndados=ndados+1 # número de dados

#TEMPO
f=240 #[Hz]
T=1/f #[s]
tempo=T*ndados
t=np.linspace(0,tempo,ndados)

#PLOTANDO SINAL
plt.figure(1)
plt.plot(t,FFT)
plt.title("Sinal")
plt.grid()
plt.xlabel("Tempo [s]")
plt.ylabel("Aceleração [m/s^2]")

#FFT DO SINAL
fft= scipy.fftpack.fft(FFT)
amp_fft=np.abs(fft)
f=np.linspace(0,float(f/2),int(ndados/2))

#GRÁFICO DA FFT
plt.figure(2)
plt.plot(f,amp_fft[0:int(ndados/2)])
plt.title("FFT do sinal ")
plt.grid()
plt.xlabel("Frequência [Hz]")
plt.ylabel("Amplitude")
plt.show()

```