

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

PEDRO HENRIQUE MELO ARAUJO

SISTEMA IIOT PARA MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO
EM MÁQUINAS COM FERRAMENTAS ROTATIVAS

Joinville
2024

PEDRO HENRIQUE MELO ARAUJO

SISTEMA IIOT PARA MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO
EM MÁQUINAS COM FERRAMENTAS ROTATIVAS

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecatrônica, no Curso de Engenharia Mecatrônica, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Gian Ricardo Berkenbrock

Joinville

2024

Este trabalho é dedicado aos amigos que fiz ao longo da faculdade e aos meus queridos pais e irmã.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha profunda gratidão às pessoas e instituições que me auxiliaram na realização deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Primeiramente, agradeço a Deus pela força e resiliência ao longo de toda essa jornada acadêmica, assim como aos meus anjos da guarda, que sempre iluminaram meu caminho quando tudo parecia incerto.

Agradeço à minha mãe, que sempre esteve ao meu lado em todas as etapas da minha vida acadêmica, ao meu pai, por trabalhar duro e garantir que tudo isso fosse possível, e à minha amada irmã, que sempre iluminou minha vida com seu sorriso e jeito de ser. Agradeço também ao restante da minha família, pela bênção de tê-los todos ao meu lado.

Ao meu orientador, Dr. Gian Ricardo Barbenbrock, sou profundamente grato pela oportunidade de desenvolver este projeto, pela orientação constante e pela disponibilidade ao longo de todo o processo de pesquisa. Suas sugestões e conselhos foram essenciais não apenas para o sucesso deste trabalho, mas também para a minha formação como engenheiro.

Agradeço igualmente aos meus amigos e colegas de curso, que estiveram ao meu lado nos momentos mais desafiadores, compartilhando inúmeras horas de estudo, dúvidas e aprendizados. Vocês foram como uma segunda família para mim, e sem o apoio de vocês, este caminho teria sido muito mais árduo e menos gratificante.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina pelo ensino gratuito e de qualidade. Agradeço aos professores que me inspiraram ao longo de toda a minha formação, aos funcionários da instituição que proporcionaram um ambiente adequado, e a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste projeto. A colaboração e o incentivo de todos foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

Muito obrigado(a) a todos!

“ O fracasso é apenas a oportunidade de começar de novo, com mais inteligência. ”

Henry Ford

Resumo

As Revoluções indústrias impulsionaram a transição para a indústria moderna, atualmente marcada pela indústria 4.0, que integra automação avançada, digitalização e a Internet Industrial das Coisas (IIoT). Um dos pilares desse avanço está no uso de sensores e ferramentas de análise de dados para obter informações relevantes sobre os equipamentos fabris, viabilizando a adoção de políticas de manutenção preditiva. A adoção dessa técnica permite aumentar a disponibilidade e desempenho de equipamentos industriais críticos em um cenário de crescente competitividade, que exige linhas de produção eficientes. Neste trabalho, apresenta-se o projeto e implementação de um sistema de monitoramento para um equipamento fabril baseado na análise de sinais de vibração, com o propósito de viabilizar abordagens preditivas de manutenção. Para isso, o sistema foi montado em torno mecânico convencional, exposto a diferentes cenários que simularam a operação do eixo árvore em condições ideais e não ideais. Os dados coletados permitiram a identificação das condições do equipamento, demonstrando ser viável adotar estratégias de manutenção antes que os problemas identificados resultassem danos significativos à máquina.

Palavra-chave: manutenção preditiva; torno mecânico; indústria 4.0;

Abstract

The Industrial revolutions drove the transition to modern industry, now characterized by industry 4.0, which integrates advanced automation, digitalization, and the IIoT. One of the pillars of this advancement lies in the use of sensors and data analysis tools to gather relevant information about manufacturing equipment, enabling the adoption of predictive maintenance policies. The adoption of this technique allows for increased availability and performance of critical industrial equipment in a context of growing competitiveness that demands efficient production line. This work presents the design and implementation of a monitoring system for manufacturing equipment based on vibration signal analysis, aimed at enabling predictive maintenance approaches. To this end, the system was implemented on a conventional lathe, subjected to different scenarios simulating spindle operation under ideal and non-ideal conditions. The collected data allowed the identification of the equipment's condition, demonstrating the feasibility of adopting maintenance strategies before the identified issues could cause significant damage to the machine.

Keywords: predictive maintenance; mechanical lathe; industry 4.0;

Lista de Figuras

Figura 1 – Modelo de entrada-processo-saída.	14
Figura 2 – Processo de torneamento cilíndrico.	15
Figura 3 – Diagrama de um torno mecânico.	16
Figura 4 – Filosofias de manutenção.	18
Figura 5 – Sistema massa-mola.	19
Figura 6 – Formas de onda da aceleração, velocidade e deslocamento.	20
Figura 7 – Forma de onda complexa.	21
Figura 8 – Pesquisa relacionada a problemas em máquinas rotativas.	22
Figura 9 – Imagem mostrando os detalhes de um sensor MEMS capacitivo.	24
Figura 10 – Análise no domínio do tempo e da frequência.	26
Figura 11 – Severidade de vibração conforme a ISO 10816-1:1995	27
Figura 12 – Modelagem do sistema em AADL.	30
Figura 13 – Modelagem do microcontrolador em AADL.	31
Figura 14 – Modelagem do fluxo de processamento do microcontrolador em AADL.	31
Figura 15 – Placa com sensor ADXL345.	32
Figura 16 – Placa de desenvolvimento TTGO T-Internet-POE.	32
Figura 17 – Torno mecânico utilizado no monitoramento.	33
Figura 18 – Esquemática elétrica.	34
Figura 19 – Montagem elétrica do sensor.	35
Figura 20 – Montagem elétrica do microcontrolador.	35
Figura 21 – Região escolhida para ser feito o monitoramento do equipamento.	36
Figura 22 – Encapsulamento do sensor.	37
Figura 23 – Caixa IP55 usada para proteger o microcontrolador.	37
Figura 24 – Gráfico da amplitude e fase da resposta em frequência do filtro.	39
Figura 25 – Diagrama de classes para os subsistemas de aquisição e processamento.	41
Figura 26 – Diagrama de classes para o subsistemas de envio de dados e a máquina de estados.	42
Figura 27 – Diagrama de sequência.	43
Figura 28 – Diagrama de estados.	44
Figura 29 – Fluxo de saída e entrada de dados no microcontrolador.	44
Figura 30 – Arquitetura do ThingsBoard.	45
Figura 31 – Torno mecânico operando sem carga.	45
Figura 32 – Montagem da máquina com desbalanceamento.	47
Figura 33 – Acoplamento do sensor na máquina.	48
Figura 34 – Dispositivo de medição funcionando em ambiente industrial.	49

Figura 35 – Cadeia de regras do servidor.	50
Figura 36 – Interface de visualização dos dados.	50
Figura 37 – Curvas de aceleração no domínio do tempo para os três eixos no estudo de caso 1.	52
Figura 38 – Espectro de frequência no eixo x para o torno funcionando com 1255 rpm	53
Figura 39 – Comparação das velocidades RMS dos eixos X e Y.	53
Figura 40 – Comparação da velocidade RMS nos eixos X e Y com o valor de referência para a máquina saudável	54
Figura 41 – Comparação da velocidade RMS nos eixos X e Y com o valor de referência para a máquina não saudável	55
Figura 42 – Comparação da velocidade RMS nos eixos X e Y com o valor de referência para a máquina não saudável e saudável	55

Lista de abreviaturas e siglas

AADL	Architecture Analysis and Design Language
CI	Circuito integrado
I2C	Inter-Integrated Circuit
FFT	Fast Fourier Transform
Hz	Hertz
IIOT	Industrial Internet of Things
IOT	Internet of Things
LSE	Laboratório de Sistemas Embarcados
PoE	Power Over Ethernet
RMS	Raiz Média Quadrada
SDK	Software Development Kit
SI	Sistema Internacional de Medidas
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	14
2.2	TORNO MECÂNICO CONVENCIONAL	15
2.3	MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS	16
2.4	FUNDAMENTOS SOBRE VIBRAÇÃO	17
2.5	FONTES DE VIBRAÇÃO E RUÍDO EM MÁQUINAS ROTATIVAS	21
2.6	TECNOLOGIAS DE COLETA DE DADOS DE VIBRAÇÃO	23
2.7	PROCESSAMENTO DE SINAIS DE VIBRAÇÃO	24
2.8	TRABALHOS RELACIONADOS	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	REQUISITOS DO PROJETO	29
3.1.1	Requisitos funcionais	29
3.1.2	Requisitos não funcionais	30
3.2	MODELAGEM	30
3.3	MATERIAIS	31
3.4	MONTAGEM ELÉTRICA	33
3.5	COMPONENTES ESTRUTURAIS E REGIÃO DE MONTAGEM	36
3.6	AQUISIÇÃO DOS SINAIS	38
3.6.1	Calibração do sensor	38
3.6.2	Filtro Anti-aliasing	39
3.7	DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE EMBARCADO	40
3.7.1	Diagramas	40
3.8	FLUXO DE DADOS	42
3.9	CENÁRIOS	44
3.9.1	Estudo de caso 1	45
3.9.2	Estudo de caso 2	46
3.9.3	Estudo de caso 3	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	INTEGRAÇÃO ESTRUTURAL	48
4.2	INTERFACE DE VISUALIZAÇÃO DE DADOS E ALERTAS	49
4.3	ESTUDO DE CASO 1	51
4.4	ESTUDO DE CASO 2	52

4.5	ESTUDO DE CASO 3	54
4.6	DISCUSSÕES	54
4.7	LIMITAÇÕES	56
5	CONCLUSÕES	58
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICE A – FILTRO NO OCTAVE	63
	APÊNDICE B – TRATAMENTO DOS DADOS EM PYTHON	64
	APÊNDICE C – ANÁLISE DA ARQUITETURA EM AADL	67
	APÊNDICE D – REQUISIÇÃO DOS DADOS EM POWERSHELL	72

1 INTRODUÇÃO

A mecanização da produção no final do século dezoito foi o ponto de partida para o surgimento da indústria moderna. Desde então, a introdução da energia elétrica e uso de eletrônicos trouxeram mudanças radicais, até culminar na quarta revolução industrial baseada em sistemas cibernéticos (Henning, 2013).

O fenômeno da quarta revolução industrial, também conhecido como indústria 4.0, está transformando as linhas de produção tradicionais por meio de máquinas, produtos e dispositivos inteligentes que permitem a integração do mundo físico com o virtual. Dessa forma, abrem portas para a automação, análise de dados em tempo real e conectividade, impulsionando sistemas produtivos flexíveis e adaptáveis (Santos *et al.*, 2018).

De acordo com Dogrusoz *et al.* (2020), a indústria 4.0 permite, entre outras coisas, a aplicação da estratégia de manutenção de máquinas por meio de informação e predição, também conhecida como manutenção preditiva. Essa técnica consiste em intervenções programadas de forma eficaz com base nas informações coletadas por sensores e interpretadas por técnicas de análise (Silva *et al.*, 2023).

Segundo Marques e Brito (2019), a manutenção preditiva é fundamental para identificar falhas prematuramente, diminuindo a necessidade de intervenções no equipamento e, conseqüentemente, aumentando a vida útil. Além disso, essa técnica retorna o investimento feito com sua implantação de forma rápida, além de diminuir custos operacionais ao reduzir os estoques de peças sobressalentes para manutenção (Rodrigues *et al.*, 2023).

Atualmente, os equipamentos industriais possuem dispositivos embarcados e sistemas de aquisição de dados com sensores que permitem obter informações sobre a condição do equipamento. Além disso, essas informações podem ser utilizadas para planejar precisamente ações de manutenção (Teixeira *et al.*, 2020). Essas políticas de manutenção preditiva têm, preponderantemente, a análise de vibração que permite detectar condições anormais em equipamentos industriais críticos (Silva *et al.*, 2023).

Trabalhos sobre monitoramento de vibração têm apresentado resultados positivos ao medir o desgaste de componentes e ferramentas de máquinas, demonstrando a viabilidade desse parâmetro para implementação de um sistema de manutenção preditiva (Fontenele, 2021). A ISO 10816-1:1995 define níveis de vibração que devem ser empregados para determinar se a condição de uma máquina está adequada ou até mesmo inaceitável (Al-Naggar *et al.*, 2021).

Dessa forma, a importância da implementação de uma política de manutenção autônoma é evidenciada pela necessidade de identificação precoce do desgaste de componentes das máquinas, evitando-se, a evolução para danos mais graves do

equipamento. Conforme essa necessidade, apresenta-se neste trabalho a construção de um sistema de monitoramento autônomo da vibração gerada por uma máquina com ferramenta rotativa de uso industrial, onde as informações coletadas são salvas em um banco de dados e expostas em tempo real para o usuário.

1.1 Objetivos

Visando auxiliar no monitoramento estrutural de equipamentos fabris e possibilitar ações efetivas de prevenção de falhas, propõem-se os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema de monitoramento da integridade estrutural de máquinas industriais, viabilizando ações de manutenção preditiva.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Examinar os problemas estruturais e as suas fontes em tornos mecânicos para identificar as melhores estratégias de monitoramento do equipamento;
- Projetar um sistema de aquisição de dados com robustez para ser aplicado em ambiente fabril;
- Desenvolver um sistema de monitoramento com funcionalidades IIoT em um equipamento industrial;
- Avaliar os resultados obtidos e garantir que reflitam adequadamente o cenário em análise, permitindo conclusões válidas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Visando o desenvolvimento de um sistema de supervisão fabril que possibilite ações efetivas de prevenção de falhas, este capítulo explora tópicos relacionados a um sistema de monitoramento de vibração para um torno convencional. Primeiramente, discute-se sobre processos de fabricação, com ênfase no equipamento utilizado no torneamento. Em seguida, são abordadas as fontes de vibração e ruído em máquinas elétricas.

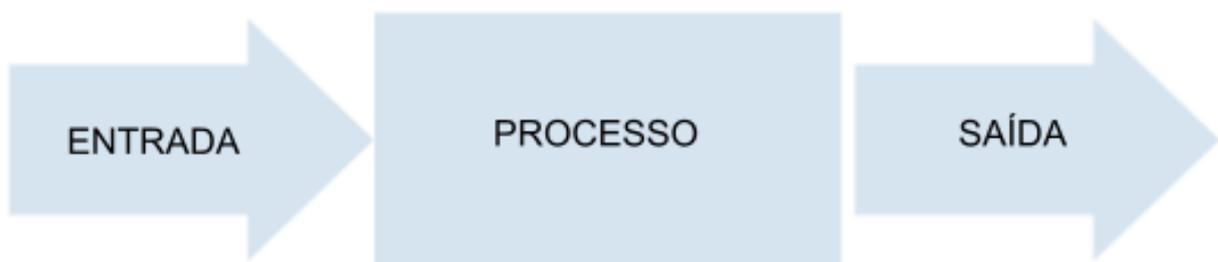
Por fim, são exploradas as tecnologias de sensores de vibração, incluindo a análise do processamento dos sinais capturados. O capítulo encerra, com uma discussão dos trabalhos acadêmicos e técnicos relevantes ao tema.

2.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

A fabricação ou manufatura, consiste na transformação de materiais físicos em bens tangíveis, utilizando processos repetitivos e padronizados (Baudin; Netland, 2023). Dessa forma, a manufatura se estabelece como um fator crítico que torna existência e viabilidade da tecnologia possível (Groover, 2012).

Outra definição para manufatura é a aplicação de processos físicos e químicos para alterar a geometria, propriedades e/ou aparência de um material inicial, a fim de produzir peças ou produtos (Groover, 2012). Sob essa perspectiva, a manufatura consiste em transformar materiais de entrada em produtos de saída, visando eficiência e efetividade. Na Figura 1, é possível observar uma representação simplificada desses processos por meio de um gráfico entrada-processo-saída (Baudin; Netland, 2023).

Figura 1 – Modelo de entrada-processo-saída.



Fonte: Baudin e Netland (2023, p. 7)

Segundo Groover (2012), os processos de fabricação podem ser divididos em dois grupos: processamento e montagem. O primeiro consiste em transformar o estado de um material, enquanto o segundo envolve a união de dois componentes com objetivo de formar uma nova entidade (Groover, 2012).

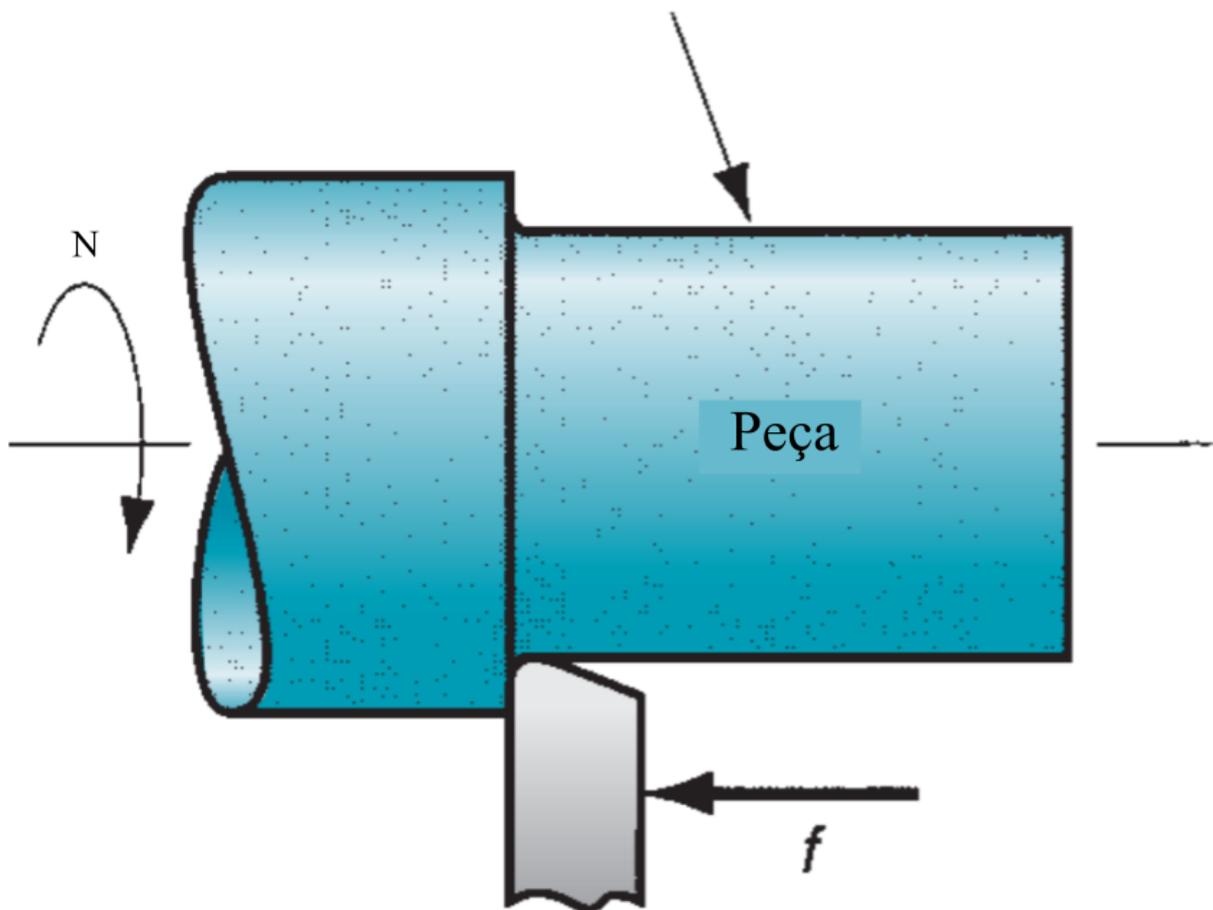
De acordo com Groover (2012), entre os equipamentos usados para processamento, as máquinas-ferramenta se destacam pela versatilidade, sendo aplicadas tanto na produção de bens de consumo quanto na fabricação de componentes para outros equipamentos. Essas máquinas são referidas como “mãe de todas as máquinas”, ao possibilitarem a criação de peças e mecanismos fundamentais para o funcionamento de diversos sistemas produtivos (Groover, 2012).

2.2 TORNO MECÂNICO CONVENCIONAL

O torno mecânico é uma máquina-ferramenta frequentemente usada para cortar metal e dar-lhe o formato desejado. O princípio de funcionamento baseia-se na remoção de material da superfície de uma peça que gira (Joshi; Joshi, 2007). A Figura 2 ilustra o processo de torneamento aplicado em uma peça.

Figura 2 – Processo de torneamento cilíndrico.

Superfície gerada = cilindro

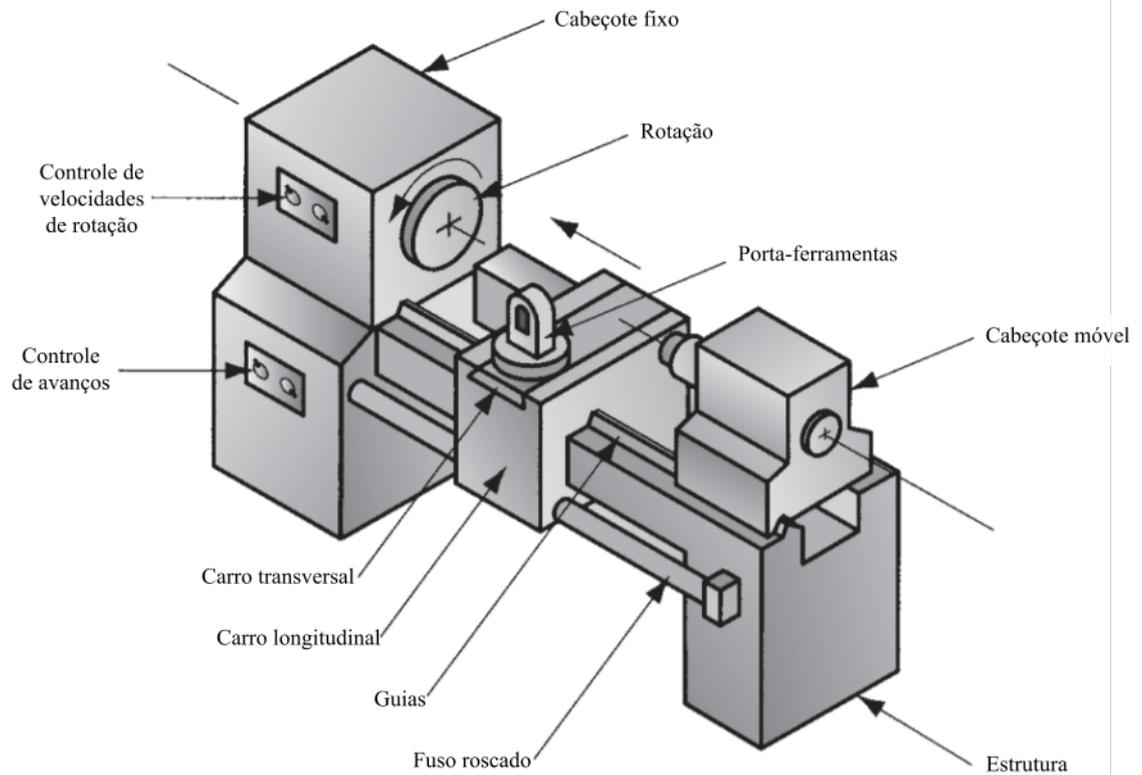


Fonte: Groover (2012, p. 370).

O torno mecânico convencional é operado manualmente e, como pode ser observado na Figura 3, os principais componentes são: cabeçote fixo, cabeçote mó-

vel, porta-ferramenta, carro principal, carro transversal, barramento e estrutura. Os cabeçotes apoiam as extremidades da peça, sendo que, no cabeçote fixo, encontra-se o eixo árvore, que abriga a unidade de acionamento responsável pelo movimento rotacional (Groover, 2012).

Figura 3 – Diagrama de um torno mecânico.



Fonte: Groover (2012, p. 376).

A ferramenta de corte é montada no porta-ferramenta, que está fixo no carro transversal. Este, por sua vez, está montado ao carro principal, ou longitudinal, que se move ao longo do barramento fixado na estrutura (Groover, 2012). Essa configuração permite um movimento paralelo da ferramenta em relação à peça de trabalho, ideal para usinagens cilíndricas. Além disso, o carro transversal pode se mover radialmente para realizar uma operação de corte (Groover, 2012).

2.3 MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

Os equipamentos em uma planta industrial podem ser classificados como críticos, essenciais e de propósito geral. Os equipamentos essenciais são aqueles fundamentais para a operação da planta, de modo que a sua falha interrompe uma unidade de operação ou processo (Girdhar, 2004). Dada a importância das máquinas-ferramenta e do torno mecânico na linha de produção da indústria metalúrgica e manufatureira, esses equipamentos podem ser classificados como essenciais.

Segundo Girdhar (2004), os equipamentos essenciais requerem técnicas de manutenção robustas para assegurar sua operação e evitar comprometer o funcionamento da planta industrial. As filosofias de manutenção podem ser divididas em quatro categorias (Girdhar, 2004):

- Manutenção corretiva;
- Preventiva ou manutenção baseada em tempo;
- Preditiva ou manutenção baseada em condições;
- Proativa ou manutenção de prevenção.

A manutenção corretiva caracteriza-se pela realização de reparos ou substituição de componentes quando ocorre uma falha na máquina, impossibilitando a continuidade de sua operação. A manutenção preditiva, por outro lado, é considerada uma evolução da primeira, baseando-se em inspeções, reparos e substituições de peças em intervalos regulares (Matsushita *et al.*, 2019).

Segundo Girdhar (2004), a manutenção preditiva consiste no monitoramento das condições mecânicas e operacionais do equipamento, permitindo o agendamento de ações corretivas quando uma falha funcional é detectada. Essa estratégia é considerada mais robusta se comparada com as anteriores, uma vez que permite realizar a manutenção apenas quando necessário, diminuindo o estoque de peças de reposição e interrupções da produção (Girdhar, 2004).

Por fim, a manutenção proativa utiliza a preditiva, mas seu foco é identificar as causas raízes das falhas e garantir que não ocorram novamente. A Figura 4 apresenta um resumo das filosofias de manutenção e suas características.

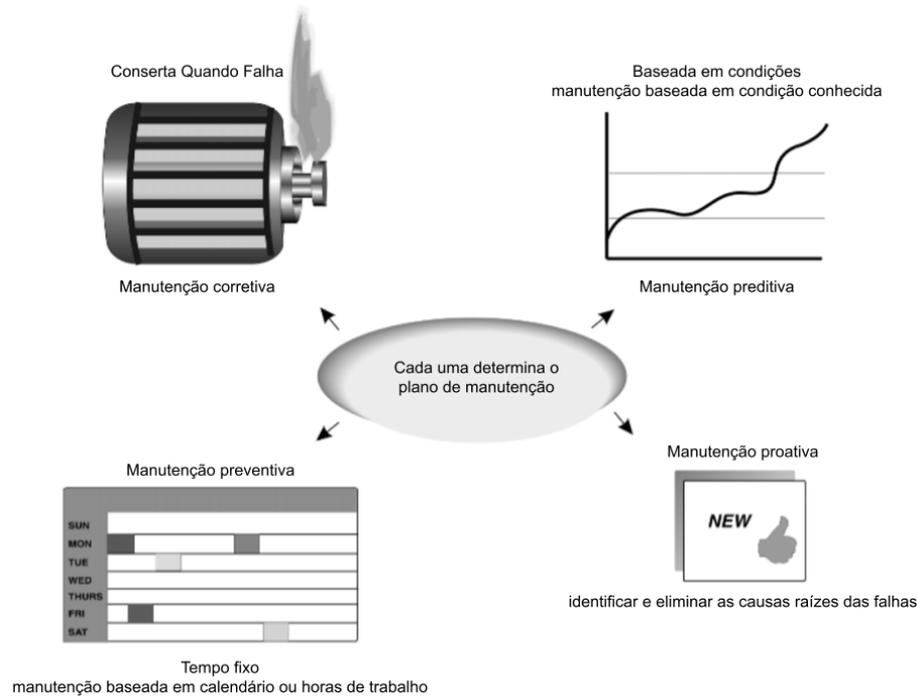
De acordo com Girdhar (2004), entre as estratégias mencionadas, as mais comumente empregadas na indústria são as preditiva e proativa. A manutenção preditiva, atualmente, alcançou um nível de sofisticação avançado, utilizando diversas técnicas, como análise de vibração, análise de óleo, ultrassom, termografia, entre outras, para monitorar e determinar as condições dos equipamentos (Girdhar, 2004).

Entre as técnicas utilizadas na manutenção preditiva, o monitoramento de vibração é considerado o mais eficaz para a detecção de defeitos mecânicos em máquinas rotativas. A medição dessa grandeza física representa um método efetivo e não intrusivo de avaliar as condições operacionais da máquina durante os processos de partida, parada e funcionamento contínuo (Girdhar, 2004).

2.4 FUNDAMENTOS SOBRE VIBRAÇÃO

A vibração mecânica é um fenômeno físico causado pelo movimento oscilatório ou alternado de um componente em torno de uma posição de referência (Silva *et al.*, 2023). Essa grandeza pode ser associada ao movimento de um sistema massa-

Figura 4 – Filosofias de manutenção.



Fonte: Girdhar (2004, p. 2).

mola, conforme ilustrado na Figura 5, a fim de determinar as suas características (Girdhar, 2004).

Esse movimento é considerado periódico e harmônico e a relação entre o deslocamento e o tempo é dada pela equação 1.

$$X = X_0 \text{sen}(wt) \quad (1)$$

em que X_0 é o deslocamento máximo, w a frequência angular e t o tempo em segundos (Girdhar, 2004).

Ao Diferenciar a equação 1, é possível obter tanto a velocidade quanto a aceleração, conforme demonstrado nas equações 2 e 3, respectivamente.

$$V = \frac{dX}{dt} = X_0 w \cos(wt) \quad (2)$$

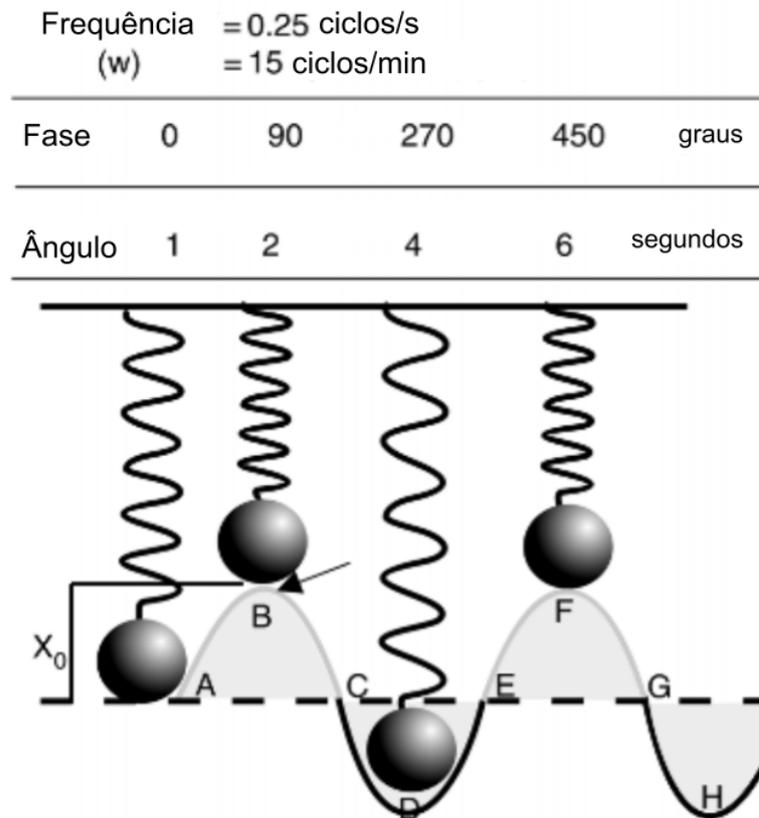
$$A = \frac{d^2X}{dt^2} = -X_0 w^2 \sin(wt) \quad (3)$$

A Figura 6 mostra as curvas da aceleração, deslocamento e velocidade para o movimento harmônico do sistema massa-mola (Girdhar, 2004).

Como se observa, o deslocamento, a aceleração e a velocidade são parâmetros utilizados para caracterizar a vibração e representados por meio de formas de onda. Nesse contexto, é necessário estabelecer determinados conceitos aplicados à descrição da propagação de ondas associadas a vibração.

De acordo com Silva *et al.* (2023), os principais parâmetros usados para descrever a vibração são:

Figura 5 – Sistema massa-mola.

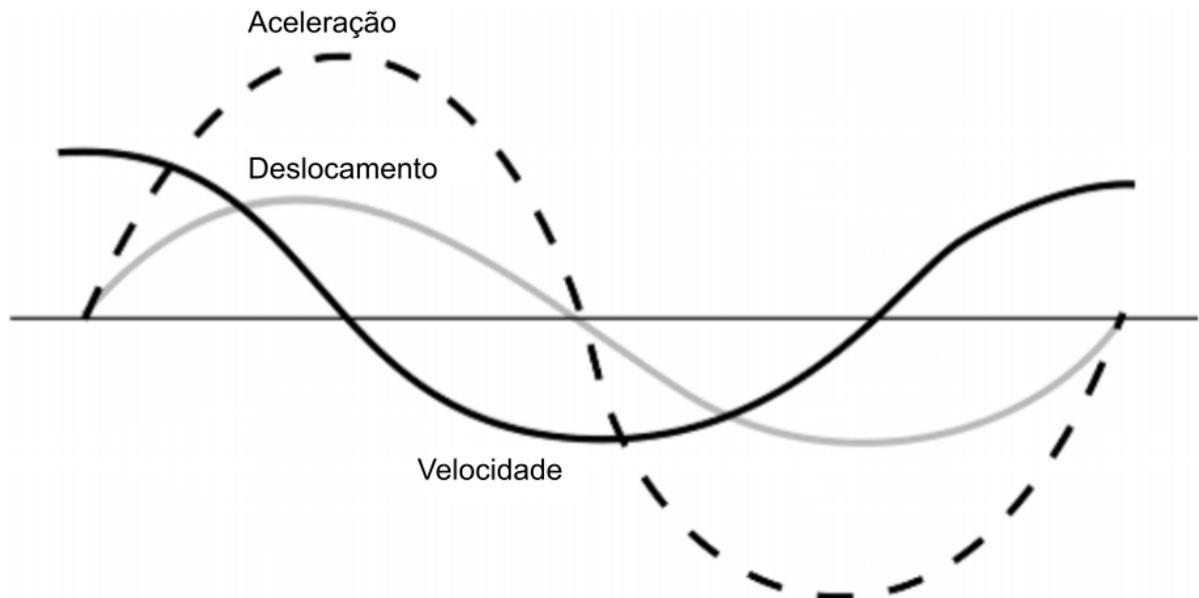


Fonte: Girdhar (2004, p. 15).

- Frequência: Indica quantas oscilações completas ocorrem em um determinado intervalo de tempo. Fundamental para identificar a origem das vibrações e normalmente medida em Hertz (Hz);
- Amplitude: Representa a magnitude da intensidade das oscilações, ou seja, a altura do pico da onda em relação à linha de referência. A amplitude fornece uma indicação relativa da intensidade ou quantidade de energia transmitida pela onda;
- Forma de onda: Trata-se de um gráfico que ilustra os valores instantâneos de vibração ao longo do tempo. Esse gráfico é útil para determinar a natureza das vibrações;
- Espectro de frequências: É um gráfico de barras que exhibe a distribuição das frequências e suas respectivas amplitudes presentes nas vibrações.

De acordo com Girdhar (2004), movimentos de vibração complexos, como os da imagem 7, podem ser decompostos em senoides de diferentes frequências. A senoide com frequência de 1 Hz corresponde a frequência fundamental da onda quadrada, enquanto as demais são as harmônicas da fundamental. Esse processo de decomposição é denominado transformada de Fourier, uma técnica matemática que converte formas de onda do domínio do tempo para o da frequência (Girdhar, 2004).

Figura 6 – Formas de onda da aceleração, velocidade e deslocamento.



Fonte: Girdhar (2004, p. 15).

Qualquer vibração pode ser representada por uma série de funções senoidais, conhecida como série de Fourier, como pode ser mostrado na Equação 4 (Chu *et al.*, 2024).

$$f(t) = A_0 + A_1 \text{sen}(wt + \phi_1) + A_2 \text{sen}(2wt + \phi_2) + A_3 \text{sen}(3wt + \phi_3) + \dots \quad (4)$$

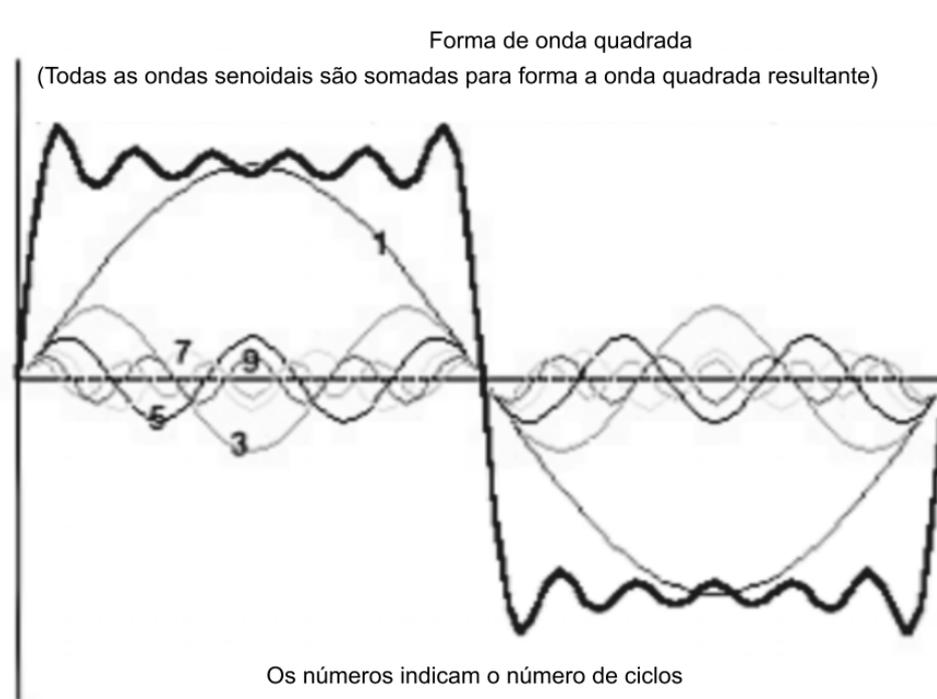
em que A_0, A_1, A_2, A_3 são as amplitudes, ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 são os ângulos das fases e $2w, 3w$ são as harmônicas em termos da frequência fundamental w .

A análise da vibração, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, é fundamentada em parâmetros mensuráveis como aceleração, velocidade e deslocamento. As curvas de amplitude desses parâmetros são empregadas em diversas aplicações, sendo essencial compreender suas definições e características (Chu *et al.*, 2024).

O deslocamento está relacionado com a distância percorrida por uma parte vibrante de um extremo a outro, sendo denominado como de “pico a pico”. No Sistema Internacional de Unidades (SI), ele é medido em micrômetros e é mais adequado para a quantificação de vibrações com frequência abaixo de 10 Hz (Girdhar, 2004).

Conforme exposto por Girdhar (2004), a velocidade pode ser definida como a taxa de variação do deslocamento, e, no contexto da medição de vibrações em máquinas, adota-se sua forma em valor eficaz (RMS) como unidade padrão. Esse parâmetro é considerado mais apropriado para a avaliação de vibrações na faixa de frequência entre 10 Hz a 1000 Hz. Como essa faixa corresponde a região em que a maioria dos defeitos em máquinas se manifesta, o parâmetro de velocidade é amplamente

Figura 7 – Forma de onda complexa.



Fonte: Girdhar (2004, p. 18).

empregado em detrimento dos outros parâmetros nas análises de vibração (Girdhar, 2004).

A aceleração, por sua vez, é a taxa de variação da velocidade, sendo expressa em termos de “g”, que representa a aceleração provocada pela gravidade na superfície terrestre ou seu valor RMS. Esse parâmetro é particularmente apropriado para a medição de vibrações em frequências superiores a 1000 Hz (Girdhar, 2004).

2.5 FONTES DE VIBRAÇÃO E RUÍDO EM MÁQUINAS ROTATIVAS

Máquinas produzem movimentos oscilatórios durante sua operação normal, e essas vibrações são geralmente consideradas benignas. No entanto, como as vibrações refletem as condições do equipamento, podem estar associadas a problemas mecânicos que geram padrões específicos de vibração, relacionados à geometria da máquina e à sua condição (Chu *et al.*, 2024).

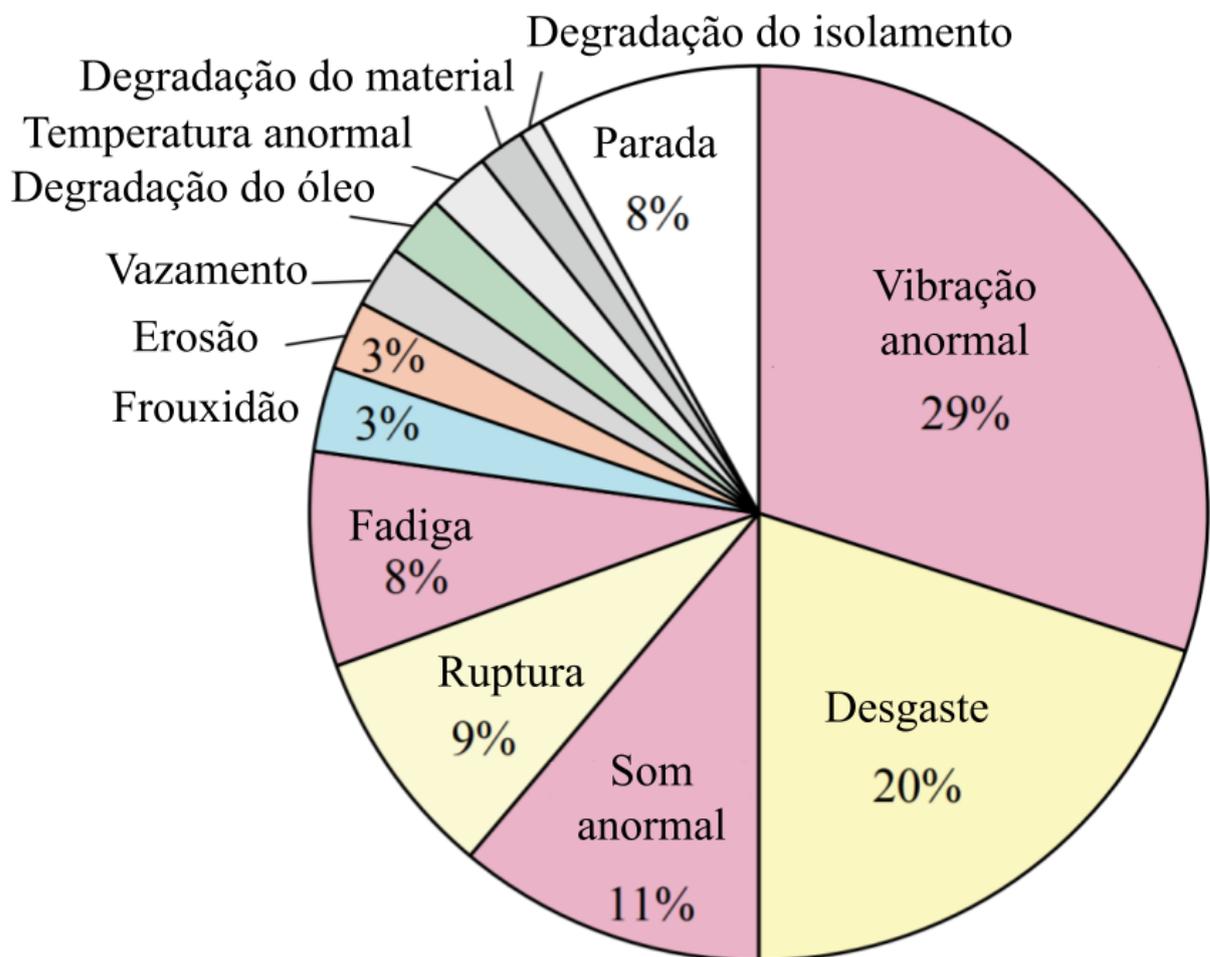
Segundo Silva *et al.* (2023), as principais causas de vibração são:

- Desbalanceamento devido à distribuição não uniforme de massa;
- Desalinhamento;
- Falha nos rolamentos;
- Problemas de lubrificação devido ao uso de lubrificantes inadequados ou à falta de lubrificante;

- Ressonância, ou seja, frequência de excitação coincide com a frequência natural do sistema;
- Desgaste e fadiga devido a vibrações constantes;
- Desalinhamento progressivo dos componentes devido a vibrações constantes.

Segundo Matsushita *et al.* (2019), do ponto de vista dos sistemas vibracionais, uma máquina rotativa pode ser considerada especial devido às características dinâmicas dos rolamentos e vedações, que são específicas desse tipo de equipamento. A Figura 8 mostra o resultado de uma pesquisa sobre problemas em máquinas rotativas, permitindo concluir que mais da metade dos problemas nesse tipo de equipamento está relacionado com o fenômeno da vibração.

Figura 8 – Pesquisa relacionada a problemas em máquinas rotativas.



Fonte: Matsushita *et al.* (2019, p. 4).

Ainda de acordo com Matsushita *et al.* (2019) a saúde de máquinas rotativas, é frequentemente relacionada aos sinais de vibração dos rolamentos e eixos. A ISO 10816:1995 afirma que para critério de avaliação da vibração, as medições devem

ser feitas em partes não rotativas próximas à carcaça do rolamento (Matsushita *et al.*, 2019).

2.6 TECNOLOGIAS DE COLETA DE DADOS DE VIBRAÇÃO

Os dados de vibração são obtidos a partir de sensores estrategicamente instalados no equipamento, capazes de detectar movimentos em uma ou mais direções. Esses sensores convertem vibrações mecânicas em sinais elétricos, que, em seguida, são processados por placas de aquisição de dados (Silva *et al.*, 2023).

Segundo Girdhar (2004), os sensores comumente utilizados para medição de vibração incluem captadores de velocidade, acelerômetros e detectores de deslocamento. A escolha do tipo do dispositivo de medição deve ser feita considerando as condições de cada medição (Chu *et al.*, 2024).

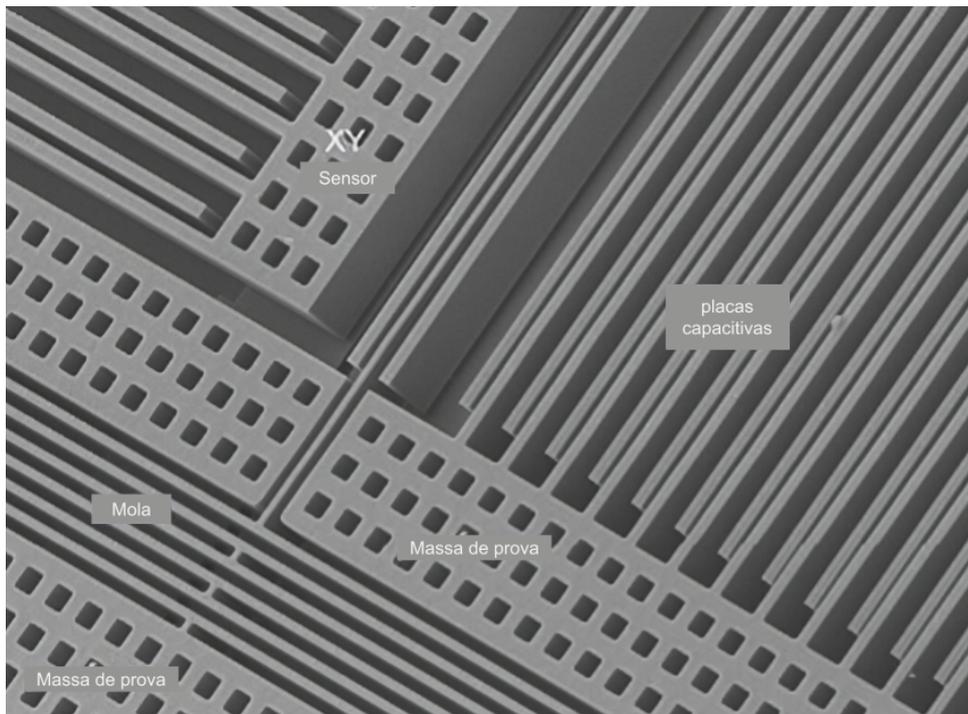
Os acelerômetros emergiram como uma opção predominante em pesquisas que envolvem coleta de dados de vibração. O funcionamento desses dispositivos é fundamentado na análise da força exercida sobre uma massa em aceleração (Hassan *et al.*, 2024).

Os acelerômetros podem ser categorizados em dois tipos principais: piezoelétricos e sistemas microeletromecânicos (MEMS). Os acelerômetros MEMS têm sido adotados devido à sua fácil integração com sistemas de internet das coisas (IoT). Além disso, os avanços contínuos na tecnologia desses dispositivos possibilitaram o desenvolvimento de sensores mais precisos, com uma ampla faixa de operação e baixo custo (Romanssini *et al.*, 2023).

Acelerômetros MEMS são sensores de vibração em escala reduzida, produzidos por meio de processos de micro fabricação (Hassan *et al.*, 2024). Entre os diversos tipos de sensores MEMS disponíveis, eletromecânicos capacitivos se destacam, predominando no mercado e sendo aplicados em variadas áreas (D'Alessandro *et al.*, 2019). A Figura 9 apresenta a estrutura de um sensor capacitivo, destacando seus principais componentes.

O sensor MEMS capacitivo opera com base em um transdutor eletromecânico, responsável por converter energia mecânica em elétrica (D'Alessandro *et al.*, 2019). Quando a massa de prova é submetida a uma aceleração, ocorre uma deflexão da estrutura apresentada na Figura 9, provocando uma alteração na capacitância entre as placas capacitivas. Essa variação da capacitância entre as placas fixas à massa de prova e independentes gera um sinal de saída proporcional a aceleração aplicada (Analog Devices, 2022).

Figura 9 – Imagem mostrando os detalhes de um sensor MEMS capacitivo.



Fonte: D'Alessandro *et al.* (2019, p. 8).

2.7 PROCESSAMENTO DE SINAIS DE VIBRAÇÃO

A vibração é um fenômeno físico convertível em sinais elétricos por meio de transdutores, como sensores MEMS. Esses sinais elétricos precisam ser processados para fornecer informações essenciais para a aplicação da manutenção preditiva (Girdhar, 2004). De acordo com Chu *et al.* (2024), esse processamento envolve etapas como a entrada de sinais analógicos, aplicação de filtros anti-aliasing, conversão analógica para digital e análise no domínio do tempo ou frequência.

O aspecto central na entrada de sinais analógicos refere-se ao processo de amostragem. Conforme estabelecido pelo Teorema de amostragem de Shannon, para um sinal ser unicamente caracterizado sem perda de informação, a frequência de amostragem deve ser, no mínimo, duas vezes superior à frequência do sinal (Lathi, 2008). Esse princípio é matematicamente representado pela Equação 5:

$$f_s > 2f \quad (5)$$

onde f representa a frequência do sinal original e f_s indica a frequência de amostragem.

Em relação à amostragem, é fundamental aplicar um filtro anti-aliasing para eliminar frequências superiores às de interesse (Lathi, 2008). Segundo Chu *et al.* (2024), esse filtro deve ser aplicado na frequência de corte, eliminando todas as com-

ponentes com frequências acima desse limite. Essa prática evita a sobreposição de espectros (aliasing), um fenômeno que pode distorcer os sinais digitalizados ao misturar componentes de alta frequência com aquelas de baixa frequência (Lathi, 2008).

Ainda a respeito da entrada de sinais, a calibração dos sensores é um processo fundamental para a coleta precisa de amostras (Girdhar, 2004). No caso específico dos acelerômetros MEMS, a estrutura interna, composta por partes móveis, é suscetível a estresses mecânicos que podem ocorrer tanto por fatores ambientais quanto durante a montagem do sistema. Esses estresse geram desvios que devem ser corrigidos para garantir medições confiáveis (Analog Devices, 2022).

Após processamento adequado dos sinais analógicos, realiza-se a conversão para sinais digitais. Essa conversão ocorre em sistemas microprocessados, cuja resolução varia em potências de 2. Por exemplo, um sistema com resolução de 12 bits fornece uma conversão analógico-digital resultando em 4096 intervalos discretos (Girdhar, 2004).

Após as etapas iniciais, as características mais relevantes do sinal são extraídas por meio de técnicas de análise. As técnicas mais comuns de análise de sinais abrangem o domínio do tempo, que proporciona uma leitura geral, e o domínio da frequência, que permite uma visão detalhada da distribuição de frequências (Girdhar, 2004). A Figura 10 ilustra a correlação entre esses dois tipos métodos de análise, destacando suas complementaridades.

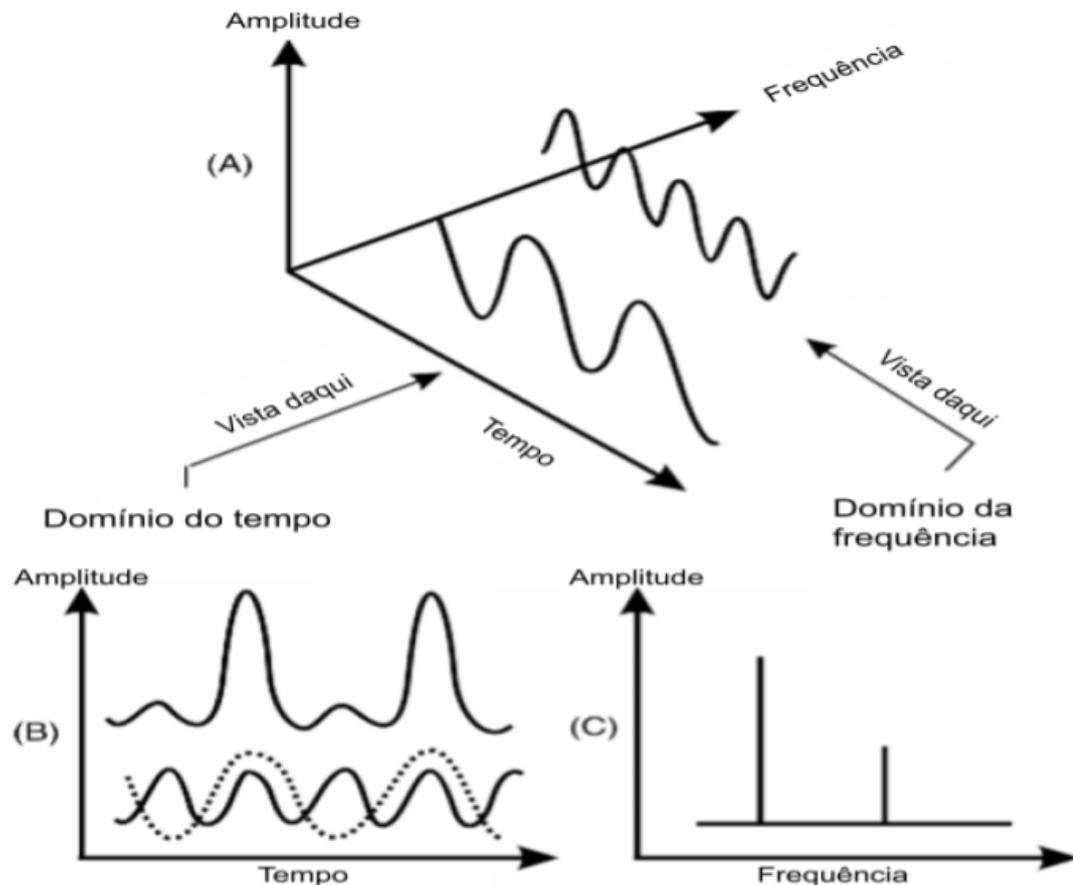
Segundo Girdhar (2004), os sinais coletados estão inicialmente no domínio do tempo e, para possibilitar uma análise no domínio da frequência, é necessário a transformação desses sinais. Para essa conversão, pode-se aplicar a transformada de Fourier ou, preferencialmente, a Transformada Rápida de Fourier (FFT), sendo mais adequada para sistemas digitais. Essa transformação decompõe o sinal em suas componentes de frequência, permitindo a análise detalhada de fenômenos periódicos e harmônicos contidos no sinal (Oppenheim *et al.*, 2010).

2.8 TRABALHOS RELACIONADOS

No estudo realizado por Al-Naggar *et al.* (2021), é proposto um sistema de monitoramento de vibração para máquinas de Controle Numérico Computadorizado (CNC), visando determinar a condição dessas com base na norma ISO 10816-1:1995, conforme ilustrado na Figura 11. A importância desse trabalho reside na aplicação de uma diretriz reconhecida para determinar a integridade estrutural da máquina, fundamentando-se nos dados de vibração obtidos.

Destaca-se, ainda, o estudo realizado por Varanis *et al.* (2018), no qual foi comparado o desempenho do acelerômetro MEMS de baixo custo ADXL-345 com um sensor de aplicação industrial e custo mais elevado. A análise dos sinais provenientes de ambos os sensores demonstrou que o ADXL-345 apresenta medições coerentes

Figura 10 – Análise no domínio do tempo e da frequência.



Fonte: Girdhar (2004, p. 56).

em uma faixa de frequência de 5 a 45 Hz. Além disso, o ADXL-345 mostrou uma alta correlação com o sensor industrial para uma frequência de aproximadamente 120 Hz (Varanis *et al.*, 2018). Dessa forma, conclui-se que abordagens de monitoramento de baixo custo são viáveis.

Vale mencionar o trabalho de Zanotti (2023), que implementou um sistema de monitoramento energético para um torno mecânico. Esse trabalho é relevante ao evidenciar a instabilidade no envio de informações pela rede wi-fi, quando o torno está em operação. O problema foi mitigado ao afastar o dispositivo de medição da máquina, o que estabilizou a conexão com a rede, no entanto, problemas de latência ainda foram observados. Assim, conclui-se que uma abordagem utilizando envio informações por cabo pode ser mais adequada para esse cenário, oferecendo maior estabilidade e menor latência na transmissão dos dados.

O estudo mais próximo ao que será desenvolvido é o realizado por Costa *et al.* (2020). Nesse trabalho, foi adotada uma abordagem utilizando um sensor de vibração MEMS e um sensor de ruído para o monitoramento de um torno mecânico. A detecção de falhas é realizada por meio da análise grandezas no domínio do tempo e da frequência, utilizando uma metodologia baseada em manutenção de monitoramento

Figura 11 – Severidade de vibração conforme a ISO 10816-1:1995

GRAVIDADE DA VIBRAÇÃO PELA ISO 10816						
Máquina		Classe I máquina pequenas	Classe II máquinas médias	Classe III fundação rígida larga	Classe IIII fundação rígida macia	
in/s	mm/s					
Velocidade de Vibração Vrms	0.01	0.28				
	0.02	0.45				
	0.03	0.71		boa		
	0.04	1.12				
	0.07	1.80				
	0.11	2.80		satisfatória		
	0.18	4.50				
	0.28	7.10		insatisfatória		
	0.44	11.2				
	0.70	18.0				
	0.71	28.0		inaceitável		
	1.10	45.0				

Fonte: Al-Naggar *et al.* (2021, p. 316).

de condições. Além disso, são discutidas as estratégias adequadas para aquisição dos sinais, com ênfase na medição dos pontos mais próximos ao rolamento do eixo árvore.

O Quadro 1 apresenta uma comparação entre diferentes estudos sobre manutenção fabril, utilizando a vibração como parâmetro de análise. Nesse contexto, são comparadas as tecnologias utilizadas para coleta e análise de dados, a metodologia aplicada e os respectivos resultados obtidos.

Quadro 1 – Trabalhos relacionados sobre monitoramento de máquinas

Estudo	Fonte	Tecnologias utilizadas	Metodologia	Resultados
Condition monitoring based on IoT for predictive maintenance of industrial machines	Al-Naggar <i>et al.</i> (2021)	sensor MEMS MMA8451, raspberry pi, firebase e python	Sensores de aceleração de baixo custo são utilizados para coletar dados de vibração. Os dados são transmitidos via IoT para monitoramento.	Para cada máquina, foi possível identificar seu estado de operação e prever falhas.
Vibration Monitoring of CNC Machinery Using MEMS Sensor and Montronix System	Dogrusoz <i>et al.</i> (2020)	sensor MEMS PulseNG, sistema Montronix de monitoramento	Propõe um sistema de monitoramento contínuo para CNC com sensores de vibração.	O sistema de monitoramento de vibrações proposto detectou falhas em fases iniciais.
A multi-sensor based online tool condition monitoring system for CNC	Zhang <i>et al.</i> (2018)	sensor MEMS MMA7361, sensor piezoelétrico, Arduino	Sistema de monitoramento da condição de ferramentas com base em múltiplos sensores.	O sistema demonstrou ser eficaz na captura de dados em tempo real para monitoramento.
Development of Hardware System Using Temperature and Vibration Sensors for Condition Monitoring of Machine Tools	Adeyeri <i>et al.</i> (2016)	sensor MEMS ADXL345, sensor de temperatura AD590	Sistema de monitoramento composto por sensores de vibração e temperatura.	Os resultados mostraram correlação entre vibrações e falhas de operação.

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

3 MATERIAIS e MÉTODOS

Nesta seção, serão abordados o projeto e construção do sistema proposto. Inicialmente, serão apresentados os requisitos funcionais e não funcionais, bem como a modelagem do sistema.

Em seguida, serão apresentados os principais materiais empregados no desenvolvimento do sistema, seguidos pela descrição das etapas de montagem elétrica e estrutural. Em sequência, serão discutidas as técnicas implementadas para a aquisição dos sinais, bem como o código embarcado desenvolvido e o fluxo de dados do sistema. Por fim, os experimentos realizados e as metodologias adotadas para a execução desses testes serão detalhados.

3.1 REQUISITOS DO PROJETO

A definição de requisitos garante o alinhamento da execução do projeto com seus objetivos e escopo. A seguir, são listados os requisitos do sistema de monitoramento de vibração proposto, garantindo que o projeto esteja conforme as expectativas estabelecidas.

3.1.1 Requisitos funcionais

Os requisitos funcionais são definições dos serviços que o sistema deve fornecer, como deve reagir a entradas específicas e como deve se comportar em situações determinadas (Sommerville, 2014). Assim, apresentam-se abaixo os requisitos funcionais, isto é, as funcionalidades que o sistema de monitoramento de vibração deve assegurar.

- **RF1** O sistema deve disponibilizar os dados coletados para o usuário;
- **RF2** O sistema deve possuir uma interface;
- **RF3** O sistema deve ser apto para aplicações industriais;
- **RF4** O sistema deve realizar monitoramento contínuo da máquina;
- **RF5** O sistema deve fornecer uma alta taxa de entrega de dados;
- **RF6** O sistema deve realizar periodicamente testes de sanidade em seus componentes;
- **RF7** Em caso de problemas nos componentes do sistema, o usuário deve ser notificado;
- **RF8** O sistema deve armazenar os dados coletados;
- **RF9** O sistema deve coletar dados de vibração;
- **RF10** O sistema deve conseguir detectar padrões anormais de vibração;

- **RF11** O sistema deve indicar condições de falha da máquina;
- **RF12** Em caso de condições de falha da máquina, o usuário deve ser notificado.

3.1.2 Requisitos não funcionais

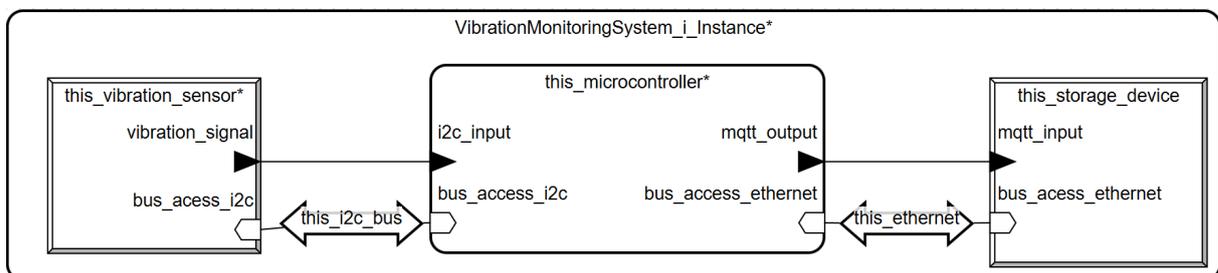
Os requisitos não funcionais geralmente especificam ou limitam características de todo o sistema, estando relacionados a atributos de qualidade da arquitetura do mesmo (Sommerville, 2014). Dessa forma, são listados a baixo os requisitos não funcionais visando atender as propriedades específicas do sistema de monitoramento de vibração.

- **RFN1:** O sistema deve otimizar o consumo de energia para prolongar sua vida útil e reduzir custos operacionais.
- **RFN2:** O sistema deve conseguir coletar dados de vibração até 100 Hz.
- **RFN3:** O sistema deve conseguir coletar dados em uma taxa de 500 Hz.
- **RFN4:** O sistema deve processar os dados no microcontrolador.
- **RFN5:** O sistema deve armazenar os valores coletados em um banco de dados;
- **RFN6:** O sistema deve enviar dados por meio de ethernet;

3.2 MODELAGEM

A partir dos requisitos, foi proposta a modelagem inicial do sistema por meio da linguagem de análise e projeto de arquitetura (AADL) (Software Engineering Institute, 2004). A Figura 12 ilustra a modelagem do sistema, onde ficam evidentes algumas decisões tomadas durante o projeto que serão abordadas como profundidade na próxima seção.

Figura 12 – Modelagem do sistema em AADL.

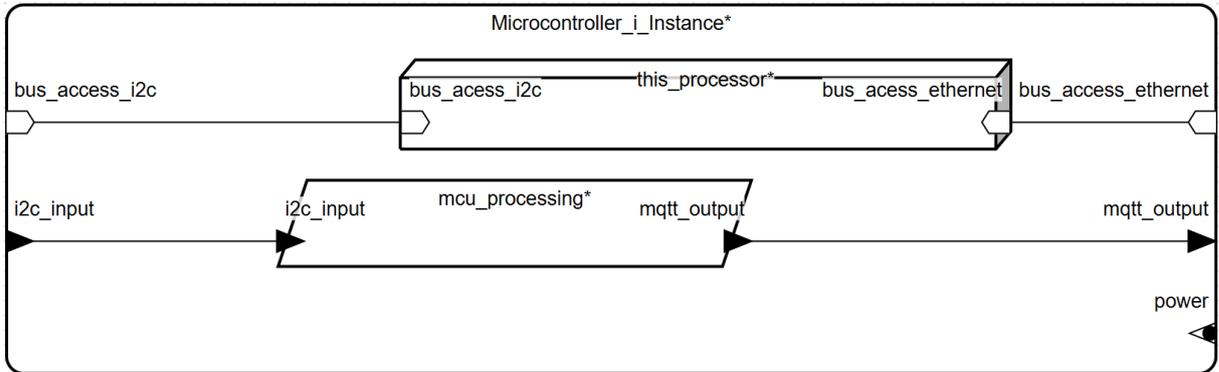


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Um dos elementos centrais do sistema, o microcontrolador, foi modelado juntamente com o fluxo de seu processamento. Na Figura 13, é apresentada a modelagem do microcontrolador, permitindo a definição dos barramentos de comunicação e dos pacotes de dados que trafegam durante o processamento. A Figura 14, por sua vez, exibe a modelagem do processamento do microcontrolador, possibilitando a

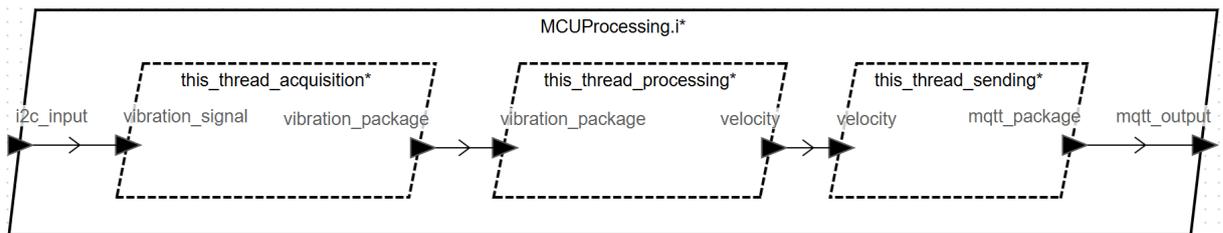
representação das threads e dos pacotes de dados de entrada e saída associados a cada uma delas.

Figura 13 – Modelagem do microcontrolador em AADL.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 14 – Modelagem do fluxo de processamento do microcontrolador em AADL.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O código desenvolvido para geração dos modelos e das análises encontra-se no Apêndice C. Embora preliminar, a modelagem realizada forma a base para futuras expansões do projeto, uma vez que um modelo mais detalhado permite realizar análises, tais como de escalonamento, consumo energético e alocação de memória sem necessidade de uma implementação.

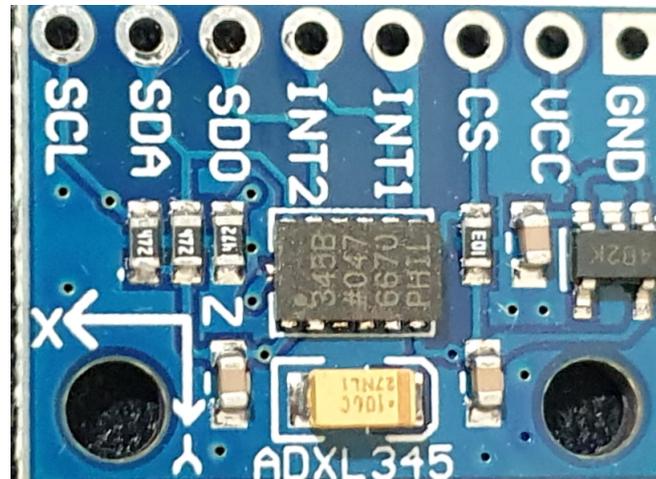
3.3 MATERIAIS

Após a definição dos requisitos e a modelagem do sistema, procedeu-se à seleção dos materiais mais relevantes. Conforme especificado no **RF9**, o sensor de vibração constitui o principal componente do projeto. A partir dessa escolha, os demais componentes foram selecionados conforme os requisitos e de compatibilidade necessários para o funcionamento adequado do sistema.

O sensor de vibração selecionado foi o ADXL345, um acelerômetro MEMS capacitivo. Fabricado pela Analog Devices, o dispositivo possui consumo de energia ultra baixo e consegue detectar vibrações em três eixos, fornecendo leituras de alta

resolução com 13 bits. A Figura 15 apresenta a placa utilizada para fazer interface com o circuito integrado (CI) do sensor ADXL345.

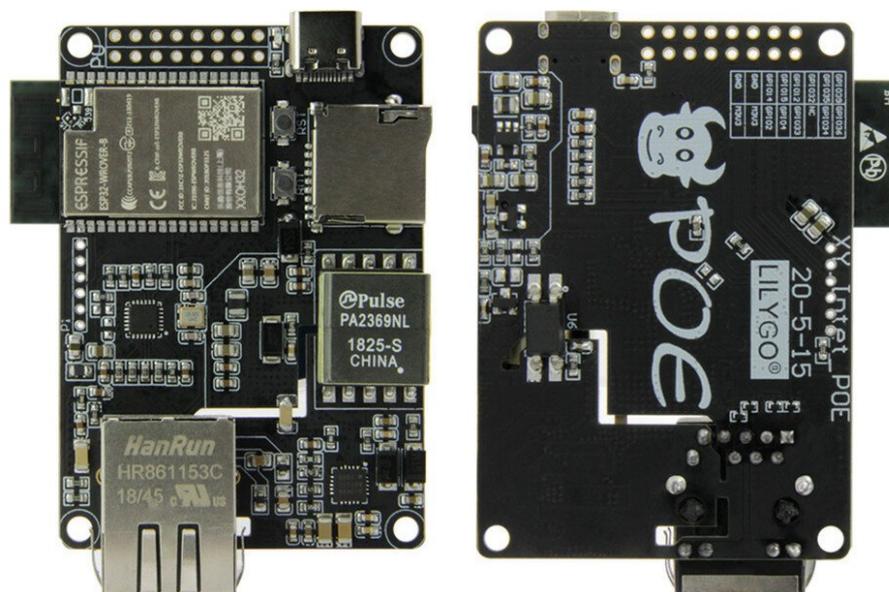
Figura 15 – Placa com sensor ADXL345.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Em seguida, a placa de desenvolvimento TTGO T-Internet-POE (Figura 16) foi selecionada com base nos requisitos **RF5** e **RF3**, ao oferecer conectividade Ethernet, assegurando alta taxa de transferência de dados, além de permitir alimentação via Ethernet, Power Over Ethernet (PoE), simplificando a instalação para aplicações industriais. O microcontrolador WROOM-32, integrado à placa, possui dois núcleos operando a uma frequência de 240 MHz e um coprocessador de ultra baixo consumo de energia, alinhando-se aos requisitos **RFN3** e **RFN1** (ESPRESSIF, 2024).

Figura 16 – Placa de desenvolvimento TTGO T-Internet-POE.



Fonte: (LILYGO, 2024).

O monitoramento foi realizado em uma máquina-ferramenta utilizada para operações de torneamento, especificamente o torno mecânico modelo CDL350B, da fabricante Timemaster, disponível no laboratório de manufatura. Esse equipamento (Figura 17) foi escolhido por ser empregados em processos que demandam precisão, onde a identificação preditiva de cenários de falha é essencial para garantir a qualidade e continuidade do processo produtivo.

Figura 17 – Torno mecânico utilizado no monitoramento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

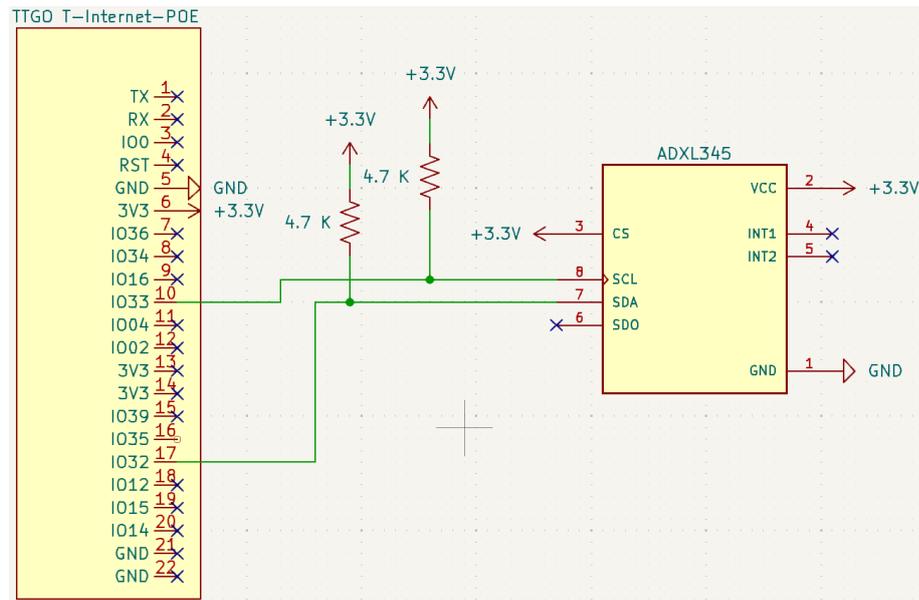
Após a definição dos materiais necessários, procede-se à montagem dos componentes do sistema. Primeiramente, foram projetados e construídos os componentes elétricos, dados que estes são fundamentais para a integração e o funcionamento dos demais elementos do sistema.

3.4 MONTAGEM ELÉTRICA

Os principais componentes da montagem elétrica incluem o microcontrolador e o sensor de vibração. A partir das especificações de conexão dos pinos desses componentes, foi desenvolvida uma esquemática elétrica apropriada (Figura 18)

Os pinos essenciais para o funcionamento do sensor, conforme observável no esquemático elétrico, incluem o GND e VCC, responsáveis pela alimentação elétrica, além do SDA e do SCL, utilizados para comunicação via protocolo Inter-Integrated Circuit (I2C). Para assegurar o funcionamento adequado da comunicação I2C, é essen-

Figura 18 – Esquemática elétrica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

cial a presença de resistores pull-up conectados aos pinos SDA e SCL, que mantêm as linhas de dados e clock em níveis lógicos apropriados (Analog Devices, 2022).

O circuito do sensor foi montado em uma placa ilhada, utilizando conectores do tipo borne, para facilitar a conexão. A Figura 19 ilustra, respectivamente, as partes superior e inferior da placa: a primeira mostra os bornes conectados ao sensor, enquanto a segunda destaca as trilhas e os resistores pull-up relacionados à comunicação I2C.

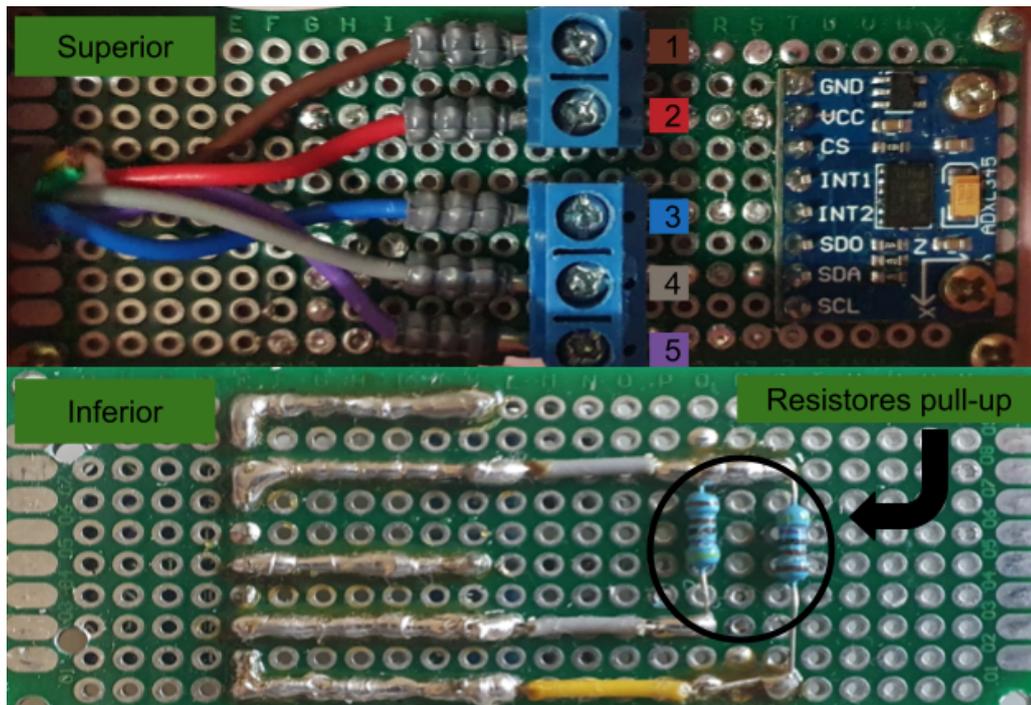
A comunicação entre controlador e o sensor foi estabelecida por meio de um cabo manga, com 40 cm de comprimento. Conforme ilustrado na Figura 20, a montagem do circuito do controlador foi realizada utilizando uma placa ilhada com conectores do tipo borne. A alimentação do microcontrolador foi implementada por meio de um cabo Ethernet, conforme destacado na mesma figura, empregando a tecnologia PoE.

Nas Figuras 19 e 20 estão detalhadas as conexões das vias dos cabos responsáveis pela alimentação e comunicação do sistema. A descrição com as respectivas funções de cada fio conforme indicado:

- (1) Marrom: GND (terra);
- (2) Vermelho: VCC (alimentação);
- (3) Azul: CS (chip select);
- (4) Cinza: SDA (serial data);
- (5) Roxa: SCL (serial clock).

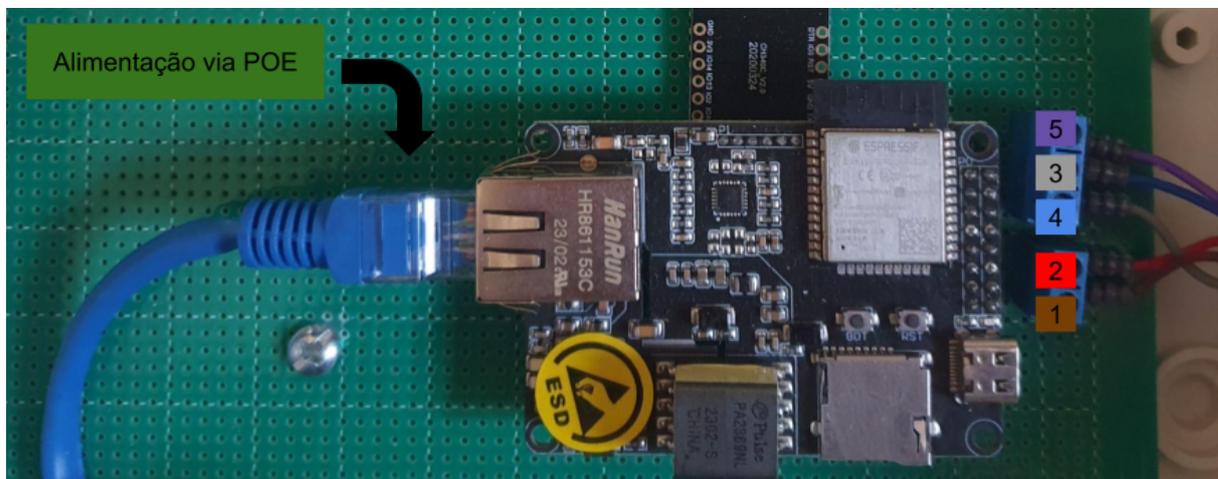
Após a definição da montagem elétrica do sistema, foram desenvolvidos o es-

Figura 19 – Montagem elétrica do sensor.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 20 – Montagem elétrica do microcontrolador.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

tudo e a construção dos elementos estruturais. Esses elementos têm como finalidade assegurar a fixação adequada dos demais componentes, bem como a integração ao equipamento a ser monitorado.

3.5 COMPONENTES ESTRUTURAIS E REGIÃO DE MONTAGEM

Para a realização do monitoramento da integridade estrutural do equipamento, foi proposta a montagem física do sistema. Conforme abordado na fundamentação teórica, os pontos críticos para detecção de sinais de falha incluem o rolamento, o estator e o rotor da máquina rotativa. Dado que o acesso direto ao estator e ao rotor pode ser restrito, definiu-se como prioritário o monitoramento de áreas próximas ao rolamento.

Ressalta-se que, considerando o objetivo do sistema de monitorar os componentes internos do torno, a região da ferramenta não foi incluída na análise. Tal exclusão justifica-se por que essa região está sujeita a desgaste e frequente substituição, fatores que introduzem variações significativas no padrão de vibração e, conseqüentemente, demanda outras abordagens para avaliação da integridade estrutural do equipamento não abordadas nesse estudo.

Para o monitoramento do torno mecânico utilizado nesse trabalho, o sistema foi acoplado na região próxima ao rolamento do eixo árvore do equipamento. A Figura 21 ilustra a área específica onde a fixação deveria ser realizada, sendo uma região que, além de próxima do ponto de interesse, não apresenta obstáculo para a instalação do acoplamento do sistema de monitoramento.

Figura 21 – Região escolhida para ser feito o monitoramento do equipamento.

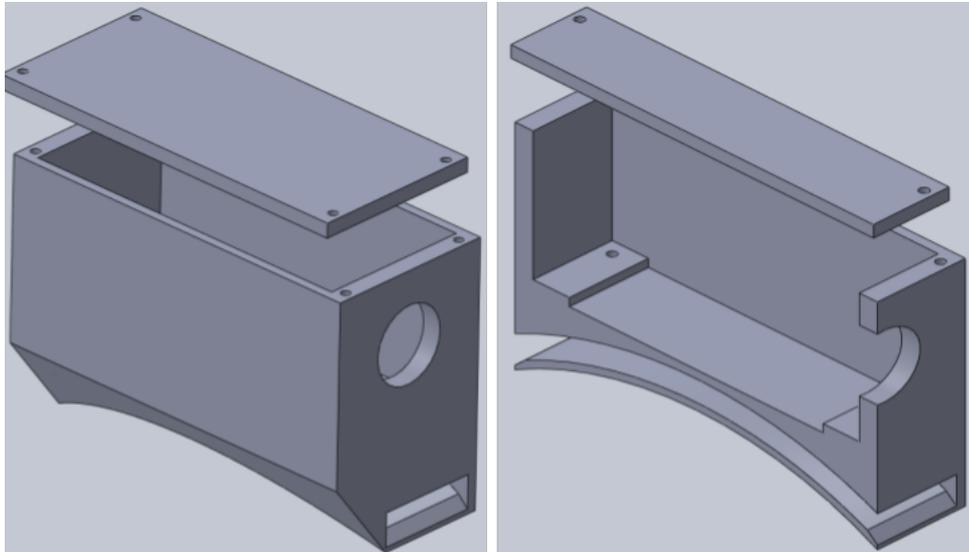


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O sensor deveria ser acoplado na máquina de forma totalmente mecânica, sem uso de cola ou adesivo, evitando assim qualquer amortecimento das vibrações de interesse. Para viabilizar essa fixação, foi desenvolvida uma peça em impressão

3D (Figura 22), projetada especificamente para acomodar o sensor e garantir sua proteção conforme o requisito **RF3**.

Figura 22 – Encapsulamento do sensor.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O encapsulamento do sensor foi projetado com foco na fixação direta à máquina por meio de uma braçadeira metálica. Além disso, utilizou-se uma caixa com classificação IP55 para proteger e fixar o circuito do microcontrolador (Figura 23). Essa solução visa garantir tanto a segurança quanto a durabilidade do sistema em ambientes industriais, oferecendo proteção contra poeira e jatos de água, conforme especificado pelo padrão IP55.

Figura 23 – Caixa IP55 usada para proteger o microcontrolador.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com os componentes físicos do sistema implementados e definidos, iniciou-se o desenvolvimento dos métodos e ferramentas para assegurar a correta aquisição dos sinais.

3.6 AQUISIÇÃO DOS SINAIS

Para a obtenção precisa de sinais, foi necessário o desenvolver técnicas de calibração e filtragem. Esse processo assegurou a eliminação de desvios na leitura dos sinais e a redução de ruídos, garantindo a integridade e a qualidade dos dados coletados.

3.6.1 Calibração do sensor

Para assegurar uma leitura precisa dos valores de aceleração, foi realizada a calibração do sensor ADXL345. A calibração de ponto único foi conduzida conforme as especificações da fabricante, visando minimizar a discrepância entre os valores obtidos pelo sensor e os reais.

De acordo com Analog Devices (2022), o procedimento de calibração de ponto único é realizado com o eixo z orientado em direção oposta ao do campo gravitacional. Nesse posicionamento, os eixos x e y devem estar alinhados para minimizarem a influência do campo gravitacional, aproximando-se de uma condição de campo nulo. Em seguida, a saída é determinada por meio da média das amostras coletadas nos três eixos, proporcionando uma medida estável e precisa da calibração (Analog Devices, 2022).

As medições obtidas para os eixos X e Y são então subtraídas do valor considerado referência para o campo gravitacional nulo. Para o eixo Z, as medições são ajustadas considerando o valor de referência 1 g no campo gravitacional. Com base na sensibilidade do acelerômetro, fixada em 256 LSB/g, esse valor de referência para o eixo Z é definido como 256 (Analog Devices, 2022).

O sensor ADXL345 possui registradores específicos que realizam a compensação automática de desvios. No entanto, a resolução desses registradores é equivalente a 1/4 da resolução de saída do acelerômetro (Analog Devices, 2022). Por esse motivo, os valores de desvio calculados para cada eixo devem ser divididos por 4 antes de serem usados para configurar os registradores.

As Equações 6 e 7 apresentam as fórmulas utilizadas para o cálculo dos desvios nos eixos Z, X e Y, respectivamente.

$$offset_z = \frac{256 - \overline{leituras}}{4} \quad (6)$$

$$offset_{x,y} = \frac{0 - \overline{leituras}}{4} \quad (7)$$

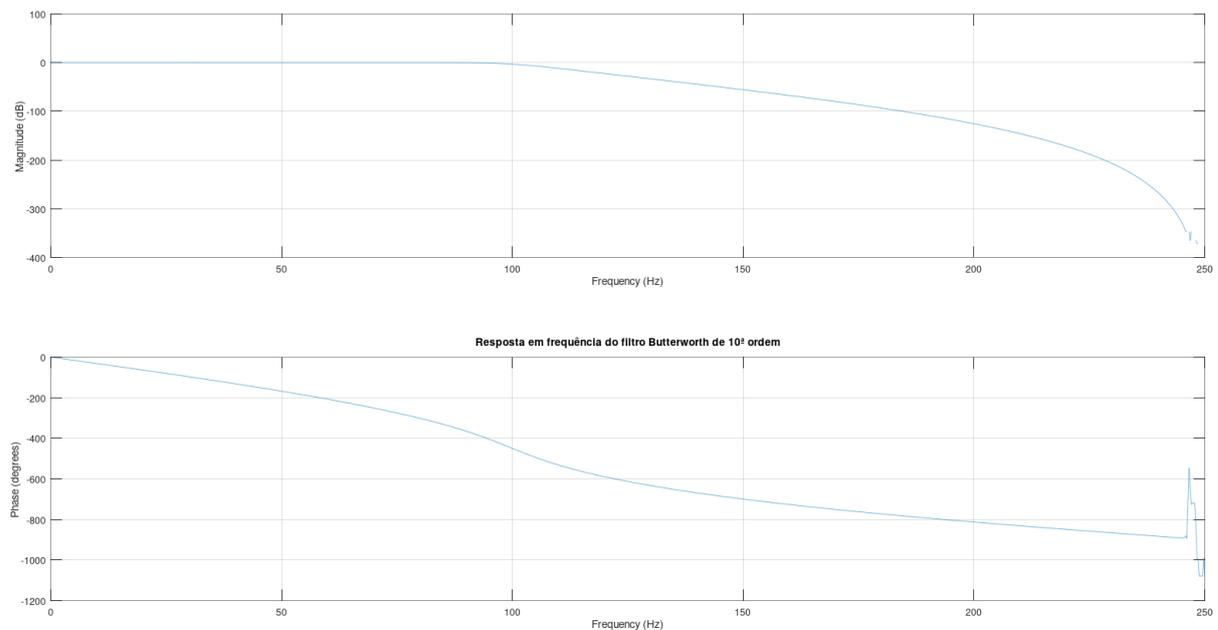
O processo de calibração e configuração dos registradores de desvio do sensor foi implementado no firmware do sistema. A calibração foi executada previamente a instalação do sensor na máquina, realizada em uma superfície plana com o sensor fixado em seu encapsulamento.

3.6.2 Filtro Anti-aliasing

O requisito **RFN3** estabelece uma taxa de coleta de 500 Hz, enquanto o **RFN2** define a necessidade de aquisição de um sinal de 100 Hz. Dessa forma, conclui-se que, conforme o teorema da amostragem de Shannon, o sinal está sendo amostrado adequadamente. Contudo, para evitar que sinais de frequências mais elevadas introduzam ruído no processo de aquisição, torna-se necessário aplicar de um filtro anti-aliasing em 100 Hz.

Foi projetado um filtro passa-baixa com frequência de corte de 100 Hz e amostragem de 500 Hz. O projeto foi realizado no software de código aberto Octave (GNU Octave, 2024), com a escolha de um filtro Butterworth de décima ordem. A Figura 24 apresenta os gráficos de amplitude e fase da resposta em frequência do filtro.

Figura 24 – Gráfico da amplitude e fase da resposta em frequência do filtro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O filtro passa-baixa Butterworth foi escolhido devido à sua resposta plana na banda de passagem, característica que reduz distorções até a frequência de corte de 100 Hz. Optou-se pela décima ordem para assegurar uma atenuação acentuada na amplitude fora da banda de passagem (Oppenheim *et al.*, 2010).

O código do filtro foi implementado como uma classe diretamente no firmware do microcontrolador usado no projeto. O código desenvolvido no Octave para criação do filtro pode ser encontrado no Apêndice A.

Após a definição e o projeto dos componentes elétricos, estruturais e de aquisição de sinais, procede-se à implementação do código embarcado do dispositivo. Este componente é responsável tanto pela definição do comportamento funcional do

dispositivo quanto pela transmissão dos dados coletados para a interface de visualização.

3.7 Desenvolvimento do software embarcado.

O software embarcado responsável pela coleta, processamento e transmissão de dados foi desenvolvido utilizando as linguagens de programação C e C++, empregando o framework oficial da Espressif, o ESP-IDF. Além disso, a biblioteca *Adafruit_ADXL345* foi integrada para viabilizar a comunicação com o sensor, operando no ambiente de desenvolvimento do Arduino. Também utilizou-se o kit de desenvolvimento de software (SDK) da ThingsBoard, para integrar o sistema embarcado com a plataforma IoT.

O firmware do sistema será apresentado por meio de diagramas de classes, sequência e estados, permitindo uma descrição mais abrangente e genérica de sua implementação. Essa abordagem elimina a necessidade de detalhar aspectos específicos da linguagem de programação empregada, concentrando-se na modelagem estrutural e comportamental. Por fim, os diagramas foram elaborados na fase inicial do projeto do sistema, visando orientar o processo de implementação. O código desenvolvido está disponível no repositório: Monitoramento de máquina.

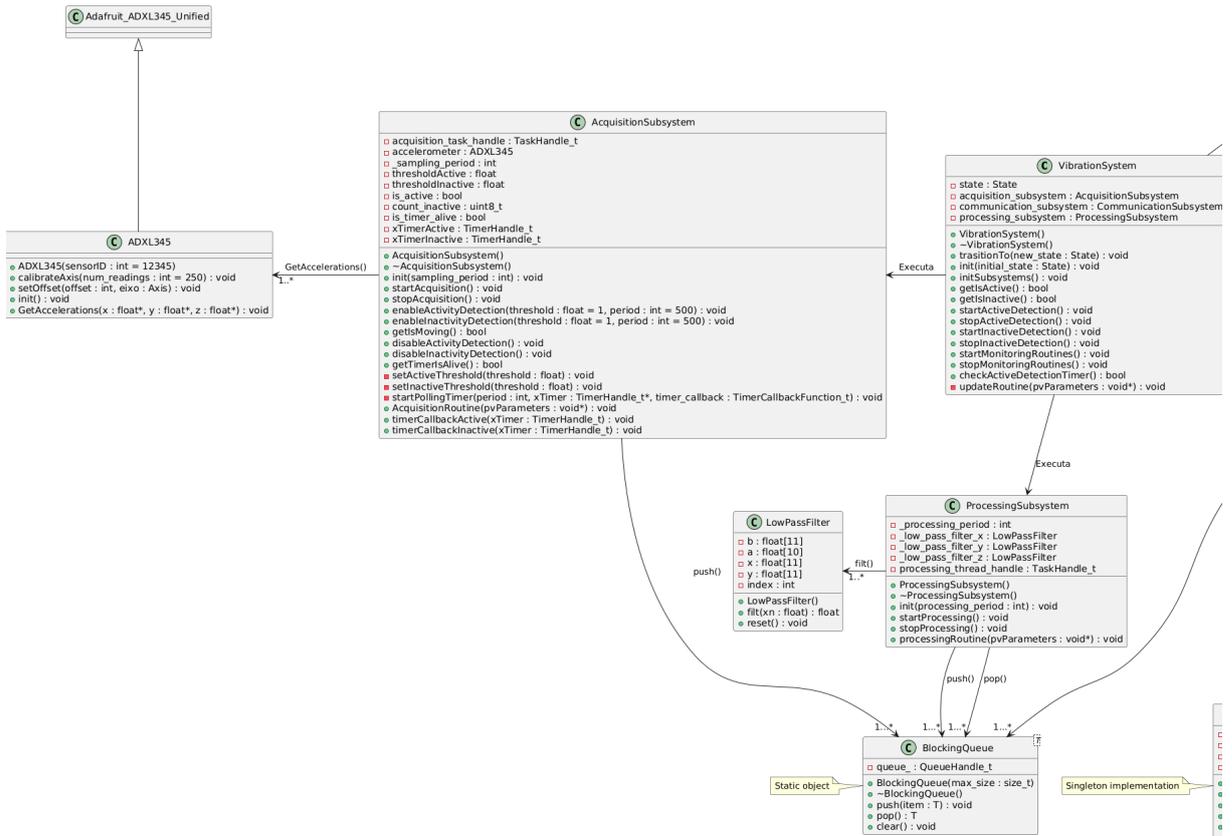
3.7.1 Diagramas

O software embarcado foi desenvolvido com base na orientação a objetos, organizando o código em quatro componentes principais: aquisição, processamento, envio de dados e máquina de estados. A Figura 25 ilustra as classes e os relacionamentos nos subsistemas de aquisição (*AcquisitionSubsystem*), com destaque para os drivers do acelerômetro, e de processamento (*ProcessingSubsystem*), que implementa o filtro passa-baixa previamente projetado.

A Figura 26 ilustra as classes e os relacionamentos associados ao subsistema de envio de dados, denominado *CommunicationSubsystem*, bem como a máquina de estados implementada pela interface *State*. Neste diagrama, identifica-se a dependência do protocolo de comunicação MQTT e da abstração do protocolo de nível inferior ethernet, ambos essenciais para o subsistema de envio de dados. Adicionalmente, observa-se a implementação de cada estado, os quais são responsáveis por definir o comportamento dinâmico do sistema

Os diagrama apresentados anteriormente ilustram as relações entre os subsistemas e o sistema principal, representado pela classe *Vibration_System*, cuja responsabilidade é integrar e coordenar todas as funcionalidades. Além disso, destaca-se a implementação da classe *BlockingQueue*, elemento central que facilita a interação entre os subsistemas ao estabelecer um canal de comunicação entre eles.

Figura 25 – Diagrama de classes para os subsistemas de aquisição e processamento.



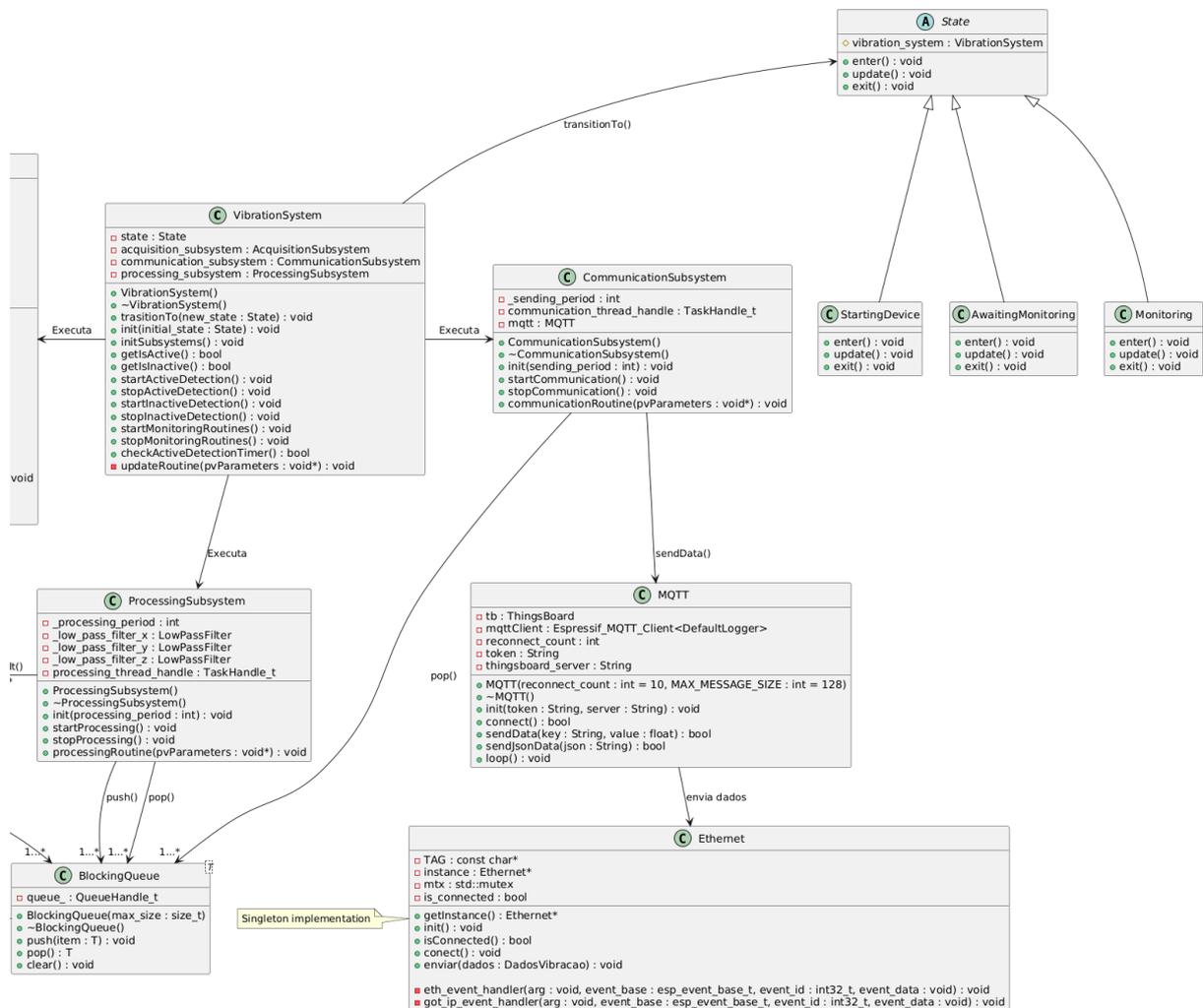
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As sub-rotinas de aquisição, processamento e comunicação possuem seu comportamento dinâmico representado no diagrama de sequência da Figura 27. Nesse diagrama, a execução paralela de cada sub-rotina e suas respectivas taxas de execução são demonstradas.

Observa-se também nesse diagrama a presença de filas bloqueantes, as quais são responsáveis pela sincronização entre as rotinas. Além disso, são exibidos os drivers do acelerômetro e do protocolo de envio MQTT, que tem a função de abstrair o funcionamento dos periféricos de hardware.

O comportamento dinâmico do sistema é delineado conforme o diagrama de estados ilustrado Figura 28, que descreve três estados: “Iniciando Dispositivo”, “Esperando monitoramento” e “Monitorando”. No estado “Iniciando Dispositivo”, ocorre a inicialização dos subsistemas e seu componentes. Em seguida, o sistema transita para estado “Aguardando Monitoramento”, no qual permanece em espera até detectar uma leitura de vibração superior a um limite predefinido. Ao identificar esse sinal de vibração, o sistema entra no estado “Monitorando”, ativando as sub-rotinas de aquisição, processamento e transmissão de dados. Durante o estado de monitoramento, o sistema verifica a condição de inatividade, caso essa condição seja atendida, retorna a “Aguardando Monitoramento”.

Figura 26 – Diagrama de classes para o subsistemas de envio de dados e a máquina de estados.



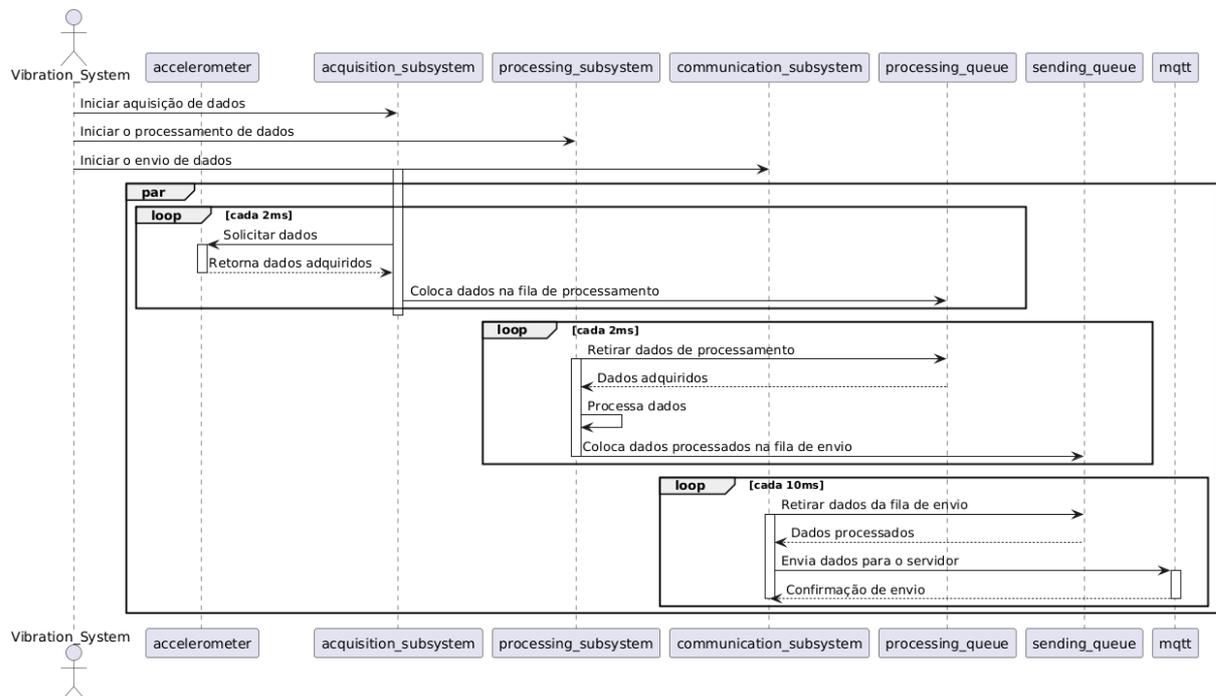
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.8 Fluxo de dados

Conforme os requisitos do projeto, o sistema deve possibilitar a aquisição dos dados e disponibilizar a visualização deles ao usuário. Adicionalmente, é esperado que o sistema consiga identificar problemas na máquina e notificar o usuário sobre essas ocorrências. Com base nessas diretrizes, foram selecionadas as ferramentas adequadas para atender a essas demandas específicas.

Com base nos requisitos **RFN3**, **RFN5** e **RFN6** foram definidos os protocolos necessários para a coleta e envio de dados no sistema. A transmissão dos dados do sensor para o microcontrolador ocorre por meio do protocolo I2C, que opera a uma velocidade de 100 kHz (Espressif, 2023). Para o envio dos dados do microcontrolador para o servidor, utiliza-se a conexão ethernet com o protocolo Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). A estrutura de aquisição de dados pelo sensor e seu subsequente envio ao servidor é representada esquematicamente na Figura 29, que

Figura 27 – Diagrama de sequência.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

serviu como base para o desenvolvimento do sistema durante a etapa de modelagem.

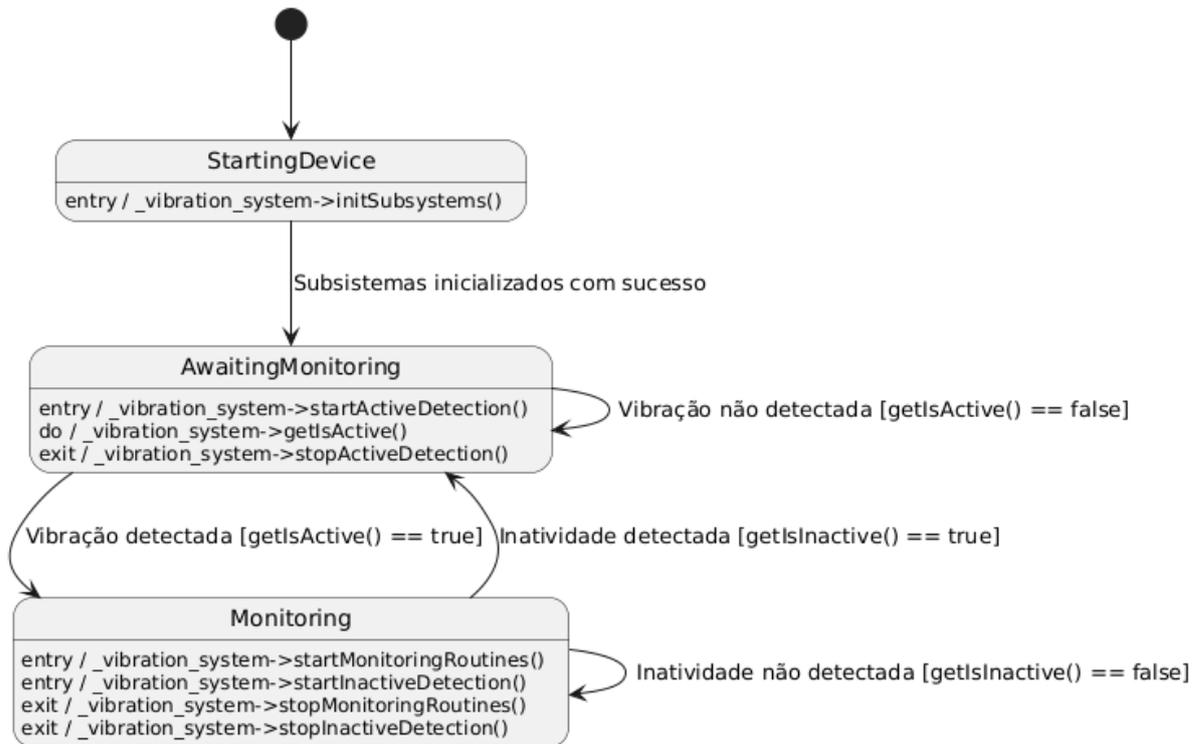
A plataforma IoT de código aberto ThingsBoard (THINGSBOARD, INC., 2023) foi configurada para funcionar como servidor. Essa plataforma integra, nativamente, um broker MQTT, responsável por receber e encaminhar mensagens publicadas nos tópicos. O servidor está implementado como um contêiner em um computador no laboratório de sistema embarcados (LSE), operando no sistema operacional Linux e conectado à rede Eduoram via ethernet.

Os dados recebidos pelo servidor através dos tópicos MQTT são armazenados em um banco de dados Apache Casandra (APACHE FOUNDATION, 2023), o qual também está instalado em um contêiner no computador do LSE. O servidor subscreve-se nos tópicos MQTT publicados pelo dispositivo de aquisição, permitindo que o Apache Cassandra armazene esses dados, assegurando sua persistência e disponibilizando-os para consultas posteriores.

A plataforma IoT ThingsBoard permite o processamento dos dados recebidos, incluindo transformação, aplicação de regras de negócio e geração de alertas por meio de sua ferramenta de cadeia de regras. Os pacotes de dados enviados pelo microcontrolador nos tópicos MQTT são segmentados nas amostras de aceleração coletadas. A partir desses dados, calcula-se a velocidade RMS, utilizada como parâmetro para geração de alertas.

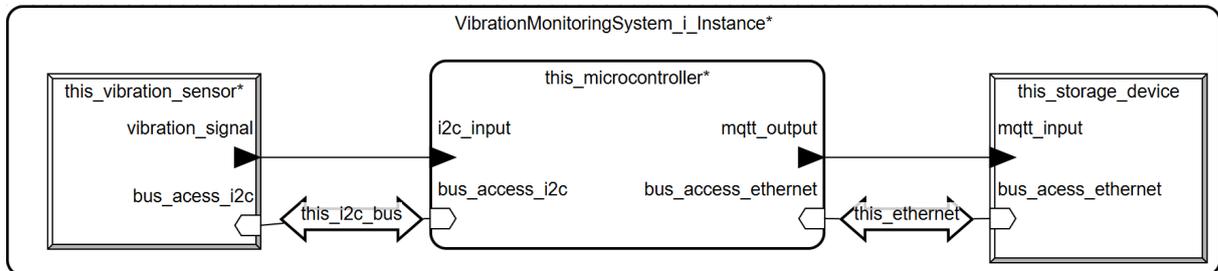
A arquitetura do servidor utilizada, representada na Figura 30, possui seis camadas principais. A primeira camada coleta os dados e os transmite via protocolos

Figura 28 – Diagrama de estados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 29 – Fluxo de saída e entrada de dados no microcontrolador.



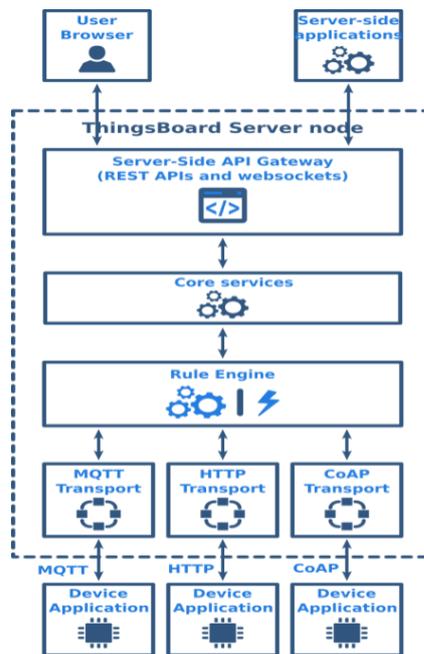
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

de transporte para processamento na cadeia de regras. A camada de serviços-base complementa o processamento e armazena os dados em um banco de dados. A camada final permite o consumo dos dados em tempo real ou histórico pelas aplicações e usuários (THINGSBOARD, INC., 2023).

3.9 CENÁRIOS

Para garantir a implementação do sistema de vibração conforme os objetivos estabelecidos, foram propostos três estudos de caso. Esses experimentos tiveram o objetivo de validar a coleta de dados e a capacidade de identificar sinais de falha no torno mecânico.

Figura 30 – Arquitetura do ThingsBoard.



Fonte: (THINGSBOARD, INC., 2023)

3.9.1 Estudo de caso 1

O primeiro estudo teve como objetivo validar a aquisição correta dos sinais de vibração pelo sistema, garantindo sua precisão e confiabilidade. Para isso, foi proposta a variação da velocidade do eixo da árvore do fuso sem carga (Figura 31), utilizando valores conhecidos de 460, 1255 e 2000 rpm.

Figura 31 – Torno mecânico operando sem carga.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para essa abordagem, foi verificado se o sistema apresenta a capacidade de detectar consistentemente as frequências correspondentes a essas velocidades, que são, respectivamente, 7,67 Hz, 20,92 Hz e 33,33 Hz. O objetivo desse teste, portanto,

foi avaliar a aptidão do sistema em realizar uma análise em frequências predominantes no sinal de aceleração coletado.

3.9.2 Estudo de caso 2

Em seguida, foi realizado um estudo de caso com objetivo de avaliar a eficácia do sistema em identificar o estado de bom funcionamento da máquina. O estudo utilizou os dados apresentados na Figura 11, que especifica os valores de referência necessários para a avaliação das condições da máquina.

Segundo a ISO (1995) o torno mecânico testado pertence à classe 1 de máquinas de pequeno porte, em razão de sua potência de 1,5 kW. Logo, com base na análise dos dados, verificou-se que a amplitude da forma de onda coletada nesse segundo estudo de caso não deveria exceder 1,8 mm/s para que o desempenho da máquina seja considerado satisfatório.

O estudo de caso foi realizado com o equipamento em condições normais de operação, ou seja, sem danos visíveis e com componentes devidamente ajustados. Para garantir a reprodutibilidade dos resultados, o torno mecânico foi acionado sem carga, isto é, sem a presença de uma peça de trabalho (Figura 31).

3.9.3 Estudo de caso 3

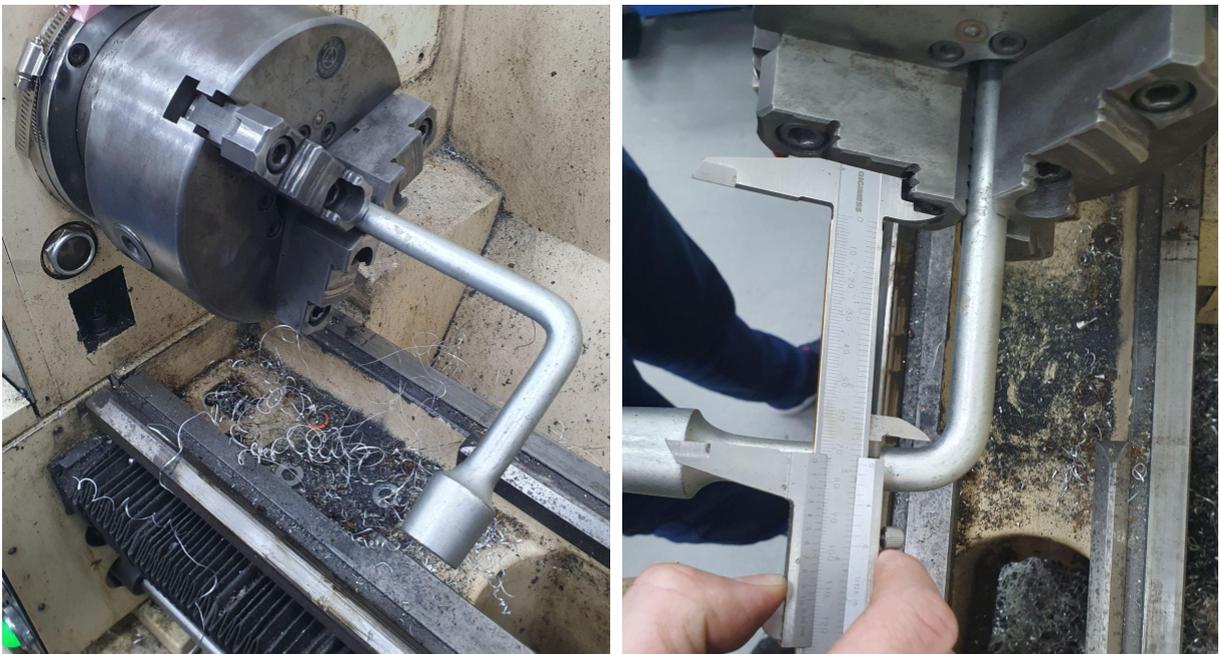
O último estudo de caso teve como objetivo determinar se o sistema conseguiria identificar uma condição de falha na máquina. Para isso, foi adotada a mesma abordagem do estudo de caso anterior, isto é, a comparação da forma de onda obtida com os dados apresentados na Figura 11.

Entretanto, nesse caso, foi introduzido um desbalanceamento no eixo árvore do torno mecânico em análise. Com a introdução do erro, a amplitude do sinal de vibração deveria ser superior a 7,1 mm/s.

O desbalanceamento introduzido foi realizado com uma chave de roda 18 fixada no cabeçote a uma distância de 75 mm, conforme ilustrado na Figura 32. Essa configuração visou assegurar a reprodutibilidade do experimento, uma vez que a opção por um processo de usinagem tornaria a repetição dos resultados significativamente mais complexa.

O segundo e o terceiro estudos de caso foram conduzidos com a máquina operando em baixa e alta velocidade, utilizando rotações de 460 rpm e 1255 rpm. Essa abordagem foi adotada para assegurar que o sistema consegue identificar as condições da máquina em diferentes cenários operacionais.

Figura 32 – Montagem da máquina com desbalanceamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos com a implementação do sistema proposto. Inicialmente são discutidos os aspectos de integração estrutural com a máquina, seguidos pela interface desenvolvida para visualização dos dados e geração de alertas, conforme uma política de manutenção preditiva.

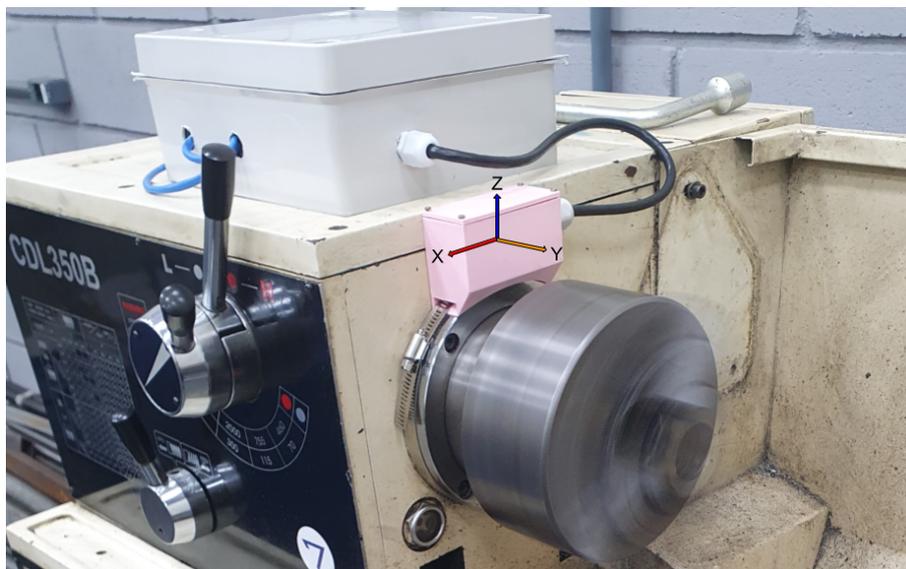
Em seguida, são apresentados os resultados de cada estudo de caso, acompanhados de suas respectivas análises. Então, procede-se à interpretação dos dados obtidos e a discussão sobre suas implicações no sistema em análise. Por fim, com base nos tópicos anteriores, são examinadas as limitações do projeto em relação ao cumprimento dos requisitos estabelecidos.

4.1 INTEGRAÇÃO ESTRUTURAL

Uma vez definidos os componentes necessários para a montagem do sistema, procedeu-se ao acoplamento deste no torno mecânico destinado ao monitoramento. Posteriormente, o sistema foi submetido a condições adversas simulando um ambiente industrial, visando avaliar a conformidade com os requisitos de robustez previamente estabelecidos.

A fixação adequada do dispositivo à máquina foi assegurada por meio de um acoplamento realizado com o encapsulamento desenvolvido utilizando uma braçadeira metálica. Na Figura 33, são apresentados tanto o acoplamento do sensor na máquina quanto os eixos de medição das acelerações.

Figura 33 – Acoplamento do sensor na máquina.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após a adequada fixação do sensor, o sistema deve assegurar a proteção dos componentes mesmo em ambientes indústrias adversos. Conforme ilustrado na Figura 34, o sistema mantém seu funcionamento mesmo quando exposto a condições hostis, caracterizadas pela presença de respingos de óleo e partículas metálicas.

Figura 34 – Dispositivo de medição funcionando em ambiente industrial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após a instalação adequada do dispositivo no ambiente de coleta, deu-se continuidade ao processo de aquisição e visualização dos dados de vibração. Para viabilizar a análise, implementou-se uma integração que permitiu a avaliação dos dados coletados.

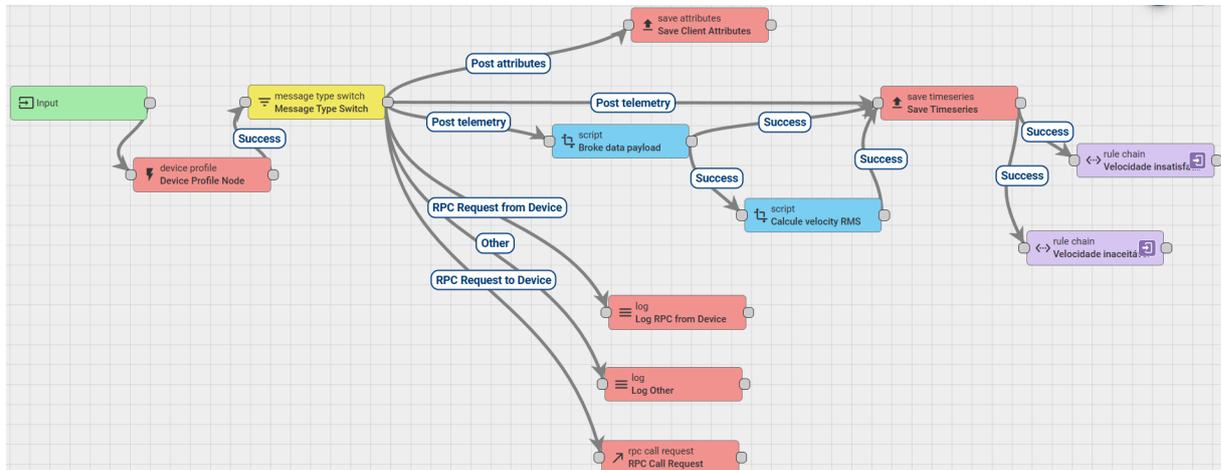
4.2 INTERFACE DE VISUALIZAÇÃO DE DADOS E ALERTAS

Conforme discutido previamente, a plataforma Thingsboard foi utilizada como ferramenta para atender aos requisitos do projeto. Inicialmente, os dados foram submetidos a um processo de tratamento e preparação, seguido pelo desenvolvimento de uma interface voltada a sua visualização.

A Figura 35 mostra a cadeia de regras empregada na plataforma para processar os dados conforme os requisitos do projeto. Nessa configuração, os blocos “Broke data payload”, “RMS velocity” e “Check Velocity” foram incorporados à cadeia

de regras visando segmentar os dados, calcular a velocidade RMS e gerar alertas a partir das velocidades obtidas, respectivamente.

Figura 35 – Cadeia de regras do servidor.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A interface destinada à visualização dos dados foi implementada na conforme ilustrado na Figura 36. Essa interface oferece acesso em tempo real aos valores de aceleração nos três eixos, da velocidade RMS e aos alertas acionados, permitindo uma análise contínua e dinâmica dos dados capturados. Além disso, a interface possibilita a consulta ao histórico de dados, oferecendo ao usuário a flexibilidade de analisar tendência e variações ao longo do tempo.

Figura 36 – Interface de visualização dos dados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A análise externa dos dados foi realizada mediante uma requisição ao banco de dados, localizado no endereço do servidor. O script empregado para efetuar a requisição encontra-se disponível no apêndice D.

Após a adequada definição dos componentes físicos, bem como dos sistemas de visualização e processamentos dos dados, procedeu-se ao desenvolvimento dos estudos de caso propostos.

4.3 ESTUDO DE CASO 1

Para o presente estudo de caso, cujo objetivo foi a detecção das frequências naturais do equipamento em diferentes velocidades — 460 rpm, 1255 rpm e 2000 rpm —, as análises foram realizadas no domínio do tempo e da frequência. Inicialmente, uma análise geral foi conduzida no domínio do tempo, visando garantir a consistência dos dados coletados. Em seguida, uma análise mais detalhada no domínio da frequência teve o intuito de extrair características mais específicas de cada sinal.

A Figura 37 apresenta os resultados obtidos no domínio do tempo para os sinais de cada eixo, considerando as velocidades propostas. Observar-se uma diferença nítida na amplitude associada às velocidades testadas, indicando variações conforme a velocidade aplicada em cada eixo.

A análise no domínio da frequência foi realizada aplicando a FFT sobre os sinais coletados. A Figura 38 apresenta um exemplo da FFT aplicada ao sinal de vibração no eixo x, enquanto o eixo-árvore do torno opera a uma velocidade de 1255 rpm. Observa-se no espectro de frequência, que não é identificável um pico na amplitude que corresponda à frequência associada a uma velocidade de 1255 rpm.

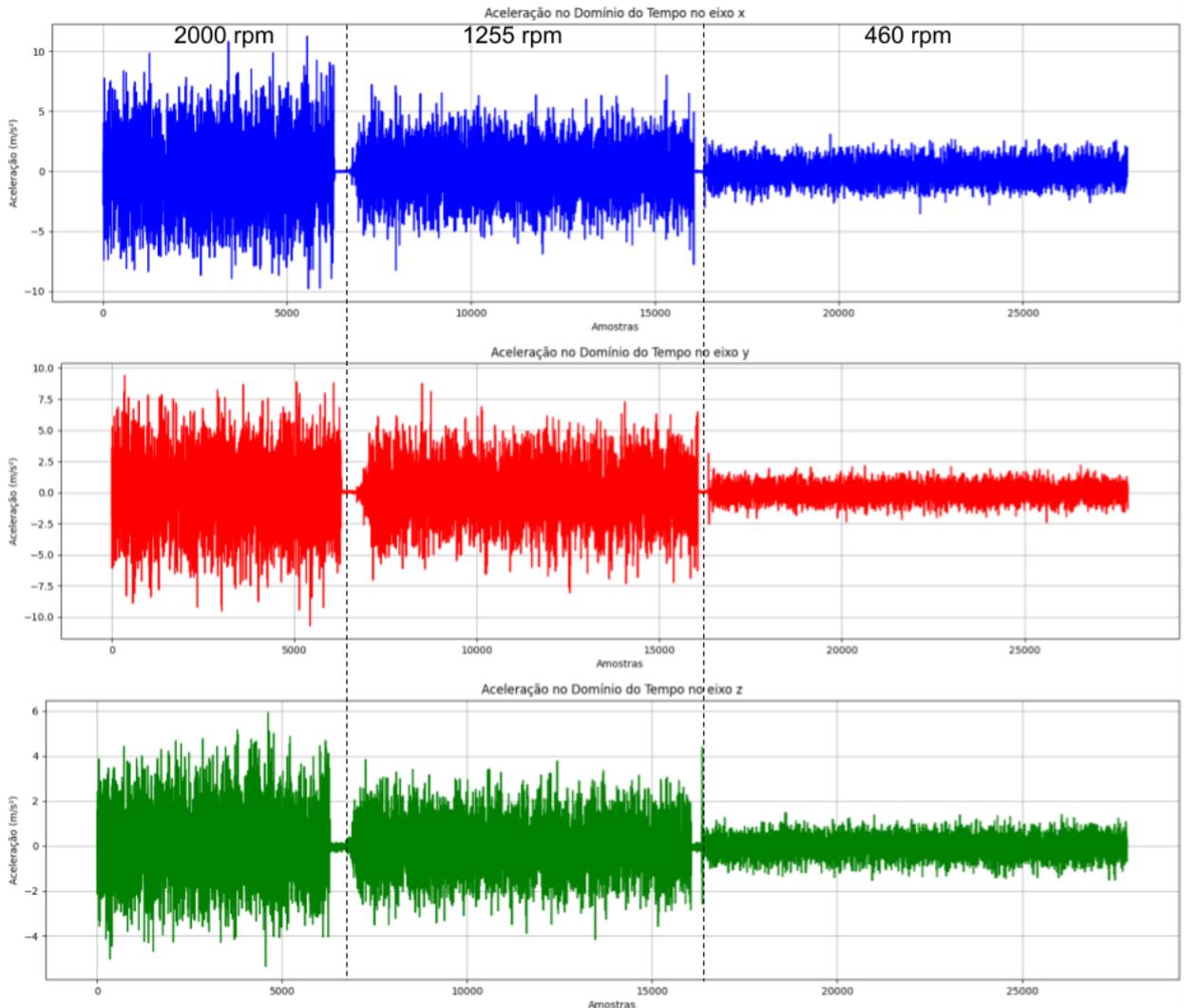
O quadro 1 mostra uma análise da frequência mais predominante para cada eixo para as velocidades testadas. Entretanto, as frequências naturais do sistema, esperadas em 7,67 Hz, 20,92 Hz e 33,33 Hz, correspondendo respectivamente às velocidades de 460, 1255 e 2000 rpm, não puderam ser claramente identificadas a partir dos dados obtidos.

Tabela 1 – Frequências com amplitudes predominantes para os eixos X, Y e Z

	x	y	z
460 rpm	9,35 Hz	24,50 Hz	13,94 Hz
1255 rpm	20,50 Hz	63,50 Hz	37,50 Hz
2000 rpm	52,50 Hz	53,50 Hz	15,00 Hz

Dado que a análise espectral apresentou resultados insatisfatórios, procedeu-se à análise da velocidade para identificar características úteis nos sinais. Considerando que o efeito gravitacional poderia interferir nessa análise, a componente Z da aceleração foi desconsiderada.

Figura 37 – Curvas de aceleração no domínio do tempo para os três eixos no estudo de caso 1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

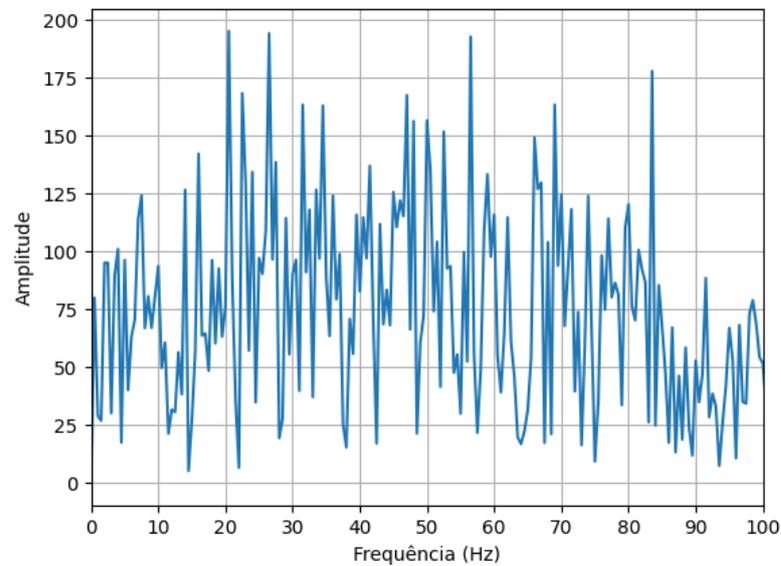
A Figura 39 apresenta a comparação das velocidades RMS para cada rotação testada no torno. Observa-se que a velocidade RMS possibilita uma diferenciação eficaz entre as rotações do equipamento.

4.4 ESTUDO DE CASO 2

Nesse estudo de caso, o objetivo é avaliar a capacidade do sistema de identificar o estado saudável da máquina com base nos dados da Figura 11. Especificamente, para uma máquina de classe 1, como o torno mecânico em análise, o valor da velocidade RMS deve estar abaixo de 1,8 mm/s (ISO, 1995).

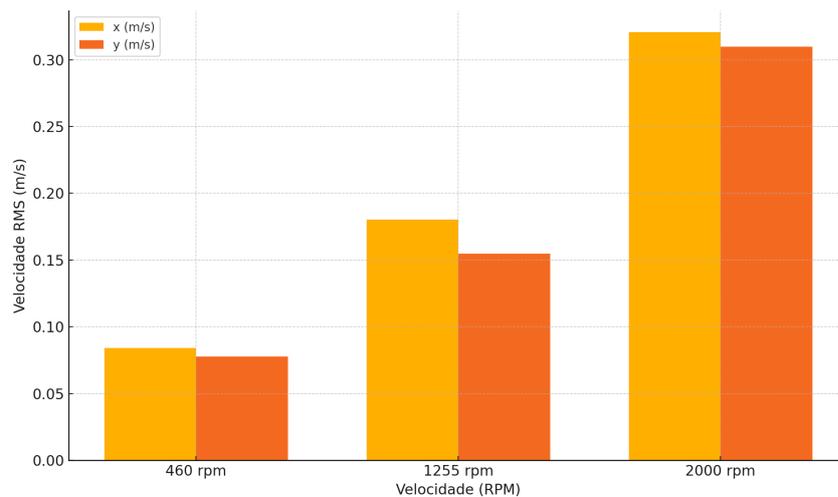
A Figura 40 apresenta os valores das velocidades RMS dos eixos X e Y para o torno operando em condições de baixa e alta rotação, correspondendo a 460 e 1255 rpm, respectivamente. Conforme discutido anteriormente, o eixo Z foi excluído da

Figura 38 – Espectro de frequência no eixo x para o torno funcionando com 1255 rpm



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 39 – Comparação das velocidades RMS dos eixos X e Y.

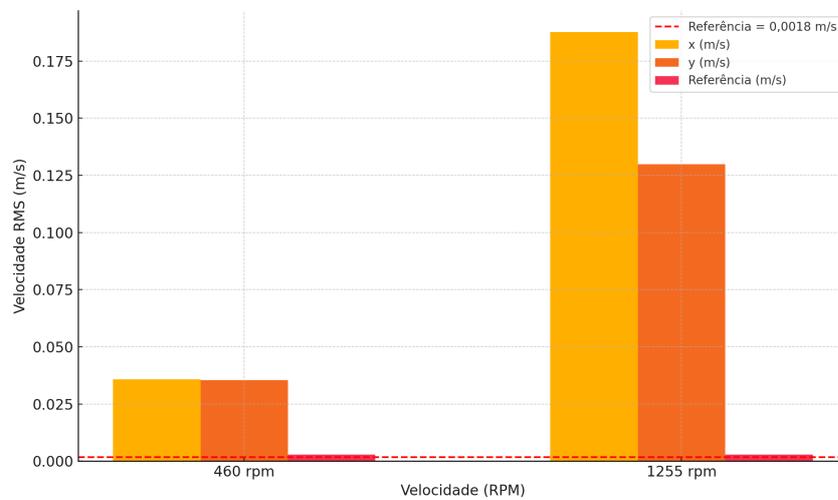


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

análise por conta do efeito gravitacional.

Os resultados obtidos indicam que as expectativas não foram atendidas, visto que os valores calculados excederam os limites recomendados pela norma. Consequentemente, observa-se a presença de inconsistências nas leituras dos sinais de vibração, indicando potenciais desvios metodológicos ou condições operacionais adversas.

Figura 40 – Comparação da velocidade RMS nos eixos X e Y com o valor de referência para a máquina saudável



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.5 ESTUDO DE CASO 3

Este estudo de caso é similar ao anterior, diferenciando-se pelo objetivo de avaliar a capacidade do sistema em identificar o estado de não conformidade da máquina. Para isso, foram aplicadas as mesmas normativas do estudo anterior, porém o valor RMS da máquina devia estar abaixo de 7,1 mm/s (ISO, 1995).

A Figura 41 apresenta os valores das velocidades RMS dos eixos X e Y para o torno operando sob condições de baixa e alta rotação. De maneira similar aos experimentos anteriores, o eixo Z foi excluído da análise devido à sua menor relevância neste contexto.

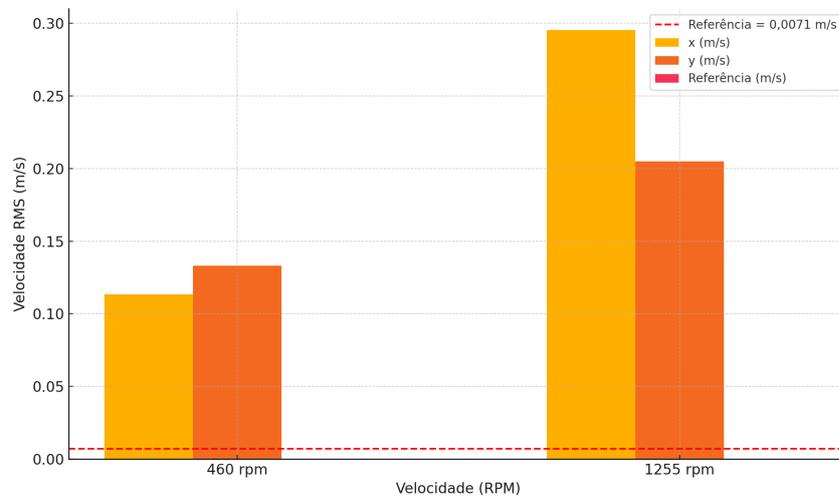
Observa-se que para este cenário, os resultados obtidos excederam os valores recomendados pela norma. Consequentemente, similarmente ao estudo de caso anterior, os sinais coletados demonstraram inconsistências.

Apesar de os valores dos estudos de caso 2 e 3 não estarem conforme a norma proposta, a comparação entre eles permite identificar cenários de falha. A Figura 42 ilustra a comparação dos valores obtidos em ambos os estudos de caso mencionados, evidenciando ser possível estabelecer limites para definir os estados de “saudável” e “não saudável” da máquina.

4.6 DISCUSSÕES

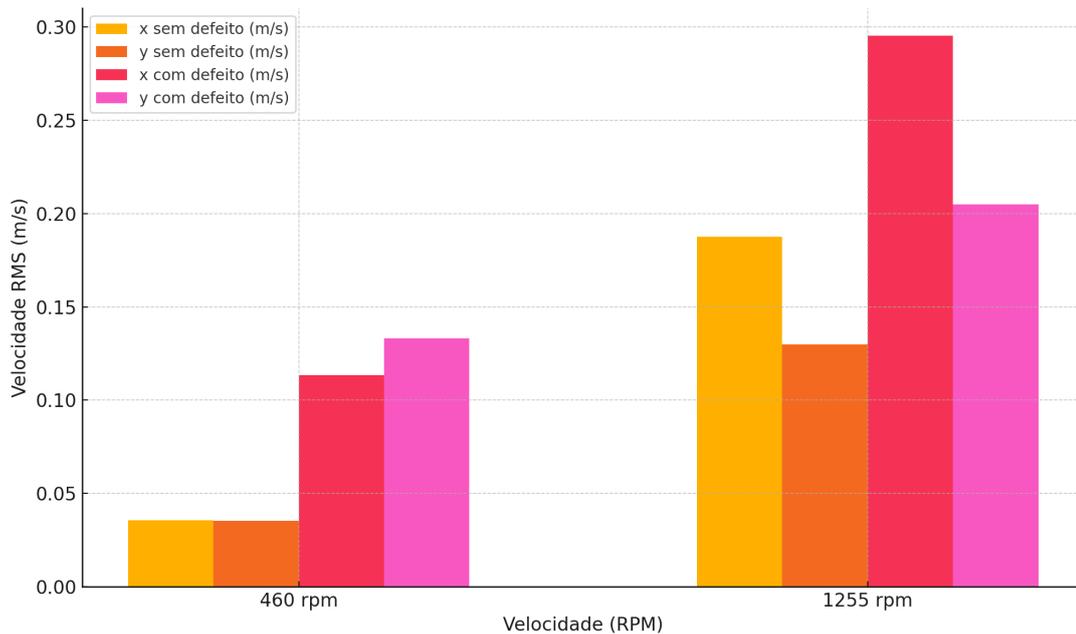
Os resultados obtidos nos estudos de caso propostos permitiram formular conclusões acerca do comportamento do sistema em diferentes cenários. Em síntese, as conclusões indicam a limitação do sistema em realizar uma análise mais aprofundada da máquina no domínio da frequência, além de apontarem incongruências na com-

Figura 41 – Comparação da velocidade RMS nos eixos X e Y com o valor de referência para a máquina não saudável



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 42 – Comparação da velocidade RMS nos eixos X e Y com o valor de referência para a máquina não saudável e saudável



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

paração dos valores de velocidade RMS com os critérios estabelecidos pela norma ISO10816-1:1995.

Considerando o estudo de caso 1, verificou-se que o sistema não conseguiu identificar precisamente as frequências naturais associadas às diferentes rotações da máquina, logo uma análise estrutural mais aprofundada não seria viável nesse contexto. A FFT dos dados avaliados não apresentou características úteis, exibindo picos

em frequências variadas e sem correlação direta com os parâmetros esperados de operação.

Analisando as informações fornecidas pela fabricante em maior profundidade, conclui-se que o sensor apresenta alto nível de ruído para taxas de coleta superiores a 100 Hz. Como o sistema desenvolvido exige uma taxa de aquisição de dados de 500 Hz, é provável que o ruído decorrente dessa elevada taxa de amostragem introduza componentes harmônicas indesejadas, dificultando a análise dos sinais no domínio da frequência.

Os estudos de caso 2 e 3 indicaram valores significativamente superiores aos parâmetros de referência estabelecidos para avaliar o estado de saúde máquina. A análise minuciosa da norma ISO 10816-1:1995 confirma que todas as diretrizes pertinentes estão sendo seguidas, sugerindo que a provável origem das discrepâncias nos dados obtidos reside em interferências de ruído captadas pelo sensor.

Embora os estudos de caso anteriores não tenham gerado resultados satisfatórios, a análise do comportamento dinâmico da máquina foi viabilizada por meio do cálculo da velocidade RMS dos sinais de aceleração. Este parâmetro revelou-se eficiente tanto na identificação das diferentes rotações da máquina quanto na avaliação do estado de integridade do equipamento.

Logo, o sistema com o sensor proposto permite a identificação de condições de falha na máquina, conforme estabelecido pelo requisito **RF11**. Com base nessa configuração, os alarmes na interface de monitoramento foram atualizados, incorporando os limites de velocidades RMS específicos para condições de falha, conforme identificado no estudo de caso 3. Dessa forma, o sistema emite notificações de falha de maneira automatizada, alertando o usuário em caso de detecção de anomalias no funcionamento da máquina.

4.7 LIMITAÇÕES

As limitações técnicas identificadas na fase de implementação do projeto serão abordadas nesta seção. Serão discutidos, também, os impactos dessas limitações no cumprimento dos requisitos e objetivos do projeto.

Após análise dos resultados, conclui-se que o requisito **RF10** não pode ser atendido completamente devido à qualidade insatisfatória da aquisição dos dados do sensor. Observou-se que o sensor introduz ruído na faixa de frequência de interesse, inviabilizando a extração precisa de padrões de aceleração tanto no domínio do tempo quanto da frequência, essenciais para a identificação de condições anômalas de operação da máquina.

A baixa qualidade na aquisição dos sinais representou uma limitação significativa no processo de coleta de dados, demandando a adoção de estratégias diferentes de filtragem. Entre os métodos aplicáveis, os filtros passa-banda se destacam por sua

capacidade de eliminar componentes de baixa frequência que não possuem relevância para a análise em foco (Lathi, 2008). Além disso, outras técnicas, como o filtro de Kalman, podem ser empregadas para a supressão de ruídos e para a estimativa de alterações dinâmicas no comportamento do sistema (Oppenheim *et al.*, 2010).

Outra limitação relacionada à aquisição dos sinais refere-se à análise restrita no domínio do tempo, que se limitou à utilização do valor RMS da velocidade. Métodos complementares, como o fator de crista, a curtose e a assimetria, poderiam ser aplicados para ampliar a análise dos sinais, permitindo a extração de informações adicionais e potencialmente mais úteis (Girdhar, 2004).

Em relação aos cenários desenvolvidos, uma limitação refere-se à ausência de testes realizados em condições mais diversas do equipamento. Ademais, outros tipos de anomalias além do desbalanceamento deveriam ser exploradas para ampliar a abrangência das análises. Recomenda-se, ainda, a coleta de sinais de vibração durante a etapa de usinagem, como o objetivo de identificar problemas estruturais no equipamento que possam surgir especificamente durante essa operação.

A restrição relacionada aos alarmes utilizados para notificar o usuário reside no fato de que esses dispositivos foram configurados para responder a condições específicas de operação de uma máquina. Essa abordagem, no entanto, apresenta limitações significativas, pois os alarmes não são suficientemente adaptáveis para atender a diferentes cenários operacionais do equipamento. Tal inflexibilidade compromete a eficiência do monitoramento, especialmente em contextos onde variáveis ambientais ou operacionais sofrem alterações frequentes.

Por fim, uma limitação adicional refere-se ao requisito **RF7**, dado que o sistema carece de um estado específico para tratamento de erros no software embarcado, comprometendo a gestão de falhas em seus componentes. Assim, sempre que os testes de sanidade identificam um erro, o sistema executa uma reinicialização automática sem notificar o usuário sobre a ocorrência do problema.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema IIoT para monitoramento autônomo da vibração em máquinas com ferramentas rotativas. Esse sistema é essencial para o acompanhamento contínuo da integridade estrutural de equipamentos industriais, possibilitando a implementação de estratégias de manutenção preditiva. Com isso, evita-se que desgastes de componentes críticos nos ativos evoluam para danos de maior gravidade, melhore a longevidade e eficiência dos equipamentos. Além disso, o monitoramento em tempo real de parâmetros operacionais constitui um dos pilares para a aplicação dos conceitos da indústria 4.0, promovendo um ambiente fabril mais inteligente e conectado.

O sistema de monitoramento de vibração foi desenvolvido utilizando um sensor acelerômetro MEMS de baixo custo integrado a um microcontrolador com alimentação e comunicação de dados via ethernet. Essa configuração permite uma instalação simplificada, eliminando a necessidade de fontes de alimentação externas e oferecendo capacidade para transferências de dados em alta velocidade.

O sistema desenvolvido integra um monitoramento não invasivo, possui robustez estrutural adequada para aplicações em ambientes industriais e fixação direta na máquina, eliminando a necessidade de adesivos ou colas que poderiam atenuar as vibrações de interesse. Além disso, o software embarcado foi programado para automatizar coletas apenas durante o funcionamento do equipamento e realizar um pré-processamento dos dados antes de transmiti-los ao servidor.

Implementou-se, adicionalmente, a integração com uma ferramenta que fornece interface e armazenamento para os dados coletados. Configuraram-se também automações nessa plataforma, que emitem alertas ao usuário em caso de detecção de condições anômalas no equipamento.

Foram propostos três cenários para validar o produto em relação aos objetivos estabelecidos. Nos estudos de caso, observou-se a presença de ruído na faixa do sinal de interesse, o que inviabilizou uma análise direta dos padrões de vibração. No entanto, a diferenciação entre os estados operacionais da máquina e as condições de falha foi possível por meio do cálculo da velocidade RMS.

Para trabalhos futuros, recomenda-se, primeiramente, abordar as limitações técnicas identificadas na fase de implementação do projeto. Entre as restrições mais relevantes que requerem aprimoramento, destaca-se a necessidade de um sensor de vibração com capacidade de capturar uma faixa de sinal mais ampla, idealmente até 1000 Hz, com baixo nível de ruído. Além disso, é essencial conduzir testes do dispositivo em cenários diversos e sob diferentes condições operacionais, de modo a assegurar a confiabilidade do sistema em ambientes reais.

Em um estágio posterior, uma vez resolvidas as limitações iniciais, podem ser aplicadas técnicas avançadas de processamento dos sinais para identificação de características relevantes, tais como algoritmos de aprendizado de máquina. Além disso, a integração com múltiplos sensores permitiria gerar uma análise mais robusta da máquina.

REFERÊNCIAS

- ADEYERI, M. K.; MPOFU, K.; KAREEM, B. Development of hardware system using temperature and vibration maintenance models integration concepts for conventional machines monitoring: a case study. **Journal of Industrial Engineering International**, v. 12, p. 93–109, 2016. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:52268060>.
- AL-NAGGAR, Y. M. *et al.* Condition monitoring based on iot for predictive maintenance of cnc machines. **Procedia CIRP**, v. 102, p. 314–318, 2021.
- Analog Devices. **Data Sheet ADXL345**. 2022. Acessado: 2024-09-08. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL345.pdf>.
- APACHE FOUNDATION. **Apache Cassandra: A Highly Scalable Database**. 2023. Acessado: 02-11-2024. Disponível em: https://cassandra.apache.org/_/index.html.
- BAUDIN, M.; NETLAND, T. **Introduction to manufacturing**. New York: Routledge, 2023.
- CHU, T. *et al.* A review of vibration analysis and its applications. **Heliyon**, v. 10, p. 13, 2024.
- COSTA, S. *et al.* Guidelines for machine tool sensing and smart manufacturing integration. **Procedia Manufacturing**, v. 51, p. 251–257, 2020.
- DOGRUSOZ, H. *et al.* Vibration monitoring of cnc machinery using mems sensors. **Journal of Vibroengineering**, v. 22, p. 735–750, 2020.
- D’ALESSANDRO, A.; SCUDERO, S.; VITALE, G. A review of the capacitive mems for seismology. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 19, 2019. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:198193575>.
- ESPRESSIF. **ESP32 Series Datasheet**. [S.l.], 2023. Disponível em: https://www.espressif.com/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
- ESPRESSIF. **ESP32-WROOM-32**. 2024. Acessado: 2024-09-28. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/producttype/esp32-wroom-32>.
- FONTENELE, J. Sistema iot industrial para monitoramento de vibrações de máquinas rotativas. **Revista Científica Semana Acadêmica**, v. 9, p. 7134–7155, 2021.
- GIRDHAR, P. **Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance**. Burlington: ELSEVIER, 2004.
- GNU Octave. **GNU Octave**. [S.l.], 2024. Acessado: 04-11-2024. Disponível em: <https://octave.org/>.
- GROOVER, M. P. **Introdução aos processo de fabricação**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

- HASSAN, I. U.; PANDURU, K.; WALSH, J. An in-depth study of vibration sensors for condition monitoring. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 24, p. 33, 2024.
- HENNING, K. Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0. *In: .* [s.n.], 2013. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:117540617>.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10816-1**. Geneva, CH, 1995.
- JOSHI, P.; JOSHI, P. B. **Machine Tools Handbook: Design and Operation**. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2007.
- LATHI, B. P. **Sinais e Sistemas Lineares**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008. Tradução da obra original *Linear Systems and Signals, Second Edition*. ISBN 978-85-7780-391-0.
- LILYGO. **T-Internet-POE by LilyGO**. 2024. Acessado: 03-11-2024. Disponível em: <https://www.lilygo.cc/products/t-internet-poe>.
- MARQUES, A. C. G.; BRITO, J. N. Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, p. 8913–8923, 2019.
- MATSUSHITA, O. *et al.* Vibrations of rotating machinery. **Mathematics for Industry**, v. 2, p. 582, 2019.
- OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S.; NAWAB, S. H. **Sinais e Sistemas**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. Revisão técnica de Marcio Eisencraft e Maria D. Miranda. ISBN 978-85-4301-380-0.
- RODRIGUES, A. L. V. *et al.* Estudo de viabilidade para implementação de manutenção preditiva no contexto da indústria 4.0. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n. 8, p. 23133–23154, 2023.
- ROMANSSINI, M. *et al.* A review on vibration monitoring techniques for predictive maintenance of rotating machinery. **Eng**, v. 4, p. 1797–1817, 2023.
- SANTOS, B. P. *et al.* Indústria 4.0: Desafios e oportunidades. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 4, p. 111–124, 2018.
- SILVA, D. O. *et al.* Manutenção preditiva - análise de vibrações na indústria 4.0. **Revista Foco**, v. 16, n. 11, p. 01–29, 2023.
- Software Engineering Institute. **Architecture Analysis and Design Language (AADL)**. 2004. Acessado: 2024-09-27. Disponível em: https://www.sei.cmu.edu/our-work/projects/display.cfm?customel_datapageid_4050=191439,191439.
- SOMMERVILLE, I. **Software Engineering**. London, Id: PEARSON, 2014.
- TEIXEIRA, H.; LOPES, I.; BRAGA, A. C. Condition-based maintenance implementation: a literature review. **Procedia Manufacturing**, v. 51, p. 228–235, 2020.
- THINGSBOARD, INC. **ThingsBoard: Open-source IoT Platform**. 2023. Acessado: 02-11-2024. Disponível em: <https://thingsboard.io/>.

VARANIS, M. *et al.* Mems accelerometers for mechanical vibrations analysis: a comprehensive review with applications. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 40, p. 1–18, 2018.

ZANOTTI, A. J. **Desenvolvimento de um sistema de monitoramento de máquinas elétricas conectada para internet das coisas industriais**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) — Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2023.

ZHANG, X. *et al.* A multi-sensor based online tool condition monitoring system for milling process. **Procedia CIRP**, v. 72, p. 1136–1141, 2018. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:115359082>.

APÊNDICE A – FILTRO NO OCTAVE

```
1 % Parametros do filtro
2 n = 10;                % Ordem do filtro
3 fc = 100;              % Frequencia de corte (Hz)
4 fs = 500;              % Taxa de amostragem (Hz)
5 Wn = fc / (fs / 2);    % Frequencia normalizada
6
7 % Calcula os coeficientes do filtro Butterworth
8 [b, a] = butter(n, Wn);
9
10 % Exibe os coeficientes
11 disp('Coeficientes de feedforward (b):');
12 disp(b);
13
14 disp('Coeficientes de feedback (a):');
15 disp(a);
16
17 % Plota a resposta em frequencia
18 freqz(b, a, 1024, fs);
19 title('Resposta em frequencia do filtro Butterworth de 10 ordem');
```

APÊNDICE B – TRATAMENTO DOS DADOS EM PYTHON

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib
3 matplotlib.use('Agg')
4 import matplotlib.pyplot as plt
5
6 def read_data_from_txt(file_path):
7     data = []
8     with open(file_path, 'r') as file:
9         for line in file:
10             if line.strip(): # Ignorar linhas vazias
11                 try:
12                     parts = line.strip().split(',')
13                     timestamp_str = parts[0].split(':')[1]
14                     values_str = parts[1].split(':')[1]
15                     timestamp = float(timestamp_str.split(':')[0])
16                     values = [float(val) for val in values_str.
17                               strip('[]').split(',')]
18                     for i, value in enumerate(values):
19                         data.append({"timestamp": timestamp + i *
20                                     0.002, "acceleration": value})
21                 except (IndexError, ValueError) as e:
22                     print(f"Erro ao processar a linha: {line.strip()}
23                           \nErro: {e}")
24
25     return data
26
27 data = read_data_from_txt('Dados_experimento_3/460_rpm/y/
28     acceleration.txt')
29
30 timestamps = np.array([point["timestamp"] for point in data])
31 acceleration = np.array([point["acceleration"] for point in data])
32 acceleration -= np.mean(acceleration)
33 sampling_interval = 0.002 # 2ms (500Hz)
34 # Plotar o grafico no dominio do tempo (sem levar em conta os
35     timestamps)
36 plt.figure(figsize=(14, 8)) # Aumentar o tamanho da figura
37 time_title = 'Aceleracao no Dominio do Tempo'
38 plt.plot(acceleration)
39 plt.title(time_title)
40 plt.xlabel('Amostras')
```

```

34 plt.ylabel('Aceleracao (m/s^2)')
35 plt.grid()
36 plt.savefig('grafico_tempo_aceleracao.png') # Salva o grafico em
    um arquivo
37 # Calcular a velocidade a partir da aceleracao (integracao numerica
    )
38 velocity = np.cumsum(acceleration) * sampling_interval
39 # Calcular a velocidade RMS
40 velocity_rms = np.sqrt(np.mean(velocity**2))
41 print(f"Velocidade RMS: {velocity_rms:.4f} m/s")
42 # Plotar o grafico da velocidade no dominio do tempo
43 plt.figure(figsize=(14, 8))
44 plt.plot(velocity, label='Velocidade')
45 plt.axhline(y=velocity_rms, color='r', linestyle='--', label=f"
    Velocidade RMS = {velocity_rms:.4f} m/s")
46 plt.text(len(velocity) * 0.1, velocity_rms + 0.01, f"{velocity_rms
    :.4f} m/s", color='r', va='center', ha='right')
47 plt.title('Velocidade no Dominio do Tempo e Velocidade RMS')
48 plt.xlabel('Amostras')
49 plt.ylabel('Velocidade (m/s)')
50 plt.grid()
51 plt.savefig('grafico_velocidade_com_rms.png')
52 # Realizar a FFT
53 n = len(acceleration)
54 fft_values = np.fft.fft(acceleration)
55 frequencies = np.fft.fftfreq(n, d=sampling_interval)
56 positive_frequencies = frequencies[:n // 2]
57 positive_fft_values = np.abs(fft_values[:n // 2])
58 # Plotar o espectro de frequencias
59 plt.figure(figsize=(14, 8))
60 plt.plot(positive_frequencies, positive_fft_values)
61 plt.title('Espectro de Frequencia da Aceleracao')
62 plt.xlabel('Frequencia (Hz)')
63 plt.ylabel('Amplitude')
64 plt.xticks(np.arange(0, max(positive_frequencies), 10))
65 plt.grid()
66 plt.savefig('espectro_frequencia_aceleracao.png')
67
68 target_frequency = 33.33
69 tolerance = 0.1
70 index = np.where((positive_frequencies >= target_frequency -
    tolerance) & (positive_frequencies <= target_frequency +

```

```
tolerance))[0]
71 if index.size > 0:
72     amplitude_at_target = positive_fft_values[index[0]]
73     print(f"A componente em {target_frequency} Hz tem amplitude {
        amplitude_at_target:.2f}")
74 else:
75     print(f"Nenhuma componente significativa encontrada em {
        target_frequency} Hz")
76 max_index = np.argmax(positive_fft_values)
77 max_frequency = positive_frequencies[max_index]
78 max_amplitude = positive_fft_values[max_index]
79 print(f"A frequencia com amplitude maxima eh {max_frequency:.2f} Hz
        com amplitude {max_amplitude:.2f}")
```

APÊNDICE C – ANÁLISE DA ARQUITETURA EM AADL

```

1 package VibrationMonitoringSys
2 public
3     with hw;
4     system VibrationMonitoringSystem
5         features
6             power: in feature hw::Electricity;
7     end VibrationMonitoringSystem;
8     system implementation VibrationMonitoringSystem.i
9         subcomponents
10            this_vibration_sensor: device hw::VibrationSensor;
11            this_microcontroller: system hw::Microcontroller.i;
12            this_storage_device: device hw::StorageDevice;
13            this_i2c_bus: bus hw::I2CBus.i;
14            this_ethernet: bus hw::Ethernet.i;
15            this_poe: system hw::PowerSupplierPOE;
16        connections
17            sensor_to_mcu: port this_vibration_sensor.
18                vibration_signal
19                    -> this_microcontroller.i2c_input;
20            mcu_to_storage: port this_microcontroller.mqtt_output
21                -> this_storage_device.mqtt_input;
22            bus_vibration_sensor: bus access this_i2c_bus
23                -> this_vibration_sensor.
24                    bus_access_i2c;
25            bus_mcu_i2c: bus access this_i2c_bus
26                -> this_microcontroller.
27                    bus_access_i2c;
28            bus_mcu_ethernet: bus access this_ethernet
29                -> this_microcontroller.
30                    bus_access_ethernet;
31            bus_storage_device: bus access this_ethernet
32                -> this_storage_device.
33                    bus_access_ethernet;
34
35            sensor_power_conn: feature this_poe.supplier ->
36                this_vibration_sensor.power;
37            mcu_power_conn: feature this_poe.supplier ->
38                this_microcontroller.power;

```

```

32     end VibrationMonitoringSystem.i;
33 end VibrationMonitoringSys;
34
35 package hw
36 public
37     with sw;
38     WITH sei;
39     system Microcontroller
40         features
41             power: in feature Electricity;
42             i2c_input: in data port;
43             mqtt_output: out data port;
44             bus_access_i2c: requires bus access I2CBus;
45             bus_access_ethernet: requires bus access Ethernet;
46         properties
47             SEI::PowerBudget => 0.8w applies to power;
48     end Microcontroller;
49     system implementation Microcontroller.i
50         subcomponents
51             mcu_processing: process sw::MCUProcessing.i;
52             this_processor: processor MCUProcessor.i;
53         connections
54             i2c_conn: port i2c_input -> mcu_processing.i2c_input;
55             mqtt_conn: port mcu_processing.mqtt_output ->
56                 mqtt_output;
57             bus_i2c_conn: bus access bus_access_i2c
58                 -> this_processor.bus_access_i2c;
59             bus_ethernet_conn: bus access this_processor.
60                 bus_access_ethernet
61                 -> bus_access_ethernet;
62         properties
63             Actual_Processor_Binding => (reference(this_processor)
64                 )
65                 applies to mcu_processing;
66             Actual_Processor_Binding => (reference(this_processor)
67                 )
68                 applies to mcu_processing.this_thread_acquisition;
69             Actual_Processor_Binding => (reference(this_processor)
70                 )
71                 applies to mcu_processing.this_thread_processing;
72             Actual_Processor_Binding => (reference(this_processor)
73                 )

```

```

68         applies to mcu_processing.this_thread_sending;
69     end Microcontroller.i;
70     processor MCUProcessor
71         features
72             bus_access_i2c: requires bus access I2CBus;
73             bus_access_ethernet: requires bus access Ethernet;
74         properties
75             Clock_Period => 4 ns;
76             Scheduling_Protocol => (RMS);
77     end MCUProcessor;
78     processor implementation MCUProcessor.i
79         subcomponents
80             this_mcu_memory: memory MCUMemory;
81     end MCUProcessor.i;
82     memory MCUMemory
83     end MCUMemory;
84     bus I2CBus
85     end I2CBus;
86     bus implementation I2CBus.i
87     end I2CBus.i;
88     bus Ethernet
89     end Ethernet;
90     bus implementation Ethernet.i
91     end Ethernet.i;
92     device StorageDevice
93         features
94             mqtt_input: in data port;
95             bus_access_ethernet: requires bus access Ethernet;
96     end StorageDevice;
97     device implementation StorageDevice.i
98     end StorageDevice.i;
99     device VibrationSensor
100         features
101             power: in feature Electricity;
102             vibration_signal: out data port;
103             bus_access_i2c: requires bus access I2CBus;
104         properties
105             SEI::PowerBudget => 0.5 mw applies to power;
106     end VibrationSensor;
107     device implementation VibrationSensor.i
108     end VibrationSensor.i;
109     system PowerSupplierPOE

```

```

110     features
111         supplier: out feature Electricity;
112     properties
113         sei::PowerSupply => 30.0W applies to supplier;
114         sei::PowerCapacity => 30.0W;
115     end PowerSupplierPOE;
116     abstract Electricity
117     end Electricity;
118
119 package sw
120 public
121     with sei;
122     process MCUProcessing
123         features
124             i2c_input: in data port;
125             mqtt_output: out data port;
126         end MCUProcessing;
127     process implementation MCUProcessing.i
128         subcomponents
129             this_thread_acquisition: thread DataAcquisition.impl;
130             this_thread_processing: thread DataProcessing.impl;
131             this_thread_sending: thread DataSending.impl;
132         connections
133             acquisition_thread_in: port i2c_input ->
134                 this_thread_acquisition.vibration_signal;
135             acquisition_thread_out: port this_thread_acquisition.
136                 vibration_package -> this_thread_processing.
137                 vibration_package;
138             processing_thread_conn: port this_thread_processing.
139                 velocity -> this_thread_sending.velocity;
140             sending_thread_in: port this_thread_sending.
141                 mqtt_package -> mqtt_output;
142         end MCUProcessing.i;
143     thread DataAcquisition
144         features
145             vibration_signal: in data port;
146             vibration_package: out data port;
147         properties
148             Dispatch_Protocol => Periodic;
149             Compute_Execution_Time => 1 ms .. 2 ms;
150             Period => 4 ms;
151             SEI::MIPSBudget => 1.5 mips;

```

```
147         Stack_Size => 10 Kbyte;
148     end DataAcquisition;
149     thread implementation DataAcquisition.impl
150     end DataAcquisition.impl;
151     thread DataProcessing
152         features
153             vibration_package: in data port;
154             velocity: out data port;
155         properties
156             Dispatch_Protocol => Periodic;
157             Compute_Execution_Time => 3 ms .. 4 ms;
158             Period => 50 ms;
159             SEI::MIPSBudget => 1.5 mips;
160             Stack_Size => 10 Kbyte;
161     end DataProcessing;
162     thread implementation DataProcessing.impl
163     end DataProcessing.impl;
164     thread DataSending
165         features
166             velocity: in data port;
167             mqtt_package: out data port;
168         properties
169             Dispatch_Protocol => Periodic;
170             Compute_Execution_Time => 3 ms ..10 ms;
171             Period => 500 ms;
172             SEI::MIPSBudget => 1.5 mips;
173             Stack_Size => 10 Kbyte;
174     end DataSending;
175     thread implementation DataSending.impl
176     end DataSending.impl;
177 end sw;
```

APÊNDICE D – REQUISIÇÃO DOS DADOS EM POWERSHELL

```

1 $serverUrl = "http://150.162.216.231:8080"
2 $username = "tenant@thingsboard.org"
3 $password = "tenant"
4 $deviceId = "4869ddf0-917a-11ef-911d-830c4d62b6f2"
5 $key = "acceleration_z"
6 $startDate = (Get-Date).AddDays(-1).Date.AddHours(15).AddMinutes
   (44)
7 $endDate = (Get-Date).AddDays(-1).Date.AddHours(16).AddMinutes(15)
8 $startTs = [math]::Floor(($startDate.ToUniversalTime() - [DateTime]
   '1970-01-01').TotalMilliseconds)
9 $endTs = [math]::Floor(($endDate.ToUniversalTime() - [DateTime]
   '1970-01-01').TotalMilliseconds)
10 $limit = 30000
11 $outputFile = "telemetry_data.txt"
12 function Convert-Timestamp {
13     param (
14         [long]$timestamp
15     )
16     $dateTime = [DateTime]'1970-01-01' + [TimeSpan]::
       FromMilliseconds($timestamp)
17     return $dateTime.ToString("HH:mm:ss.fff")
18 }
19 function Get-JwtToken {
20     $loginUrl = "$serverUrl/api/auth/login"
21     $body = @{
22         username = $username
23         password = $password
24     } | ConvertTo-Json
25     try {
26         $response = Invoke-RestMethod -Uri $loginUrl -Method POST -
           Body $body -ContentType "application/json"
27         return $response.token
28     } catch {
29         Write-Error "Falha ao obter o token JWT: $_"
30         return $null
31     }
32 }
33 function Get-TelemetryByKey {

```

```

34 param ([string]$jwtToken)
35 $headers = @{
36     "Authorization" = "Bearer $jwtToken"
37 }
38 $telemetryUrl = "$serverUrl/api/plugins/telemetry/DEVICE/
    $deviceId/values/timeseries?keys=$key&startTs=$startTs&endTs
    =$endTs&limit=$limit"
39 try {
40     $result = Invoke-RestMethod -Uri $telemetryUrl -Method GET
        -Headers $headers
41     Write-Output "Dados obtidos da API: $result" # Depuracao
        para verificar os dados recebidos
42     return $result
43 } catch {
44     Write-Error "Falha ao buscar dados de telemetria: $_"
45     return $null
46 }
47 }
48 $jwtToken = Get-JwtToken
49 if ($jwtToken) {
50     Write-Output "Token JWT obtido com sucesso."
51     $telemetryData = Get-TelemetryByKey -jwtToken $jwtToken
52     if ($telemetryData) {
53         Write-Output "Dados de telemetria para a key '$key' foram
            obtidos."
54         if (!(Test-Path $outputFile)) {
55             New-Item -Path $outputFile -ItemType File -Force
56         }
57         foreach ($entry in $telemetryData.$key) {
58             if ($entry.ts -and $entry.value) {
59                 # Converter timestamp
60                 $formattedTime = Convert-Timestamp -timestamp
                    $entry.ts
61                 $line = "Timestamp: $formattedTime, Value: $($entry
                    .value)"
62                 Add-Content -Path $outputFile -Value $line
63             } else {
64                 Write-Output "Dados incompletos ou ausentes: $entry
                    " # Depuracao adicional
65             }
66         }
67         Write-Output "Dados salvos no arquivo: $outputFile"

```

```
68     } else {
69         Write-Error "Nao foi possivel obter dados de telemetria
70             para a key '$key'."
71     }
72 } else {
73     Write-Error "Nao foi possivel autenticar e obter o token JWT."
74 }
```