

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MARCELO ROMANSSINI

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES
BASEADO EM ACELERÔMETROS MEMS**

Alegrete, RS

2021

MARCELO ROMANSSINI

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES
BASEADO EM ACELERÔMETROS MEMS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Microeletrônica Digital da Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**
Orientador: Alessandro G. Girardi

Alegrete, RS
2021

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

R758d Romanssini, Marcelo

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES
BASEADO EM ACELERÔMETROS MEMS / Marcelo Romanssini.

71 p.

Tese(Doutorado)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA
ELÉTRICA, 2021.

"Orientação: Alessandro Gonçalves Girardi".

1. Manutenção preditiva. 2. Acelerômetros MEMS. I. Título.

MARCELO ROMANSSINI

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES BASEADO EM
ACELERÔMETROS MEMS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27 de setembro de 2021.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Alessandro Gonçalves Girardi

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Paulo César Comassetto de Aguirre

UNIPAMPA

Prof. Dr. Lucas Compassi Severo

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **ALESSANDRO GONCALVES GIRARDI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/09/2021, às 11:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCAS COMPASSI SEVERO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/09/2021, às 11:57, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **PAULO CESAR COMASSETTO DE AGUIRRE, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/09/2021, às 11:57, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0623165** e o código CRC **F2B95EE4**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete
Av. Tiarajú, 810 – Bairro: Ibirapuitã – Alegrete – RS CEP: 97.546-550

Telefone: (55) 3422-8400

*“It makes no sense to look back and think,
I should have done this or that, should
have been there. Does not matter.
Let’s invent tomorrow,
and stop worrying
about the past.”
(Steve Jobs)*

RESUMO

Medidores de vibrações são muito utilizados na manutenção preditiva de máquinas elétricas rotativas. Uma das principais técnicas da manutenção preditiva consiste no monitoramento de vibrações, já que os problemas que manifestam-se nas máquinas geralmente modificam os seus padrões de vibração. Existem equipamentos e sistemas capazes de realizar medições de vibração no mercado. Esses equipamentos utilizam diversos tipos de transdutores. No entanto, os acelerômetros piezoelétricos são amplamente utilizados devido a sua precisão, porém apresentam custo elevado. Diante disso, propomos neste trabalho o projeto e desenvolvimento de um medidor de vibrações baseado em acelerômetros MEMS, uma vez que a tecnologia de fabricação e a precisão dos acelerômetros MEMS tem sido tema de muita pesquisa e tem evoluído muito nos últimos anos. O sistema proposto é composto por dois acelerômetros, sendo um acelerômetro digital de três eixos, no qual é possível medir a aceleração nas coordenadas x, y e z e um acelerômetro uniaxial analógico, sendo que o acelerômetro analógico será implementado em uma placa de circuito dedicada e poderá ser conectado e desconectado do medidor de vibração conforme necessidade. O sistema ainda conta com alimentação via bateria de íon de lítio. Para a leitura dos dados, controle do sistema, processamento e envio de dados para um dispositivo final utilizou-se o microcontrolador ESP32-WROOM-32, o qual possui uma unidade de processamento, memória, módulo Wi-Fi e Bluetooth em um mesmo dispositivo, o que facilitou a implementação do medidor de vibrações proposto. Os dados de aceleração fornecidos pelos acelerômetros depois de digitalizados são lidos pelo microcontrolador através do protocolo de comunicação SPI e depois são enviados para o dispositivo final através de Wi-Fi, onde realiza-se a análise, dispensando qualquer tipo de conexão física entre os dispositivos de medição e de análise. Para o sistema proposto, projetou-se circuitos de controle de carga, condicionamento de sinal, condicionamento de tensão e por fim implementou-se o protótipo do medidor de vibração. Com a placa de aquisição em protótipo fez-se a gravação do *software* no microcontrolador e realizou-se testes para validação dos circuitos implementados, e também testou-se a captura de dados de aceleração através do sensor embarcado. Por fim realizou-se teste de leitura de vibração em um motor elétrico instalado em bancada. Com os testes realizados, conseguimos bons resultados, comprovando o funcionamento dos circuitos projetados e do sistema proposto.

Palavras-chave: Acelerômetros MEMS, Medição de Vibração, Manutenção preditiva.

ABSTRACT

Vibration meters are widely used in predictive maintenance on rotating electrical machines. One of the main techniques of predictive maintenance is vibration monitoring. The problems that manifest themselves in machines usually change their vibration patterns. There are equipment and systems capable of performing vibration measurements on the market. These devices use different types of transducers. The piezoelectric accelerometers are widely used due to their accuracy, but they have a high cost. Therefore, in this work we propose the design and development of a vibration meter based on MEMS accelerometers, since the manufacturing technology and accuracy of MEMS accelerometers has been the subject of much research and has evolved a lot in the last few years. The proposed system consists of two accelerometers, a three-axis digital accelerometer, in which it is possible to measure acceleration in x, y and z axis, and a uniaxial analog accelerometer. The analog accelerometer will be implemented on a dedicated circuit board and it can be connected and disconnected from the vibration meter as needed. The system is power supplied by a lithium ion battery. For data reading, system control, processing and sending data to a final device, the ESP32-WROOM-32 microcontroller was used. It has a processing unit, memory, Wi-Fi and Bluetooth module in the same device, which facilitated the implementation of the device. The acceleration data provided by the accelerometers after being digitized are read by the microcontroller through the SPI communication protocol and then sent to the final device through Wi-Fi, where the analysis is carried out, eliminating any type of physical connection between the devices, measurement and analysis. For the proposed system, circuits for load control, signal conditioning, voltage conditioning were designed and, finally, the prototype of the vibration meter was implemented. With the acquisition board in prototype, the software was written in the microcontroller and tests were carried out to validate the implemented circuits. The acceleration data captured through the embedded sensor was also tested. Finally, a vibration reading test was performed on an electric motor installed on a bench. With the tests carried out, we achieved good results, proving the operation of the designed circuits and the proposed system.

Keywords: Accelerometer, Vibration meter, Predictive maintenance

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curva P-F	19
Figura 2 – Níveis de severidade de vibração definidos pela ISO 10816.	20
Figura 3 – Etapas básicas para a realização do estudo de vibrações.	21
Figura 4 – Esquema simplificado de um acelerômetro piezoelétrico.	24
Figura 5 – Diagrama de um acelerômetro integrado do tipo MEMS.	25
Figura 6 – Imagem microcópica do acelerômetro integrado MEMS.	26
Figura 7 – Esquema geral do dispositivo para medição de vibrações desenvolvido.	29
Figura 8 – Esquema de conexão do acelerômetro ICM-42688-P.	31
Figura 9 – Resposta de frequência do acelerômetro ADXL1002.	32
Figura 10 – Sensibilidade <i>vs</i> Tensão de alimentação.	32
Figura 11 – Esquema de conexão do acelerômetro ADXL1002BCPZ-RL.	33
Figura 12 – Esquema de conexão do conversor analógico digital AD4000.	35
Figura 13 – Esquemático do circuito de amplificação utilizando o amplificador AD8065.	37
Figura 14 – Esquema de conexão do bloco de ganho projetado utilizando o amplificador AD8065	39
Figura 15 – Esquema de conexão do controlador de carga BQ24075RGTR.	40
Figura 16 – Esquema de conexão do regulador de tensão RT9080-33GJ5.	41
Figura 17 – Esquema de conexão do conversor <i>boost</i> MCP16411.	41
Figura 18 – Esquema de conexão do regulador de tensão RT9080-18GJ5.	41
Figura 19 – Esquema de conexão do microcontrolador ESP32-WROOM-32.	42
Figura 20 – Esquema de conexão do conversor UART CP2102.	44
Figura 21 – Esquema de conexão das chaves tácteis de configurações.	44
Figura 22 – Esquema de conexão dos leds.	45
Figura 23 – Projeto da placa eletrônica de processamento e aquisição de dados com os componentes posicionados e roteamento eletrônico feito.	45
Figura 24 – Projeto da placa eletrônica para o sensor ADXL1002 com os componentes posicionados e roteamento da placa de circuito impresso.	46
Figura 25 – Protótipo da placa de processamento e aquisição de dados do medidor de vibrações desenvolvido.	46
Figura 26 – Protótipo da placa para o sensor ADXL1002.	47
Figura 27 – Fluxograma de funcionamento do software embarcado.	48
Figura 28 – Interface implementada em Python.	49
Figura 29 – Fluxograma simplificado do processamento dos dados de aceleração.	50
Figura 30 – <i>Setup</i> para monitoramento de carga, descarga da bateria e níveis de tensão do sistema.	51
Figura 31 – Tensão da bateria e corrente de carga durante o processo de carga da bateria.	52

Figura 32 – Níveis de tensão e corrente consumidas pelo medidor de vibrações durante leitura e transmissão de dados a uma taxa de 2000 pontos/segundo	54
Figura 33 – <i>Setup</i> utilizado para medição da corrente consumida com o sistema em <i>deep sleep</i> .	55
Figura 34 – Imagem aproximada do multímetro digital utilizado para medição de corrente do sistema em <i>deep sleep</i> .	55
Figura 35 – Esquemático do circuito de condicionamento de sinal implementado no <i>software</i> LTspice para simulação	56
Figura 36 – Resultado da simulação do circuito de condicionamento de sinal implementado no medidor de vibrações desenvolvido	57
Figura 37 – Motor elétrico instalado em bancada com o protótipo do medidor de vibrações fixado através de adesivo dupla face em aleta de refrigeração do motor.	58
Figura 38 – Dados de aceleração capturados pelo medidor de vibração processados em tempo real através da interface desenvolvida.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algumas causas de vibrações e respectivas características.	22
Tabela 2 – Alguns medidores de vibrações encontrados no mercado para comercialização.	27
Tabela 3 – Especificações de aceleração e sensibilidade do acelerômetro ICM-42688-P.	30
Tabela 4 – Especificações da saída do acelerômetro ADXL1002BCPZ-RL.	33
Tabela 5 – Principais características do conversor analógico digital AD4000.	35
Tabela 6 – Valores dos componentes e informações de ruído do amplificado para a solução completa do bloco amplificador.	37
Tabela 7 – Conexões dos pinos do microcontrolador ESP32-WROOM32	67
Tabela 8 – Lista de componentes necessários para fabricação da placa eletrônica do medidor de vibrações.	70
Tabela 9 – Lista de componentes necessários para fabricação da placa eletrônica do sensor externo.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MEMS	<i>Micro ElectroMechanical Systems</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
NBR	Norma técnica brasileira
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SoC	<i>System on Chip</i>
LDO	<i>Low-Dropout Regulator</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise ratio</i>
ENOB	<i>Effective number of bits</i>
KSPS	<i>Kilo Samples per Second</i>
SAR	<i>Sucessive Aproximation Register</i>
GBWP	<i>Gain–Bandwidth Product</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FET	<i>Field Effect Transistor</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
SINAD	<i>Signal to Noise and Distortion</i>
CPU	<i>Central Process Unit</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivos Específicos	16
1.2	Estrutura do Trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Manutenção	17
2.2	Vibrações em máquinas elétricas rotativas	19
2.3	Transdutores para medição de vibrações	23
2.3.1	Acelerômetros Piezoelétricos	23
2.3.2	Acelerômetros Piezoresistivos	24
2.3.3	Acelerômetros MEMS	24
2.4	Dispositivos para medição de vibrações	26
3	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA	28
3.1	Descrição do Hardware implementado	30
3.1.1	Sensor ICM-42688-P	30
3.1.2	Acelerômetro ADXL1002BCPZ-RL	31
3.1.3	Circuito para conversão analógico-digital	33
3.1.4	Circuito de alimentação e condicionamento de tensão	39
3.1.5	Microcontrolador ESP32-WROOM-32	42
3.1.6	Conversor USB-UART CP2102	43
3.1.7	Botões de configuração e leds	43
3.1.8	Prototipação	44
3.2	Descrição do software implementado	46
3.2.1	Software embarcado	46
3.2.2	Software para recepção e interpretação dos dados de aceleração	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	Teste de carga e descarga da bateria	51
4.2	Monitoramento de tensões na placa de aquisição do medidor de vibrações	53
4.3	Teste circuito de condicionamento de sinal	55
4.4	Medição de vibrações de um motor elétrico	56
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
5.1	Conclusão	60
5.2	Trabalhos Futuros	61

REFERÊNCIAS	62
ANEXOS	66
ANEXO A – CONEXÕES DOS PINOS DO MICROCONTROLADOR ESP32-WROOM32	67
ANEXO B – LISTA DE COMPONENTES NECESSÁRIOS PARA FABRICAÇÃO DA PLACA DE AQUISIÇÃO PARA O MEDIDOR DE VIBRAÇÕES	70

1 INTRODUÇÃO

Medidores de vibração são instrumentos, comumente, utilizados nas engenharias civil, mecânica e elétrica para o estudo do comportamento de materiais e estruturas quando submetidas a fontes de vibração (CARDEN; FANNING, 2004). Também são utilizados na área industrial para medição de vibração em máquinas, tubos e canos auxiliando na manutenção e controle (GOYAL et al., 2016).

Com o crescimento da indústria, o emprego de máquinas rotativas para mecanização e automação das linhas de produção foi muito difundido. Algumas dessas máquinas são extremamente críticas para a produção. A falha ou colapso dessas máquinas podem até parar uma linha de produção completa, gerando um alto custo de máquina parada. (VISHWAKARMA et al., 2017).

Geralmente, as linhas de produção nas indústrias são amplas e o processo de produção é sequencial. Com isso, torna-se necessário monitorar e identificar o estado de deterioração dos componentes das máquinas que compõem a linha de produção para que se possa fazer uma previsão da evolução do seu estado. Através desta previsão organiza-se as operações de manutenção, prevenindo e atuando na substituição ou reparação de peças antes que haja avaria, evitando-se assim custos excessivos na manutenção devido à propagação do dano na máquina ou à parada da linha de produção (SILVESTRE, 2012).

Recentemente a manutenção preditiva tem sido tema de muitos artigos e pesquisas. A manutenção preditiva se refere ao monitoramento de forma inteligente tendo como objetivo a prevenção de futuras falhas. Para isso, utiliza-se técnicas de processamento de sinal avançado, técnicas baseadas em reconhecimento de padrões e aprendizado de máquina, redes neurais, etc (PAOLANTI et al., 2018).

Por meio das técnicas preditivas, torna-se possível o acompanhamento periódico das condições de funcionamento das máquinas. Nesse tipo de manutenção é possível prever o tempo de vida útil de determinada máquina ou equipamento, antecipar a necessidade de serviços de manutenção eliminando desmontagens desnecessárias, aumentando a longevidade da máquina e elevando a confiabilidade da planta industrial. Através de parâmetros monitorados, é possível prever possíveis falhas ou identificar peças com defeito, o que possibilita a realização de uma intervenção planejada para reparar o problema, impedindo que ele se agrave e também reduzindo o tempo de máquina parada.

Uma das técnicas de manutenção preditiva consiste no monitoramento e análise de vibrações. Esta, tornou-se uma das prevaletentes e mais utilizadas técnicas para o acompanhamento do estado das máquinas, tendo em vista que a existência de problemas geralmente modifica os padrões de vibração intrínsecos da máquina, mesmo estando em estágios iniciais. O monitoramento de vibração pode ser contínuo ou periódico e visa identificar modificações de padrão o mais breve possível, para que se possa sistematizar com antecedência e segurança o programa de manutenção (BENEVENUTI, 2004).

A vibração pode ser definida como uma resposta repetitiva, periódica ou oscilatória

de um sistema mecânico (SILVA, 2006). O movimento causado pela vibração não pode ser quantificado adequadamente somente com os sentidos humanos. Para ter-se algum tipo de quantificação de medição, deve-se usar interfaces que transformem o movimento mecânico de vibração em uma grandeza elétrica como resistência, tensão, corrente, indutância ou capacitância (SMITH, 2013). Para esta tarefa utiliza-se dispositivos eletrônicos chamados de sensores. Sensores consistem em dispositivos que fornecem como saída um sinal elétrico como resposta a uma mudança de uma unidade física medida (PATRANABI, 2003).

A vibração de uma máquina pode ser representada de várias formas. No entanto, utiliza-se comumente a representação espectral, onde é representada a amplitude da vibração para as frequências que compõem o sinal. Através da análise espectral é possível identificar problemas de várias naturezas como, desbalanceamento, desalinhamento, folgas, problemas em rolamentos e engrenagens, cavitação em bombas e geradores hidroelétricos, ressonância estrutural, falta de lubrificação e até falhas elétricas. Com isso, a procura por ferramentas e sistemas de monitoramento e análise de vibrações tem crescido na indústria. Então, encontrar equipamentos de medição que proporcionem diagnóstico preciso é fundamental para obter evitar ou identificar falhas incipientes diminuindo custos com manutenção (PEDOTTI; ZAGO; FRUETT, 2016).

Vários equipamentos para medição de vibração estão disponíveis no mercado. Esses equipamentos podem utilizar diversos tipos de transdutores para realizar a medição. Dentre os transdutores podemos citar transdutores piezoelétricos, eletrodinâmicos, diferencial linear e resistência variável (PEDOTTI; ZAGO; FRUETT, 2016). Os mais utilizados para medição de vibração são os acelerômetros. O tipo do acelerômetro a ser utilizado depende muito da aplicação, sendo que os acelerômetros piezoelétricos são amplamente utilizados devido à sua precisão de medição, porém apresentam custo elevado (ONUORAH et al., 2017).

Devido ao avanço das tecnologias de fabricação, os mais recentes acelerômetros capacitivos MEMS (do inglês, *Micro ElectroMechanical Systems*) estão encontrando uso em aplicações tradicionalmente dominadas por acelerômetros piezoelétricos e outros sensores (MURPHY, 2020). O interesse no uso de acelerômetros do tipo MEMS se deve à facilidade de integrá-los ao mais diversos sistemas devido às suas pequenas dimensões e por apresentarem um menor custo (VARANIS et al., 2018).

Assim sendo, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um dispositivo para medição de vibrações baseado em sensores MEMS que pode ser aplicado para medição de vibrações. O dispositivo é composto por uma placa de aquisição e transmissão de dados e dois acelerômetros do tipo MEMS, sendo um embarcado na placa de aquisição e um externo que pode se conectado e desconectado do sistema. O dispositivo possui alimentação via bateria de íon de lítio 3,7 V, e a transmissão dos dados de vibração é feita sem fio, facilitando a sua inclusão à internet das coisas (*IoT - Internet of Things*).

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um dispositivo para medição de vibrações baseado em acelerômetros do tipo MEMS.

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Projetar circuito para controle de carga da bateria de íon de lítio;
- Projetar circuito analógico para aquisição e condicionamento de sinal de vibração medido pelo acelerômetro;
- Desenvolver placa para aquisição, processamento e transmissão dos dados de vibração;
- Realizar teste para validação do dispositivo desenvolvido.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para uma melhor organização do trabalho este foi dividido em cinco capítulos que abordam as etapas do projeto, eles são apresentados de forma sucinta abaixo.

O Capítulo 2 descreve a fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento deste trabalho. Neste capítulo é feita uma abordagem sobre manutenção, vibrações em máquinas elétricas e alguns exemplos de problemas que podem ser identificados através da medição de vibração. Também traz o detalhamento dos principais tipos de acelerômetros utilizados para captação de vibrações e por fim faz-se uma breve descrição de alguns sistemas para medição e análise de vibração disponíveis no mercado.

No Capítulo 3 são apresentadas etapas do desenvolvimento do sistema para medição de vibrações. Inicialmente é feita uma descrição de *hardware*, onde é explanada todas as partes do circuito eletrônico implementado. Por fim é feita uma breve descrição dos *softwares* embarcado e de recepção de dados.

No Capítulo 4 faz-se uma explanação e discussão dos resultados obtidos, através dos testes realizados com o protótipo implementado.

Finalmente, no Capítulo 5, são realizadas as discussões dos resultados e as conclusões obtidas do através do desenvolvimento do dispositivo para medição de vibrações.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo visa descrever de forma detalhada os principais conceitos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Também traz a explanação do tipo de acelerômetro utilizado.

2.1 MANUTENÇÃO

Segundo a Norma Técnica NBR 5462 (1994) o conceito de manutenção é definido como a combinação de “ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”. Para os autores (KARDEC; NASCIF, 2009), o conceito de manutenção pode ser definido como a ação de “garantir a confiabilidade e a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção ou de serviço, com segurança, preservação do meio ambiente e custos adequados”.

O custo de operação e manutenção podem levar um negócio à falência, especialmente com a crescente demanda da produtividade, disponibilidade, qualidade, segurança e meio ambiente e as margens de lucro decrescentes (WAEYENBERGH; PINTELON, 2004). Com isso, é muito importante ter uma manutenção organizada e eficiente evitando gastos desnecessários, prevenindo falhas e interrupções de processos de produção.

Manutenção tem sido o foco de pesquisas técnicas por décadas. Consiste em um elemento essencial que facilita a gestão e é o principal requisito para o aumento da disponibilidade, sustentabilidade e estabilidade de processos (KHAZRAEI; DEUSE, 2011). Existem três tipos de manutenção de acordo com a Norma Técnica NBR 5462 (1994), são elas: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva.

A manutenção corretiva consiste na atuação para a correção da falha ou do desempenho insatisfatório de um determinado equipamento (KARDEC; NASCIF, 2009), ou seja, realiza-se a manutenção corretiva após a identificação de uma avaria a fim de reparar ou efetuar a troca de determinada peça, para que o equipamento volte a atuar de forma normal. Ainda segundo Kardec e Nascif (2009), a manutenção corretiva pode ser dividida em duas classes: manutenção corretiva não planejada e manutenção corretiva planejada. A primeira consiste na correção do desempenho insatisfatório ou correção de falha por ordem gerencial e a segunda consiste na manutenção baseada na observação de mudanças de parâmetros observados através da manutenção preditiva.

A manutenção corretiva não planejada é uma abordagem que funciona bem se as paradas dos equipamentos não influenciam na produção ou se os custos de mão de obra e material não importam (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004). Quando refere-se a manutenção de máquinas rotativas, tanto as paradas quanto os custos de material e mão de obra são relevantes, já que ao parar-se uma máquina um equipamento deixa de operar, ou até mesmo para-se uma linha de produção inteira. Com isso pode-se afirmar que a abordagem de manutenção corretiva não planejada de certa forma é ineficiente quando trata-se de

máquinas rotativas.

Manutenção preventiva resume-se em programar as atividades de manutenção em intervalos de tempo, com base em dias corridos ou de horas trabalhadas de máquinas (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004). A manutenção preventiva busca sempre evitar ocorrências de falhas. Nesse conceito de manutenção, a substituição e reparo de peças ou equipamentos é realizada previamente às ocorrências de paradas por falha, ou problemas que acarretam maiores custos de reparo.

A manutenção preventiva proporciona um conhecimento antecipado das ações, propiciando bom gerenciamento das atividades e previsibilidade de consumo de materiais. No entanto, um dos pontos negativos dessa abordagem é a introdução de defeitos não existentes nos equipamentos causados pela falha humana, falha de sobressalentes, contaminações inseridas nos sistemas de óleo, danos durante a partida ou parada e também por falhas na execução dos procedimentos de manutenção (KARDEC; NASCIF, 2009). Outra desvantagem é a realização da manutenção sem necessidade ou então a manutenção tardia, pois a manutenção preventiva não leva em consideração o estado do equipamento ou máquina para a realização das ações necessárias, e sim o intervalo de tempo ou o tempo trabalhado.

Manutenção preditiva também chamada “manutenção baseada em condição” consiste na atuação ou intervenção realizada com base na modificação de parâmetros de desempenho do equipamento ou máquina. Com base nas técnicas preditivas faz-se o monitoramento da condição da máquina, e quando necessário realiza-se ações de correção por meio de uma manutenção corretiva planejada (KARDEC; NASCIF, 2009; HASHEMIAN, 2011).

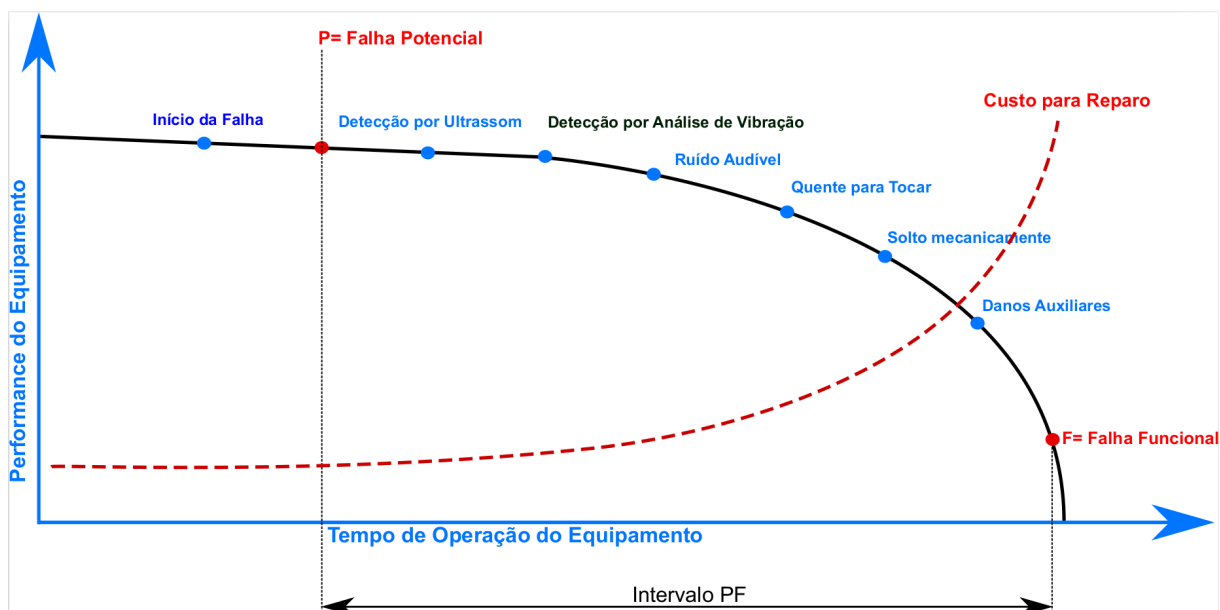
O principal objetivo da manutenção preditiva é antecipar o diagnóstico de possíveis falhas por meio do monitoramento de diversos parâmetros. Os parâmetros monitorados podem ser mecânicos, elétricos, químicos e físicos (OCHELLA; SHAFIEE; SANSOM, 2021). A manutenção preditiva proporciona à máquina uma maior longevidade e operação contínua pelo maior intervalo de tempo possível.

Alguns testes preditivos e inspeções que são importantes para a detecção de falhas incipiente e perda de desempenho são: monitoramento de vibração, análise termográfica, medição de ruído ultrassônico (emissão acústica), análises de lubrificantes, análise de assinaturas entre outros (HASHEMIAN, 2011).

Através de testes e técnicas de manutenção preditiva o estado operacional das máquinas pode ser acompanhado periodicamente permitindo a identificação de falhas potenciais precocemente. Quando identificados aspectos anormais nas variáveis monitoradas, as possíveis peças problemáticas da máquina são apontadas e programadas para manutenção (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004).

Os dados dessas inspeções, quando coletados continuamente ou sob o mesmo protocolo em intervalos e em combinação com dados históricos, podem ser plotados em

Figura 1 – Curva P-F



Fonte: Adaptado de (ENGETELES, 2017)

relação ao tempo permitindo a avaliação das características de desempenho da máquina. Tendo dados históricos suficiente, pode-se utilizar o gráfico de desempenho para identificar falha incipiente, também conhecido como ponto de falha potencial. Esse ponto só pode ser identificado quando o desempenho da máquina ou equipamento monitorado começa a degradar-se, por isso o gráfico de desempenho é conhecido como curva de falha potencial (P-F) (HASHEMIAN, 2011).

A Figura 1 mostra um exemplo de curva P-F, alguns tipos de testes distribuídos sobre a curva que podem ser feitos para identificar as falhas incipientes e também a curva do custo de reparo de uma determinada falha ao longo do tempo de operação da máquina.

Dentre os vários métodos, testes e técnicas para manutenção preditiva o monitoramento de vibração consiste em uma das mais eficientes para detecção de defeitos em máquinas rotativas. Através da análise de vibração pode-se identificar problemas ainda em desenvolvimento. Isso permite a realização de uma manutenção programada para correção antes que o problema evolua, causando maiores danos e custos e paradas não programadas (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004).

2.2 VIBRAÇÕES EM MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

Compreende-se por vibração qualquer movimento oscilatório periódico e aperiódico. Todo corpo que possui massa e elasticidade é capaz de vibrar (MOLINA, 2003). Pode-se também definir vibração como uma oscilação mecânica em torno de um ponto fixo. As vibrações podem ser caracterizadas pela frequência, amplitude e sua origem. Existem vibrações com as mais variadas frequências e amplitudes. Elas podem ser não intencionais (perturbações) ou vibrações geradas a partir de parâmetros conhecidos para realização de

algum teste ou para outras utilidades (ÁGOSTON, 2014).

A detecção e o diagnóstico de falhas em máquinas elétricas e sistemas de acionamento são de extrema importância na automação industrial moderna (DINEVA et al., 2019). A vibração em equipamentos industriais pode ser um sinal ou uma fonte de problema. Por vezes, a vibração pode apenas ser o resultado da operação de uma máquina, não sendo motivo de preocupação (SILVESTRE, 2012).

Existem diversas normas nacionais e internacionais que regulamentam e estabelecem critérios de aceitação dos níveis de vibração de máquinas elétricas rotativas, como ISO 10816-1:(1995) e ABNT-NBR:10082(2011)(PEDOTTI et al., 2019). Grandezas como aceleração, velocidade e deslocamento podem ser utilizadas para quantificar níveis de vibração. Esses níveis podem servir como guias para avaliar a severidade da vibração, porém quando utilizados como ferramenta de análise podem ser insuficientes para a identificação de danos iminentes às máquinas (PEDOTTI; ZAGO; FRUETT, 2017). A figura 2 apresenta uma tabela com os níveis de severidade de vibração para cada classe de máquinas definidos pela ISO 10816.

Os sinais de vibração normalmente são compostos por várias frequências que ocorrem simultaneamente. Assim, apenas olhando o sinal em relação ao tempo (Amplitude *versus* Tempo) não é possível ver imediatamente quantas componentes existem e em que frequências ocorrem (COMPANY, 1982). Existem várias formas para representar os níveis vibracionais de uma máquina. No entanto utiliza-se comumente a representação espectral (Amplitude *versus* Frequência), onde a amplitude da vibração é dada de acordo com a frequência (WOWK, 2005).

Cada máquina possui uma certa característica de vibração quando em perfeito funcionamento. Essas características de vibração são intrínsecas, ou seja, é uma característica da própria máquina, isso pode ser chamado de assinatura espectral da máquina. A assinatura espectral consiste na forma de onda resultante da vibração da máquina em

Figura 2 – Níveis de severidade de vibração definidos pela ISO 10816.

Níveis de Severidade de Vibração - ISO10816				
Velocidade de Vibração R.M.S mm/s	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
0,28 0,45 0,71	Bom			
1,12 1,8				
2,8 4,5	Satisfatório			
7,1 11,2 18 28 45	Insatisfatório		Inaceitável	

Fonte: ISO 10816

normal funcionamento (SILVESTRE, 2012).

Uma vez as informações de vibrações coletadas, torna-se possível comparar a assinatura da máquina com assinaturas de vibração anteriores, identificando assim se houveram alterações nos padrões de vibrações. Caso as alterações estejam presentes nas medições mais recentes é possível investigar e corrigir a causa de tal alteração antes que a máquina venha a falhar.

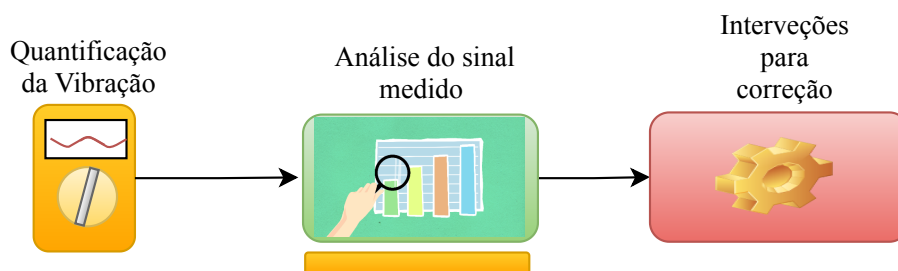
Qualquer alteração dos níveis de vibração não explicada por uma mudança de carga correspondente é razão para uma investigação. Essas vibrações que excedem os limites admissíveis são consideradas graves, causam desgaste acelerado e falhas prematuras. Elas devem ser rapidamente identificadas e tratadas com alguma ação corretiva.

A operação destas pode ser afetada de muitas formas. As falhas tanto de motores quanto de geradores podem ser atribuídas a várias razões: baixa manutenção, influências externas, instalação inadequada e qualidade de fabricação da máquina. As falhas registradas em máquinas elétricas rotativas podem ser de origem mecânica ou elétrica, sendo que cerca de 65-75% das ocorrências são de origem mecânica e 25-35% das ocorrências são de origem elétrica (LIPUS et al., 2016).

Uma das principais aplicações da análise de vibrações dá-se na manutenção, a qual utiliza a análise qualitativa e quantitativa das vibrações para determinar possíveis problemas na máquina. Para isso, deve-se realizar a medição de vibrações na máquina quando ela se encontra em perfeito funcionamento de modo a obter a assinatura espectral. Com a assinatura da máquina é possível acompanhar a evolução das vibrações durante toda a sua vida útil. Faz-se o monitoramento de vibrações periodicamente e compara-se com a assinatura espectral da máquina. Com isso, diante de alguma alteração, faz-se a programação da parada da máquina para manutenção, já que a alteração do espectro de frequência está relacionada a uma anormalidade na operação da máquina.

Para a realização do estudo de vibrações necessita-se basicamente de três etapas elas são mostradas na Figura 3.

Figura 3 – Etapas básicas para a realização do estudo de vibrações.



Fonte: Elaborado pelo autor

A primeira etapa consiste na quantificação da vibração através de um dispositivo de medição, onde através de um transdutor os sinais de vibração são convertidos em sinais elétricos. Após a obtenção dos dados de vibração realiza-se a análise dos dados obtidos

Tabela 1 – Algumas causas de vibrações e respectivas características.

Causas	Frequência	Amplitude	Considerações
Desbalanceamento	$1 \times \text{rpm}$	Proporcional ao desbalanceamento. Maior na direção radial.	Causa mais comum de vibrações.
Desalinhamento	$1 \times \text{rpm}$ + harmônicas	Maior na direção axial (50% acima da radial).	Geralmente identificada pela grande amplitude axial.
Excentricidade	$1 \times \text{rpm}$	Geralmente apresenta pequenas amplitudes.	Em motores e geradores desaparece quando a potência é desligada.
Mancais de apoio e rolamentos em mal estados	Muito alta - $n \times \text{rpm}$.	Amplitude oscila.	O mancal de apoio responsável pela vibração é o que está mais próximo do ponto com maior vibração medida.
Elementos mecânicos soltos e perdas mecânicas.	$2 \times$ até $10 \times \text{rpm}$	Errática algumas vezes.	Normalmente acompanhado de desbalanceamento ou desalinhamento.
Eixo empenado	$1 \times \text{rpm}$	Amplitude muito parecida com a gerada pelo desbalanceamento.	A vibração pode ser corrigida com a inserção de massa no centro do eixo.

Fonte: (SILVESTRE, 2012),(WOWK, 2005) e (COMPANY, 1999)

com o auxílio de *software*. Finalmente se necessário, realizam-se as devidas intervenções na máquina de modo a extinguir as causas de vibrações anormais.

Com os dados coletados, a análise pode ser feita através da comparação da assinatura espectral atual com informações de medições passadas. Também é possível analisar a leitura atual com características típicas de cada problema, onde com base na velocidade da máquina analisa-se as frequências múltiplas da fundamental (PEDOTTI et al., 2019). A Tabela 1 é um exemplo de problemas associados às frequências múltiplas da rotação da máquina.

Apesar da análise vibração ser uma das principais técnicas utilizadas na manutenção preditiva, ela não apresenta 100 % de precisão nos diagnósticos. Nas melhores das hipóteses essa técnica atinge 80 % de acertos nos diagnósticos (WOWK, 2005). Sendo assim, um fator que deve-se observar é a escolha do transdutor de vibração para o instrumento de medição. É muito importante que o processo de medição contenha erro próximo a zero para que não sejam realizados diagnósticos de possíveis falhas que na prática não existem.

2.3 TRANSDUTORES PARA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES

Transdutores consistem em dispositivos que convertem uma determinada forma de energia em outra. Podem converter energia elétrica em deslocamento mecânico ou também converter alguma grandeza física não elétrica como, deslocamento, pressão, som ou luz em uma grandeza elétrica (SINCLAIR, 2000). Através dos transdutores e do avanço da tecnologia pode-se medir e quantizar grandezas de interesse, por exemplo vibrações, a fim de melhorar e até corrigir processo industriais.

O movimento causado pela vibração mecânica não pode ser quantificado adequadamente somente com os sentidos humanos. Para ter-se algum tipo de quantificação de medição, deve-se usar alguma interface entre máquina e o técnico responsável pelo diagnóstico. Para esta tarefa são utilizados dispositivos eletrônicos, transdutores ou sensores (EISENMANN; PRENTICE, 2005).

Para medição de vibração bem como para medições de outras grandezas é extremamente importante a seleção de um transdutor compatível com a aplicação. Para isso deve-se atentar para faixa de funcionamento, frequência de resposta e de ressonância, sensibilidade, precisão, massa, condições ambientais, número de eixos e custo (EISENMANN; PRENTICE, 2005; PEDOTTI et al., 2019).

O principal dispositivo transdutor utilizado para medição de vibração é o acelerômetro (PEDOTTI et al., 2019). Existem muitos tipos de acelerômetros, porém para medição de vibração os acelerômetros mais utilizados são: piezoelétrico, piezoresistivo e acelerômetros MEMS (ENDAQ, 2017). Cada um deles será descrito brevemente, sendo que o acelerômetro do tipo MEMS, por ser o utilizado neste trabalho, será melhor detalhado.

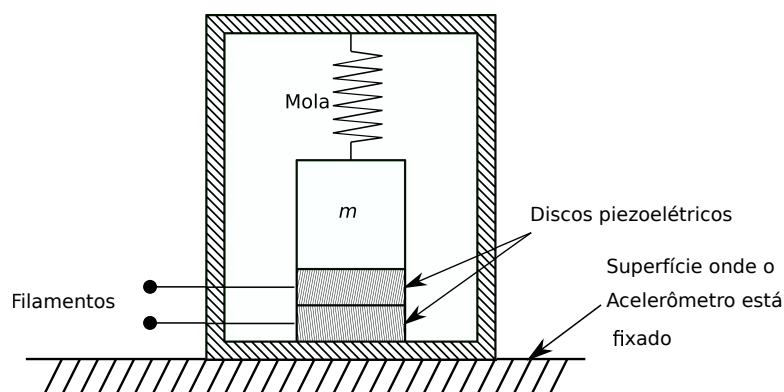
2.3.1 ACELERÔMETROS PIEZOELÉTRICOS

O efeito piezoelétrico ocorre em alguns materiais naturais, como quartzo, sal de Rochelle, sulfato de lítio, algumas cerâmicas, entre outros (DZHUDZHEV et al., 2013). Quando o cristal piezoelétrico é deformado ele gera uma determinada diferença de potencial entre seus terminais, proporcional à sua deformação. Esse é chamado de efeito piezoelétrico.

O acelerômetro piezoelétrico é um dos transdutores mais utilizados para medições de vibrações, pois apresenta as melhores características gerais quando comparado com os outros transdutores. Possui uma ampla faixa de frequência, faixa dinâmica com boa linearidade, é relativamente robusto e estável de modo que suas características permanecem estáveis por um longo período de tempo (COMPANY, 1982).

O acelerômetro piezoelétrico é composto por uma mola, uma massa e um cristal piezoelétrico. A Figura 4 mostra uma rerepresentação de um acelerômetro piezoelétrico. Uma massa é comprimida por uma mola contra um cristal piezoelétrico, de modo que quando a base do sensor vibra, a carga exercida pela massa sobre o cristal piezoelétrico varia. Desse modo, a tensão de saída gerada pelo cristal será proporcional à aceleração que

Figura 4 – Esquema simplificado de um acelerômetro piezoelétrico.



Fonte: Adaptado de (SILVESTRE, 2012)

o sensor está submetido (SILVESTRE, 2012).

Os acelerômetros piezoelétricos apresentam maior confiabilidade quando comparados com outros tipos de sensores, conseguindo operar em uma faixa de frequência maior (1 Hz - 30kHz) e por isso são adequados para medir vibrações de altas frequências (PEDOTTI et al., 2019).

2.3.2 ACELERÔMETROS PIEZORESISTIVOS

Acelerômetros piezoresistivos são construídos de materiais piezoresistivos que possuem a propriedade de converter o estresse mecânico em variação de resistência. Esse tipo de sensor é caracterizado por uma excelente linearidade e baixa impedância de saída (GHEMARI, 2017).

A operação dos acelerômetros piezoresistivo é baseada na segunda lei de Newton. Uma aceleração externa resulta em uma força sendo exercida sobre uma massa de prova. Essa força resulta em uma deformação nas hastes de sustentação da massa de prova constituídas de material piezoresistivo (exemplo, silício) que resultam em uma variação de resistência. Essa variação de resistência é medida utilizando circuitos de ponte de *Wheatstone* (TRAN, 2012). Acelerômetros piezoresistivos são adequados para medição de baixas frequências (0Hz até 750Hz) (PEDOTTI et al., 2019).

2.3.3 ACELERÔMETROS MEMS

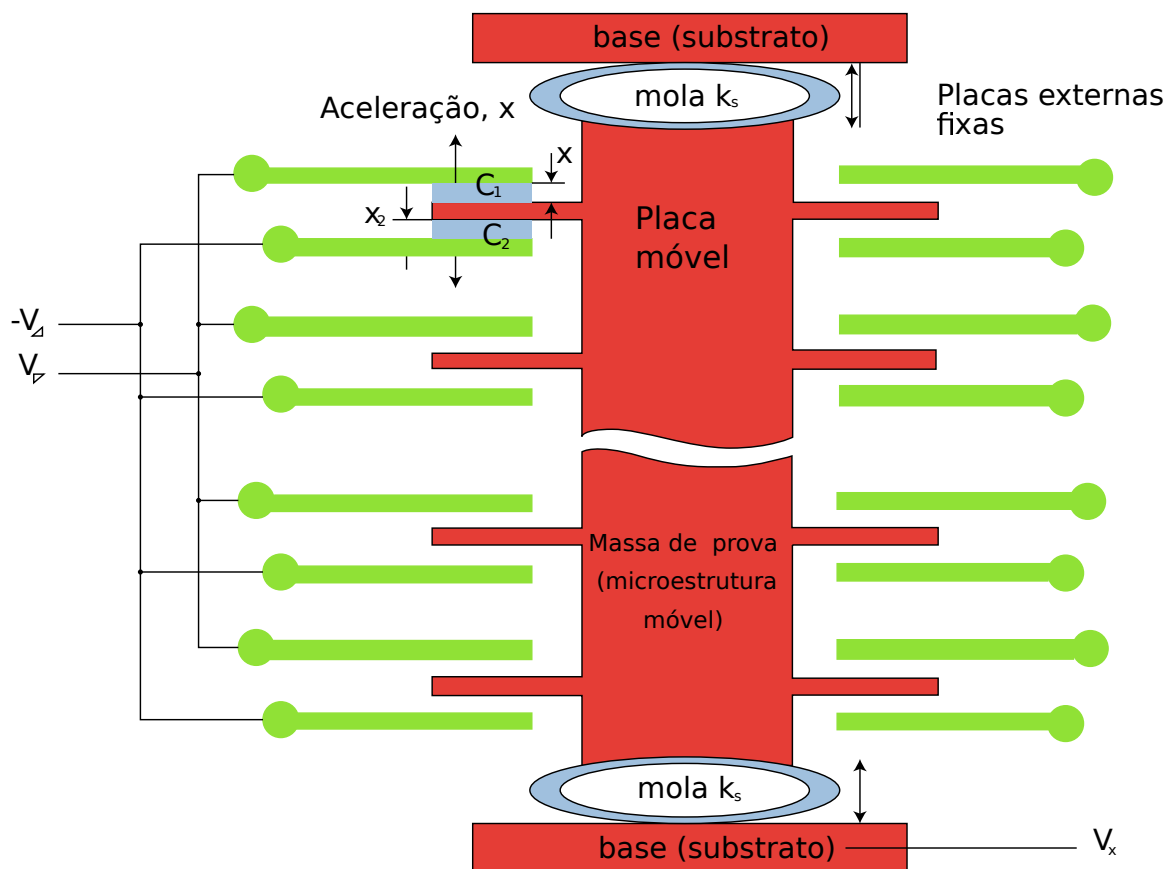
Sistemas *Micro ElectroMechanical Systems* (MEMS) consistem em uma tecnologia de fabricação. Acelerômetros MEMS utilizam tecnologia de micro fabricação com processos análogos aos processos de fabricação de semicondutores e circuitos integrados para fabricação de microdispositivos discretos ou integrados, como micro sensores e micro atuadores (GONZÁLEZ, 2014).

Acelerômetros MEMS foram propostos em 1960 e comercializados em 1982 quando a indústria automotiva apresentou o conceito de *airbag*. Os acelerômetros MEMS eram

utilizados para identificar colisões. Em 1991 a companhia *Analog Devices* passou a produzir um acelerômetro para sistemas de *airbag* onde sistemas mecânicos e eletrônicos foram sintetizados no mesmo chip. A mesma companhia anos mais tarde introduziu um giroscópio no mesmo chip, capaz de funcionar com sistema de posicionamento global de um automóvel para criar mapas e direções mais precisas para os motoristas (ETHW, 2017). Atualmente acelerômetros do tipos MEMS estão presentes em muitos dispositivos de eletrônica de consumo como *smartphones*, *tablet*, *smartwatch* e controle remoto de videogames.

Quando comparados com acelerômetros piezoelétricos, os MEMS além de serem muito compactos, o que facilita a sua utilização, também apresentam menor custo. Os acelerômetros MEMS têm ganhado cada vez mais espaço nas mais diversas aplicações como, por exemplo, monitoramento de estruturas, monitoramento de condições de máquinas e sistemas de navegação inercial. Acelerômetros do tipo MEMS podem ser divididos em acelerômetros piezoresistivos e capacitivos. Dentre os dois, os acelerômetros do tipo MEMS capacitivos se destacam dos piezoresistivos por ter menor sensibilidade a excitações térmicas. Com isso o sensoriamento por capacitância fornece uma faixa de temperatura de operação mais ampla (VARANIS et al., 2018).

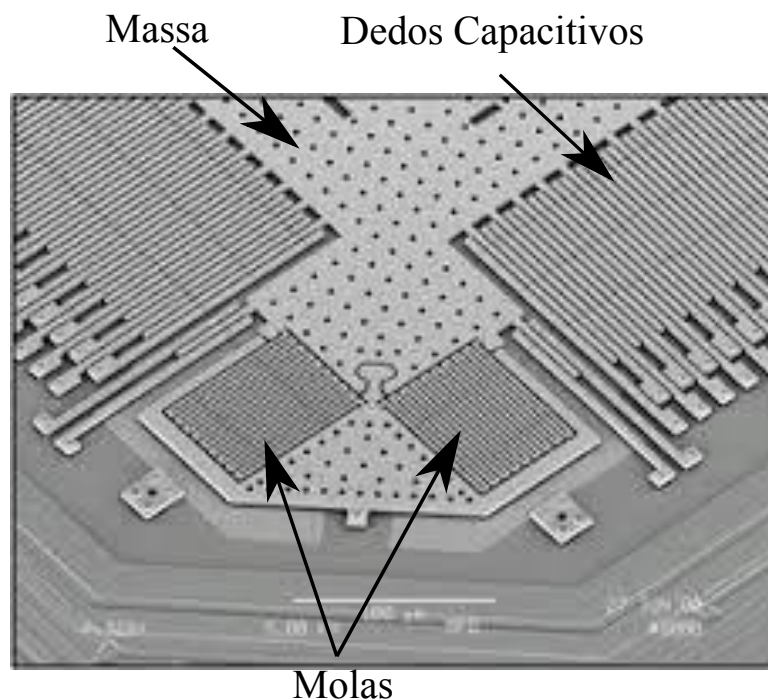
Figura 5 – Diagrama de um acelerômetro integrado do tipo MEMS.



Fonte: Adaptado de (DEWESOFT, 2021).

O acelerômetros capacitivos do tipo MEMS possui três estruturas fundamentais para seu funcionamento: a massa de prova móvel, a região de molas e as estruturas fixas ou

Figura 6 – Imagem microcópica do acelerômetro integrado MEMS.



Fonte: Adaptado de (ACAR; SHKEL, 2003).

dedos capacitivos (Figuras 5 e 6). Existem dedos capacitivos nos dois lados do acelerômetro. Quando o sensor está em repouso, a capacitância é igual em ambos os lados da massa de prova ou massa inercial. O *design* do acelerômetro permite o movimento lateral da massa inercial. Quando ocorre uma aceleração, a massa se desloca para o lado oposto da aceleração sofrida, então a capacitância formada entre os dedos da massa e as estruturas fixas é alterada. Assim a aceleração é medida através da leitura diferencial das alterações de capacitância de ambos os lados (TEZ; AKIN, 2013). A sensibilidade do acelerômetro é proporcional ao deslocamento da massa de prova e inversamente proporcional ao espaço entre os eletrodos (PEDOTTI et al., 2019).

Acelerômetros integrados MEMS medem aceleração tipicamente em unidades g , onde a unidade g é equivalente à aceleração da gravidade da Terra (aproximadamente $9,81 \text{ m/s}^2$). Os acelerômetros multi-eixos podem assim medir a orientação da gravidade diretamente, mas eles também respondem à aceleração linear devido ao movimento. Os acelerômetros multi-eixos têm o mesmo princípio de funcionamento de um acelerômetro com apenas um eixo (Shaeffer, 2013).

2.4 DISPOSITIVOS PARA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES

No mercado já existem vários sistemas para medição de vibrações. A maioria desses sistemas são compostos por acelerômetros piezoelétricos e não possuem a transmissão de dados *wireless*, porém permitem que dados sejam transferidos par computador via cabo USB. A faixa de aceleração que esses sistemas conseguem medir varia muito, de $\pm 4 g$

até mais de 200 g dependendo da aplicação. Ainda, alguns sistemas fornecem medidas de aceleração, deslocamento e velocidade (em RMS, pico-a pico e pico). Exemplos de medidores encontrados no mercado são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Alguns medidores de vibrações encontrados no mercado para comercialização.

Dispositivo	Características	Custo aproximando
VM-6360	Portátil, utiliza acelerômetro piezoelétrico com base magnética. É capaz de realizar medições de velocidade de 0-199 mm/seg, 0-20 g . Deslocamento de 0,04-80 mil, possui display LCD de 4 dígitos (INSTRUMETS, 2018a).	R\$2.644,89
VM-220	Portátil, unidades de medidas selecionável, alimentação por bateria de íon de lítio, memória para 100 medições. Mede aceleração (até 200 g), velocidade(até 200 mm/s) ou deslocamento (até 180 μm). Fornece medidas RMS, pico, pico a pico. Possui display LCD nítido de alto desempenho (INSTRUMETS, 2018b).	R\$4.459,73
HHVB82	Portátil, leituras RMS ou Vibração máxima de 10Hz a 1kHz. Mede aceleração até 200 m/s^2 e velocidade até 200 mm/s. Possui sensor de vibração com suporte magnético(OMEGA, 2021).	R\$7.580,00
Fluke 805	Portátil, escala com 4 níveis que indicam a gravidade do problema para vibração, os dados podem ser exportados via USB. Medição de vibração geral (10Hz a 1000Hz), para aceleração, velocidade e deslocamento. Medição de temperatura. Possui memória com capacidade de armazenar até 3.500 medições. Possui tala grande com alta resolução (FLUKE, 2021).	R\$16.306,38

3 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO

O dispositivo para medição de vibração desenvolvido é composto por uma placa de processamento, aquisição e transmissão de dados e dois acelerômetros do tipo MEMS, sendo um embarcado na placa de aquisição e um externo que pode ser conectado e desconectado do sistema. A placa de processamento e aquisição contém, além de um acelerômetro, um microcontrolador, um controlador de carga para bateria de íon de lítio, circuitos de condicionamento de sinal para leitura dos dados de aceleração obtidos através do sensor externo, circuito de condicionamento de tensão e circuito para gravação e depuração do microcontrolador. A Figura 7 mostra todos os módulos que foram implementados no sistema bem como o esquema simplificado de conexão entre eles.

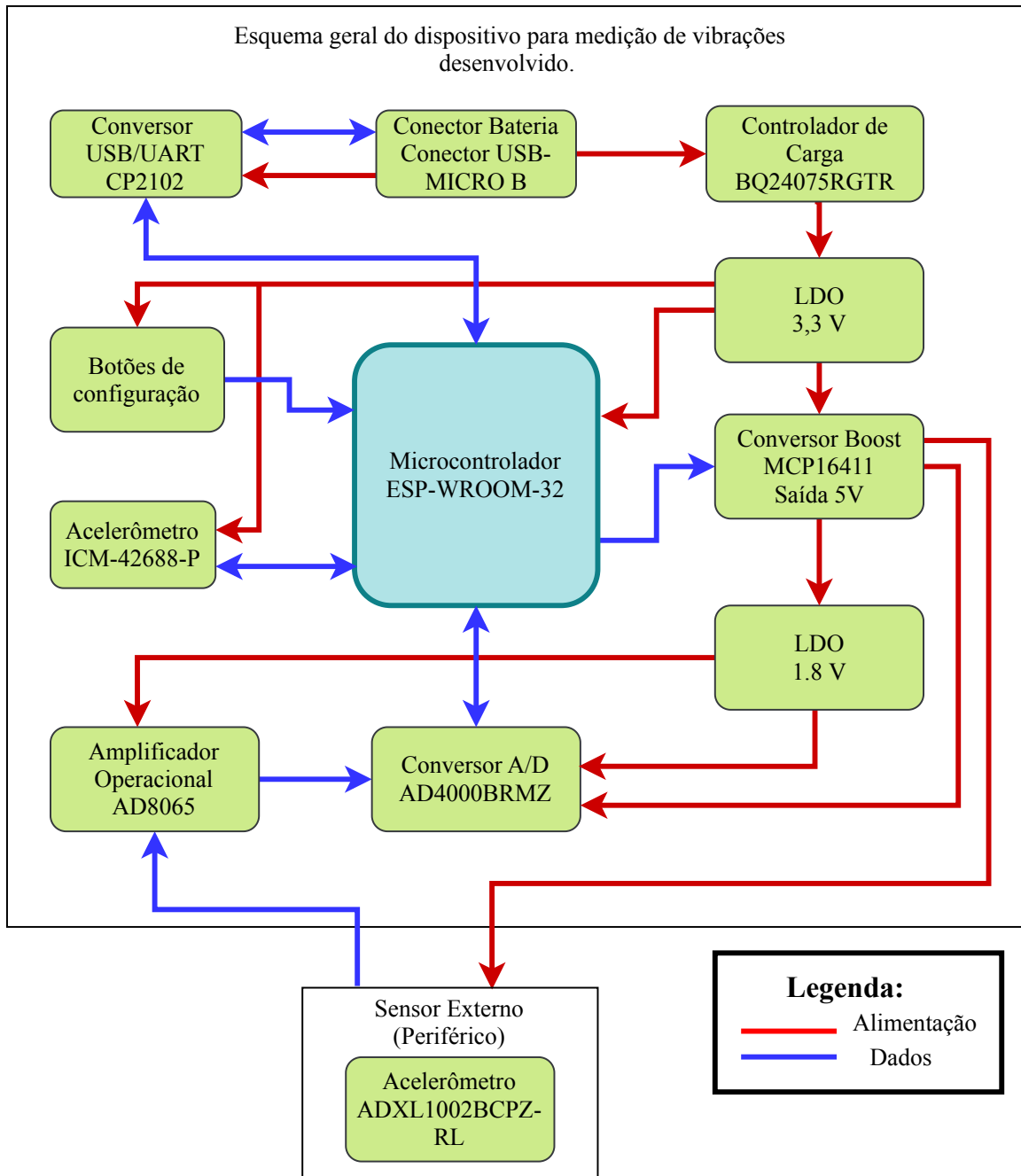
Para a leitura dos dados, controle do sistema, processamento e envio de dados para um dispositivo final utilizou-se o microcontrolador ESP32-WROOM-32. Este consiste em um SoC (do inglês, *System on Chip*) o qual possui uma unidade de processamento, memória, módulo Wi-Fi e Bluetooth em um mesmo dispositivo, o que facilitou a implementação do dispositivo. Os dados de aceleração fornecidos pelos acelerômetros depois de digitalizados são lidos pelo microcontrolador através do protocolo de comunicação SPI (do inglês, *Serial Peripheral Interface*). Depois de lidos são enviados para o dispositivo final através de Wi-Fi onde são realizadas as análises, dispensando qualquer tipo de conexão física entre os dispositivos de medição e de análise.

Os dados de aceleração são coletados através de dois acelerômetros, o ICM-42688-P e o ADXL1002. O primeiro consiste em um acelerômetro triaxial e fornece os dados já digitalizados com 16 bits de precisão. Já o acelerômetro ADXL1002 consiste em um acelerômetro analógico uniaxial. Ambos são acelerômetros do tipo MEMS. Implementou-se o sistema para medição de vibração de maneira que o ADXL1002 pudesse ser conectado ou desconectado conforme necessidade. Sua principal aplicação é para medições que necessitem de maior precisão, maior faixa dinâmica de amplitude, maior frequência e medições em locais de difícil acesso. Sua conexão se dá através de um cabo blindado com aproximadamente 2 metros de comprimento.

O acelerômetro ADXL1002 fornece níveis de tensão que são proporcionais à intensidade de vibração e à sua tensão de alimentação, sendo que a cada $1g$ de variação de aceleração a saída do acelerômetro varia 40 mV quando alimentado com uma tensão de 5 V . Como a variação de tensão é consideravelmente pequena para cada unidade de aceleração, fez-se necessário a amplificação do sinal antes de digitalizá-lo. Para isso projetou-se um circuito para amplificação do sinal. Na digitalização do sinal utilizou-se um conversor analógico-digital com uma precisão de 16 bits.

O dispositivo desenvolvido possui a opção de alimentação direta por uma fonte externa com tensão de 5 V conectada através de conector USB-MICRO B, ou por uma bateria de íon de lítio com tensão nominal de $3,7\text{ V}$. A bateria inicia o processo de carga sempre que a fonte externa de alimentação é conectada ao dispositivo. Para gerenciamento

Figura 7 – Esquema geral do dispositivo para medição de vibrações desenvolvido.



Fonte: Elaborada pelo autor.

de carga da bateria utilizou-se o controlador de carga BQ24075RGTR. Para alimentação de cada módulo do sistema foram utilizados reguladores lineares de tensão LDO (do inglês, *Low-Dropout Regulator*) para adequação dos níveis de tensão.

Por fim, para gravação, configuração do ESP32, bem como para *debug* utilizou-se o conversor USB-UART. A descrição da implementação de cada módulo mostrado na Figura 7, bem como a implementação do *software* embarcado para o funcionamento do dispositivo será feita de forma detalhada a seguir.

3.1 DESCRIÇÃO DO HARDWARE IMPLEMENTADO

3.1.1 SENSOR ICM-42688-P

O sensor ICM-42688-P consiste em um dispositivo para rastreamento de movimentos de seis eixos que combina acelerômetros e giroscópios do tipo MEMS. Possui um acelerômetro e um giroscópio de três eixos. Sendo que o acelerômetro é responsável pela medição da aceleração linear nos eixos x, y e z, e o giroscópio responsável pela medição da aceleração angular nos eixos x, y e z.

O ICM-42688-P utiliza massas de prova separadas para cada eixo, sendo capaz de medir aceleração linear nos três eixos separados até a amplitude de $\pm 16g$. Possui também quatro faixas programáveis de amplitude e sensibilidade, como pode-se ver na Tabela 3. Além disso, pode resistir a impactos com aceleração de até 20 g . Quando o ICM-42688-P é colocado em uma superfície plana, ele mede 0g nos eixos x, y e +1g no eixo z. O fator de escala é calibrado na fábrica e independe da tensão de alimentação do sensor (INVENSENSE, 2020).

Os valores de aceleração dos eixos x, y e z coletados através do ICM-42688-P são digitalizados por meio de três conversores analógico-digitais e armazenados em registradores internos. O tamanho de cada registrador é de 8-bits, sendo que a precisão dos acelerômetros é de 16-bits. Portanto, cada dado coletado é dividido e armazenado em dois registradores, um para os bits mais significativos e outro para os menos significativos. Os dados são armazenados na forma de complemento de dois. A comunicação com todos os registradores do dispositivo é realizada através do protocolo SPI com uma taxa máxima de 24 MHz .

O sensor ICM possui modo de operação de baixo ruído. Nesse modo, tem-se uma densidade espectral de ruído de $70 \mu g/\sqrt{Hz}$ e um consumo estático de 0,28 mA . Isso considerando tensão de alimentação de 1,8 V e apenas os 3 eixos do acelerômetro ativos. Em *sleep mode* possui um consumo de 7,5 μA (INVENSENSE, 2020).

Operando no modo de baixo ruído o acelerômetro ICM-42688-P pode alcançar uma taxa de saída de dados (*Output Data Rate*) de até 32 kHz . Porém, para este trabalho, configurou-se uma taxa de saída de dados máxima de 4 kHz . Quanto às configurações de escalas para a amplitude de aceleração, serão feitas através de *software* no qual o usuário poderá configurar a amplitude desejada.

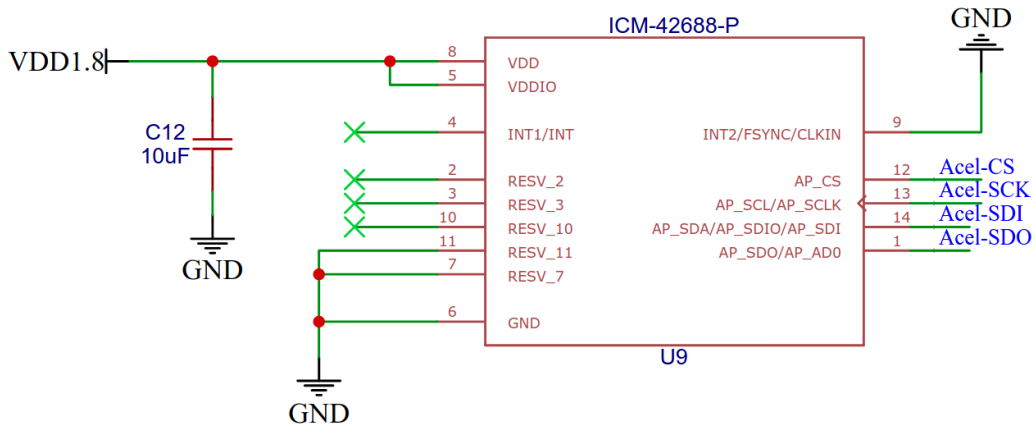
Todas as conexões elétricas do acelerômetro ICM-42688-P foram realizadas con-

Tabela 3 – Especificações de aceleração e sensibilidade do acelerômetro ICM-42688-P.

Amplitude	Sensibilidade
$\pm 2g$	16.384 LSB/ g
$\pm 4g$	8.192 LSB/ g
$\pm 8g$	4.906 LSB/ g
$\pm 16g$	2.048 LSB/ g

Fonte: (INVENSENSE, 2020)

Figura 8 – Esquema de conexão do acelerômetro ICM-42688-P.



Fonte: Elaborada pelo autor.

forme informações obtidas no *Datasheet* do chip e podem ser vistas na Figura 8. O acelerômetro foi alimentado com tensão de 1,8 V, as conexões Acel-CS, Acel-SCK, Acel-SDI e Acel-SDO são referentes ao protocolo de comunicação SPI e são conectadas no microcontrolador ESP32-WROOM 32.

3.1.2 ACELERÔMETRO ADXL1002BCPZ-RL

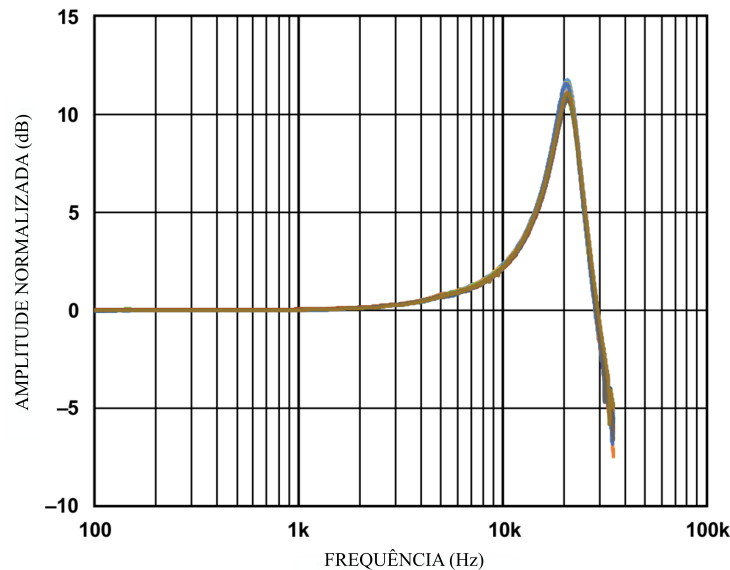
O acelerômetro ADXL1002BCPZ-RL consiste em um acelerômetro MEMS uniaxial de alta frequência, baixo ruído e de fácil integração, sendo que possui as dimensões de $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 1,8\text{mm}$. Implementou-se o sistema para medição de vibração de maneira que o ADXL1002 pudesse ser conectado ou desconectado conforme necessidade. Sua principal aplicação é para medições que necessitem de maior precisão, maior faixa dinâmica de amplitude, maior frequência e medições em locais de difícil acesso.

O ADXL1002 possui uma densidade espectral de ruído ultrabaixa de $25 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ para a faixa de 100 Hz até 10 kHz , possui frequência de ressonância em 21 kHz , tem sensibilidade estável e repetível, é capaz de medir acelerações com amplitude de $\pm 50 g$ e de suportar choques com aceleração de até $10.000 g$. Este acelerômetro é otimizado para monitoramento de condições industriais e manutenção preditiva para medição de vibrações em máquinas ou sistemas (DEVICE, 2017). A Figura 9 mostra a resposta de frequência do acelerômetro ADXL1002.

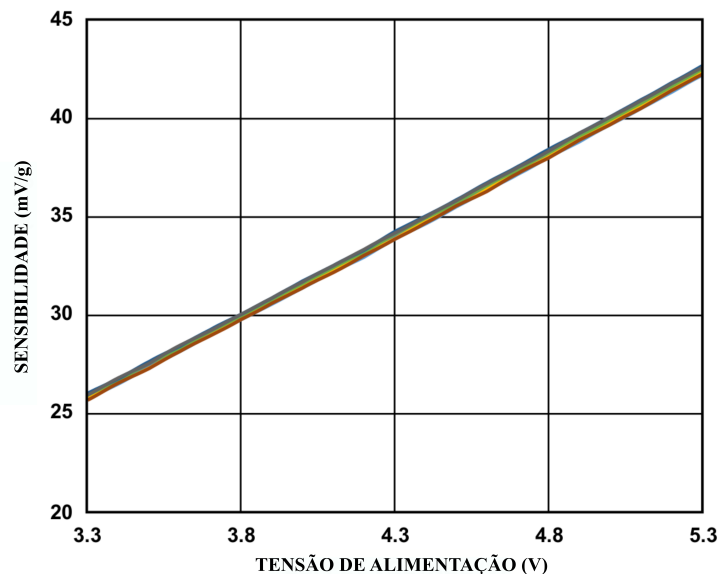
O baixo ruído e a largura de banda de alta frequência permitem a medição de padrões de vibração causados por pequenos movimentos de peças, como rolamentos internos, e a sua grande faixa de amplitude de aceleração fornece a faixa dinâmica a ser usada em ambientes de alta vibração tais como sistemas de aquecimento, ventilação, ar-condicionado, equipamentos e máquinas pesadas (DEVICE, 2017).

O ADXL1002 possui saída analógica ratiométrica em relação à tensão de alimentação (V_{DD}). Portanto, a sensibilidade de saída varia proporcionalmente à tensão de

Figura 9 – Resposta de frequência do acelerômetro ADXL1002.



Fonte: Adaptado de (DEVICE, 2017)

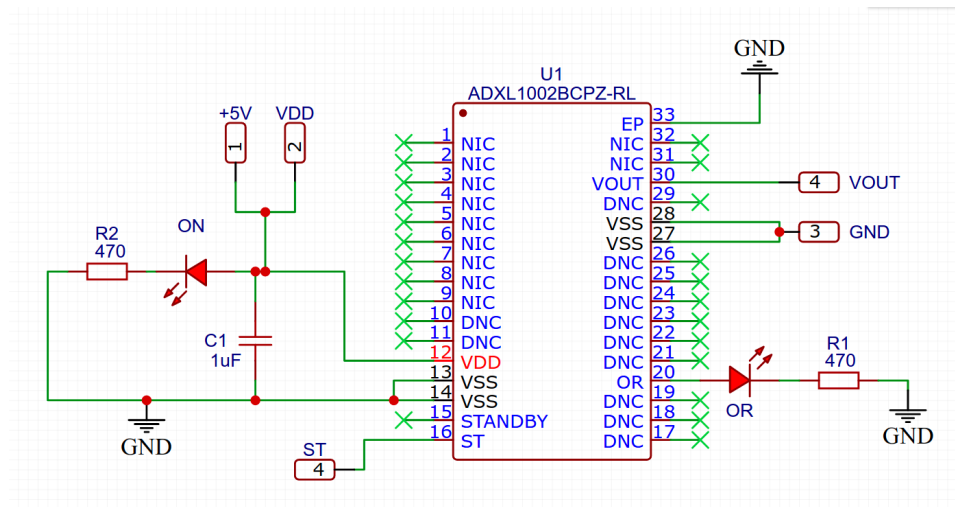
Figura 10 – Sensibilidade *vs* Tensão de alimentação.

Fonte: Adaptado de (DEVICE, 2017)

alimentação. Quando $V_{DD} = 5V$, a sensibilidade é de saída é 40 mV/g . Na Figura 10 pode ser visto o gráfico da sensibilidade de saída do acelerômetro *versus* a tensão de alimentação, para a faixa de tensão mínima até a tensão máxima de alimentação ($3,3V$ até $5,25V$, respectivamente) (DEVICE, 2017).

Para montagem e ligação do acelerômetro ADXL1002BCPZ-RL projetou-se uma placa de circuito separada da placa de aquisição. Isso permite que o sensor possa ser conectado e desconectado do medidor de vibração conforme necessidade, além de dar mais maleabilidade ao sistema. Sua conexão se dá através de um cabo blindado com

Figura 11 – Esquema de conexão do acelerômetro ADXL1002BCPZ-RL.



Fonte: Elaborada pelo autor

aproximadamente 2 m de comprimento.

Na Figura 11 pode-se ver o esquema de ligação do acelerômetro ADXL1002BCPZ-RL, bem como os pinos de entrada e saídas disponíveis para conexão e testes. As ligações elétricas foram realizadas conforme informações coletadas no *Datasheet* do componente.

3.1.3 CIRCUITO PARA CONVERSÃO ANALÓGICO-DIGITAL

Sinais analógicos presentes no mundo real como vibração, temperatura, pressão e luz, requerem precisão no condicionamento do sinal antes de qualquer processamento ou conversão para o domínio digital (MOGHIMI, 2011). Tendo em vista isso, já que o dispositivo desenvolvido tem o objetivo de medir vibrações, e possui dois acelerômetros sendo um analógico, fez-se necessário o projeto de um circuito de condicionamento de sinal.

Para o projeto do circuito de condicionamento primeiro definiu-se as características da saída do acelerômetro. Através do gráfico mostrado na Figura 10 encontrou-se a relação

Tabela 4 – Especificações da saída do acelerômetro ADXL1002BCPZ-RL.

Parâmetro	Especificação
Largura de banda do sinal	100 Hz-10kHz
Amplitude máxima de aceleração a ser medida	$\pm 20 g$
Tensão de alimentação (V_{DD})	5 V
Sensibilidade	40 mV/g
Amplitude do sinal	0,8 V _p
Densidade de Ruído(g)	25 $\mu g/\sqrt{Hz}$
Densidade de Ruído (V)	645,8225 nV/ \sqrt{Hz}
Ruído RMS	64,58225 μV

Fonte: Elaborado pelo autor

entre a sensibilidade e a tensão de alimentação do acelerômetro. Esta relação é dada pela Equação 3.1.

$$\text{Sensibilidade} = ((8,3333 \times 10^{-3}) \times V_{DD} - (1,666 \times 10^{-3})) [V/g] \quad (3.1)$$

Substituindo V_{DD} (tensão de alimentação) por $5V$ na Equação 3.1 calculou-se a sensibilidade do acelerômetro. Com a sensibilidade calculada, definiu-se as condições de trabalho desejadas com base nos limites do acelerômetro informados em (DEVICE, 2017). Com essas informações montou-se a Tabela 4.

Da Tabela 4, sabe-se que a amplitude do sinal para uma aceleração de $20g$ é $0,8V_p$. Com isso, calculou-se os requisitos do conversor analógico digital (ADC, do inglês *Analog-to-Digital Converter*), sendo eles: relação sinal ruído (SNR, do inglês *Signal-to-noise ratio*) e o número efetivo de bits (ENOB, do inglês *Effective number of bits*) dados pelas Equações 3.2 e 3.3, respectivamente. Além disso, pelo critério de Nyquist, sabe-se que a taxa de amostragem de qualquer sinal deve ser no mínimo duas vezes a máxima frequência do sinal amostrado. Sendo assim, de início pode-se afirmar que o conversor ADC deve possuir uma taxa de amostragem de no mínimo $20kSPS$ (amostras por segundo) já que pretende-se medir sinais de aceleração com frequências de até $10kHz$.

$$SNR = 20 \times \log \left(\frac{V_{RMS}}{Ruido_{RMS}} \right) = 20 \times \log \left(\frac{\frac{0,8V}{\sqrt{2}}}{64,58225\mu V} \right) = 78,85 dB \quad (3.2)$$

$$ENOB = \frac{SNR - 1,76}{6,02} = \frac{78,85 - 1,76}{6,02} = 12,8 bits \quad (3.3)$$

Conforme (MOGHIMI, 2011), a densidade de ruído de todo o projeto do circuito de condicionamento de sinal não deve exceder $1/10$ da densidade de ruído da saída do sensor. Portanto, tomando a densidade de ruído do sensor mostrada na Tabela 4 sabe-se que todo o circuito de condicionamento deve ter uma densidade espectral de ruído máxima de $64,58225 nV/\sqrt{Hz}$.

De acordo com as informações calculadas, SNR , $ENOB$, densidade máxima de ruído e taxa de amostragem necessária para amostragem do sinal, escolheu-se o conversor AD4000 para o projeto. A escolha deu-se por pelo fato de ter atendido requisitos calculados, tendo uma taxa de amostragem maior que $20KSPS$, um $SNR > 78,85 dB$, $ENOB > 12,8 bits$ e a densidade espectral de ruído $< 64,58225 nV/\sqrt{Hz}$.

O conversor AD4000 consiste em um conversor de baixo ruído, de arquitetura SAR (do inglês, *Successive Approximation Register*), possui uma taxa de amostragem de até $2MSPS$ e permite comunicação via protocolo de comunicação SPI. As principais características do conversor AD4000 em relação a desempenho e ruído podem ser vistas na Tabela 5.

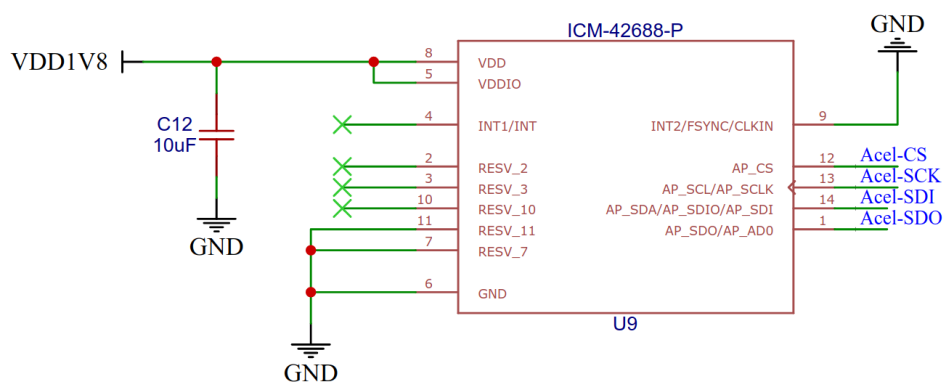
Tabela 5 – Principais características do conversor analógico digital AD4000.

Parâmetro	Especificação
Tensão de alimentação	1,8 V
Tensão de referência (V_{REF})	2,5 até 5 V
Resolução	16 bits
Tempo de conversão típico	250 ns
Frequência de amostragem	2 MSPS
Erro de linearidade	$\pm 0,2$ LSB
SNR	93 dB
Ruído RMS	$37 \mu V_{RMS}$
Densidade de ruído	$37 \eta V/\sqrt{Hz}$
THD	-115 dB
SINAD	92,5 dB

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 12 pode-se ver o esquema de ligação do ADC. As ligações elétricas foram realizadas conforme informações coletadas no *Datasheet* do componente. Sendo VDD1V8, VDD5V e VDD3V3 as tensões de alimentação, de referência e da interface de entrada/saída, respectivamente. Já os pinos VIO, SDI, SCK, SDO e CNV são conectados ao barramento SPI do microcontrolador e são utilizados para comunicação entre o conversor e o microcontrolador. Por último, o pino IN+ consiste no terminal por onde o sinal analógico entra depois de passar pelo estágio de amplificação.

Figura 12 – Esquema de conexão do conversor analógico digital AD4000.



Fonte: Elaborada pelo autor

Com base na tensão de referência que definiu-se para o conversor ADC (5 V), tem-se que definir o ganho para o circuito de amplificação de modo que a amplitude do sinal seja compatível com a faixa de tensão do conversor, o que maximiza a precisão da conversão. Sendo assim, da Tabela 4 sabe-se que amplitude do sinal para uma aceleração de 20 g é $0,8 V_p$, caso a amplitude do sinal for maior que $0,8 V_p$, ou seja, a aceleração for superior a 20 g o amplificador saturará. Isso não é um problema já que pretende-se trabalhar com acelerações com amplitude máxima de 20 g. Com base nas informações conhecidas utilizou-se

da Equação 3.4 para calcular o máximo ganho do circuito de amplificação do sinal.

$$G_{AMPOP} = \left(\frac{V_{REF}}{2 \times Amplitude_{sinal}} \right) = \left(\frac{5V}{2 \times 0,8V} \right) = 3.125 \approx 3 \quad (3.4)$$

Para preservar o desempenho do ruído de transição e SNR do conversor AD4000 selecionado para a aplicação deve-se manter o ruído do bloco de ganho o mais baixo possível. Entretanto, é válido ressaltar que o amplificador amplificará o ruído juntamente com o sinal. Com isso, a fim de manter o ruído antes e depois do bloco de amplificação, deve-se selecionar o amplificador e componentes que tenham ruído muito baixo (MOGHIMI, 2011).

Como a densidade total de ruído do circuito de condicionamento de sinal não pode exceder $64,58225 \text{ nV}/\sqrt{Hz}$, tem-se que projetar um bloco de ganho com ruído muito baixo. Para isso utilizou-se um fator de 3, já que o ganho do amplificador será de 3. Isso permitirá que o ruído do amplificador seja muito menor que o nível de ruído inserido pelo sensor. Sendo assim, tem-se que o ruído total permitido e o ruído do conversor ADC, ambos referidos à entrada do amplificador, dão-se pelas Equações 3.5 e 3.6, respectivamente.

$$Ruído_{Total_IN} = \left(\frac{64,58225 \text{ nV}/\sqrt{Hz}}{3} \right) = 21,5274 \text{ nV}/\sqrt{Hz} \quad (3.5)$$

$$Ruído_{ADC_IN} = \left(\frac{37 \text{ nV}/\sqrt{Hz}}{3} \right) = 12,3333 \text{ nV}/\sqrt{Hz} \quad (3.6)$$

Para calcular a margem de ruído permitido no bloco de ganho assumiu-se que o ruído total permitido na entrada do amplificador operacional consiste na soma do ruído do amplificador adicionado ao ruído do conversor ADC, dado pela Equação 3.7. Com isso, determinou-se a densidade de ruído permitido no bloco de ganho através da Equação 3.8.

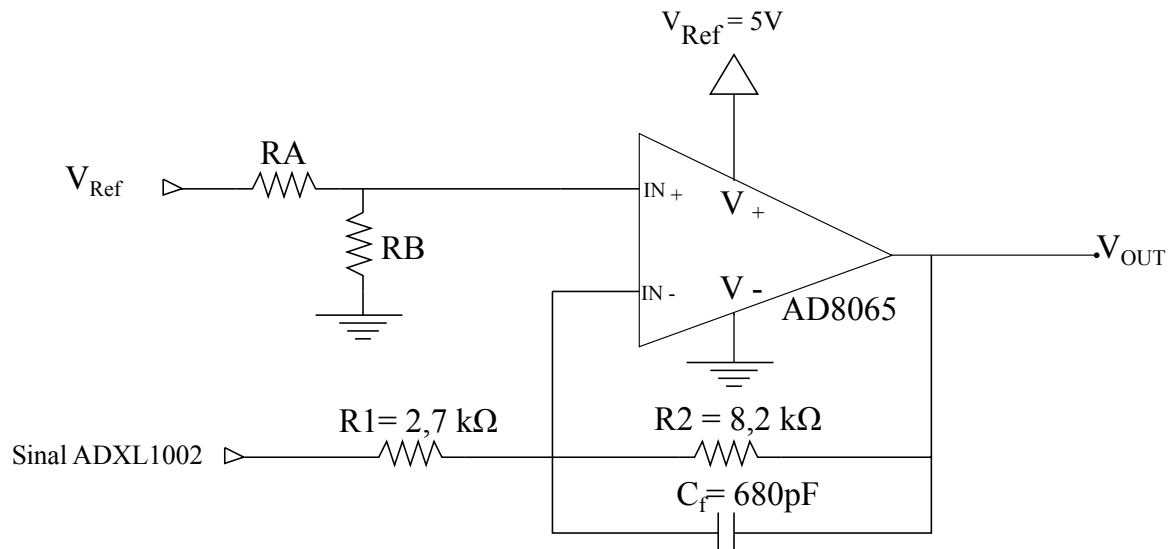
$$(Ruído_{Total_IN})^2 = (Ruído_{ADC_IN})^2 + (Ruído_{Ampop_IN})^2 \quad (3.7)$$

$$Ruído_{Ampop_IN} = \sqrt{(21,5274 \text{ nV}/\sqrt{Hz})^2 - (12,3333 \text{ nV}/\sqrt{Hz})^2} = 17,6444 \text{ nV}/\sqrt{Hz} \quad (3.8)$$

Tendo conhecido o ruído permitido no bloco de amplificação do circuito de condicionamento, escolheu-se o amplificador operacional AD8065. Para seleção do AD8065 considerou-se o produto de ganho de largura de banda (GBWP, do inglês *Gain-Bandwidth Product*) a fim de que o amplificador possa processar o sinal do acelerômetro com o menor erro CC e CA possível. Para um bom GBWP deve-se levar em conta a largura de banda do sinal, o ganho de ruído e o erro de ganho.

O AD8065 consiste em um amplificador de alto desempenho com entradas FET (do inglês, *Field Effect Transistor*). Possui uma faixa de tensão de alimentação de 5 V a 24 V, permite a operação com alimentação única e largura de banda de 145 MHz. O

Figura 13 – Esquemático do circuito de amplificação utilizando o amplificador AD8065.



Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 6 – Valores dos componentes e informações de ruído do amplificador para a solução completa do bloco amplificador.

Componente	Valor
R1	2,7 kΩ
R2	8,2 kΩ
Vn	7 nV/√Hz
In	0,6 fA/√Hz
Cf	680 pF

Fonte: Elaborado pelo autor

esquemático do circuito de amplificação com todos os componentes pode ser visto na Figura 13.

Configurou-se o amplificador como um filtro ativo passa-baixa com frequência de corte em 30 kHz e com um ganho de 3, como definiu-se anteriormente. Utilizou-se um divisor resistivo composto pelos resistores RA e RB para dividir a tensão de referência (5 V), de modo a tornar o nível CC da saída do amplificador compatível com o nível CC de entrada do conversor analógico digital ($V_{Ref}/2$). Com os componentes ativos e passivos definidos, tendo conhecido o ruído de tensão de entrada (V_n) e o ruído de corrente de entrada (I_n) do AD8065 montou-se a Tabela 6 que sintetiza as principais informações da solução completa do bloco de ganho.

Todos os componentes ativos e passivos geram ruídos. Com isso, torna-se de extrema importância entender todas as fontes de erro do circuito. De modo alcançar o melhor SNR deve-se levar em consideração todas as fontes de ruído. O ruído total do bloco de ganho é dado pela Equação 3.9 (MOGHIMI, 2011), sendo que K é a constante de Boltzmann, T temperatura em Kelvin e R_{eq} refere-se à resistência equivalente da associação em paralelo dos resistores RA e RB.

$$Ruído_{Ampop_IN} = \left(Vn^2 + 4KTR1 \left(\frac{R2}{R2 + R1} \right)^2 + In_+^2 (R_{eq})^2 + \right. \\ \left. In_-^2 \left(\frac{R1 \times R2}{R1 + R2} \right)^2 + 4KTR2 \left(\frac{R1}{R1 + R2} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3.9)$$

Inicialmente desconsiderou-se o ruído inserido por R_{eq} . Considerando a temperatura de operação igual a temperatura ambiente, aproximadamente, de 25 °C ou 298,15 K e utilizando os valores listados na Tabela 6 na Equação 3.9, calculou-se a densidade de ruído na entrada do amplificador, cujo resultado é mostrado na Equação 3.10.

$$Ruído_{Ampop_IN} = 9,079914 \text{ nV}/\sqrt{Hz} \quad (3.10)$$

O valor encontrado desconsiderando o valor de R_{eq} mostrado na Equação 3.10 satisfaz a condição de ruído máximo permitido no bloco de ganho calculado anteriormente através da Equação 3.8. Sendo assim, para estipular o valor máximo da resistência equivalente referente à associação paralela de RA e RB de forma a otimizar o consumo de corrente no divisor de tensão, isolou-se na Equação 3.9 a variável R_{eq} .

$$R_{eq} = \frac{1}{In_+} \left((Ruído_{Ampop_IN})^2 - Vn^2 - 4KTR1 \left(\frac{R2}{R2 + R1} \right)^2 - \right. \\ \left. In_-^2 \left(\frac{R1 \times R2}{R1 + R2} \right)^2 - 4KTR2 \left(\frac{R1}{R1 + R2} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (3.11)$$

Substituindo-se os valores na Equação 3.11 tem-se que o valor máximo para R_{eq} de modo que não viole a condição dada pela Equação 3.8 é de 13,6310 $M\Omega$ como mostrado na Equação 3.12. Com isso, para implementação do sistema utilizou-se RA=RB= 1 $M\Omega$.

$$R_{eq} = 13,6310 M\Omega \quad (3.12)$$

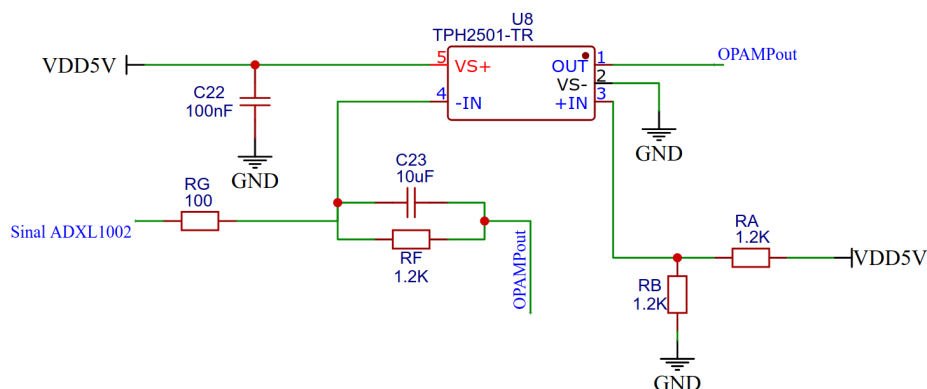
Por último, considerando o valor de R_{eq} recalculou-se o ruído total do bloco de ganho utilizando a Equação 3.9. O resultado pode ser visto na Equação 3.13;

$$Ruído_{Ampop_IN} = 9,099716 \text{ nV}/\sqrt{Hz} \quad (3.13)$$

De modo a conferir o ruído total do circuito de condicionamento projetado, utilizou-se a Equação 3.7 para calcular-se o ruído total do circuito de condicionamento projetado. Com os valores estimados através das Equações 3.6 e 3.13 calculou-se que o ruído total do circuito de condicionamento de sinal projetado referido a entrada do amplificador é de 15,3152 nV/\sqrt{Hz} , ou seja, menor que o ruído máximo permitido referido à entrada de 21,5274 nV/\sqrt{Hz} calculado anteriormente através da Equação 3.5.

$$Ruído_{Total_IN} = 15,32694 \text{ nV}/\sqrt{Hz} \quad (3.14)$$

Figura 14 – Esquema de conexão do bloco de ganho projetado utilizando o amplificador AD8065



Fonte: Elaborada pelo autor

Com todos os componentes no bloco de ganho calculados e o critério de ruído máximo permitido atendido, fez-se o esquema eletrônico do circuito para que o mesmo fosse implementado. O esquemático eletrônico do bloco de ganho projetado é mostrado na Figura 14. Todo o procedimento para os cálculos foram baseados no artigo técnico (*Seven Steps to Successful Analog-to-Digital Signal Conversion*) (MOGHIMI, 2011).

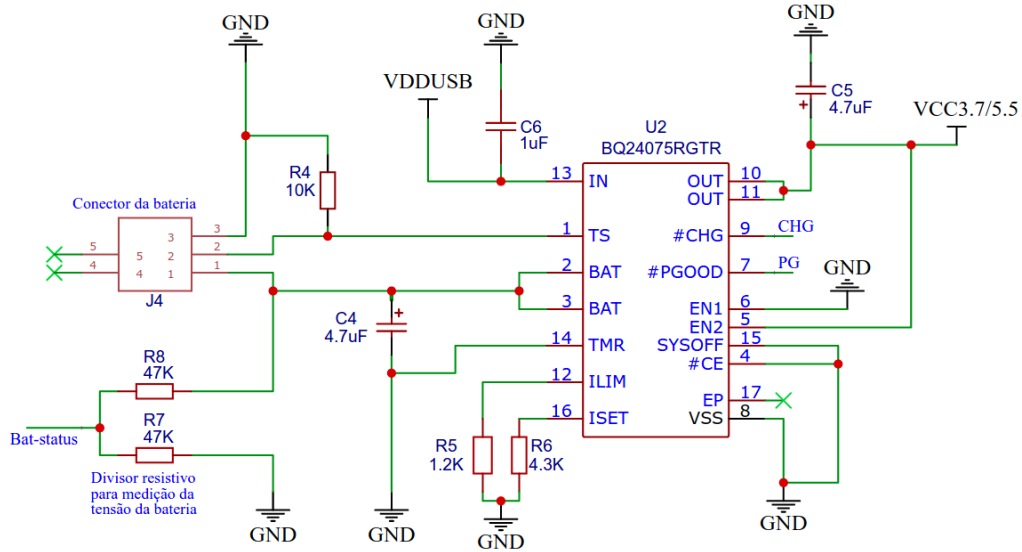
3.1.4 CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO E CONDICIONAMENTO DE TENSÃO

O circuito de alimentação e condicionamento de tensão consiste de um controlador de carga, um regulador linear de tensão com tensão de saída em 3,3 V, um conversor *boost* com tensão de saída de 5 V e um regulador linear de tensão com tensão de saída 1,8 V.

Projetou-se todo o circuito do medidor de vibração para ser alimentado através de uma bateria de íon de lítio com tensão nominal de 3,7 V e tensão máxima de carga de 4,2 V. Devido ao uso de bateria para alimentação do circuito necessitou-se de um controlador de carga para gerenciamento de carga da bateria. Para esse gerenciamento de carga utilizou-se o controlador BQ24075RGTR. Sempre que uma fonte de alimentação válida externa estiver conectada ao medidor de vibrações através do conector USB-MICRO B, a bateria será carregada até atingir a tensão de 4,2 V. Considera-se fonte de alimentação válida toda a fonte que possuir uma tensão estável em 5 V e uma corrente máxima de 1,5 A.

O BQ24075RGTR consiste em um circuito integrado com tamanho reduzido desenvolvido para dispositivo com espaço limitado, muito aplicado em dispositivos portáteis. Este também possui proteção contra sobre tensão, suporta uma corrente de entrada de até 1,5 A. A corrente de entrada bem como a corrente de carga da bateria podem ser controladas através dos resistores conectados nos pinos ILIM e ISET. As relações entre as correntes e os valores de resistências são dadas pelas Equações 3.15 e 3.16 (INSTRUMENTS,

Figura 15 – Esquema de conexão do controlador de carga BQ24075RGTR.



Fonte: Elaborada pelo autor

2014).

$$I_{MAX} = \frac{1550 \Omega A}{R_{ILIM}} \quad (3.15)$$

$$I_{CARGA} = \frac{890 \Omega A}{R_{ISET}} \quad (3.16)$$

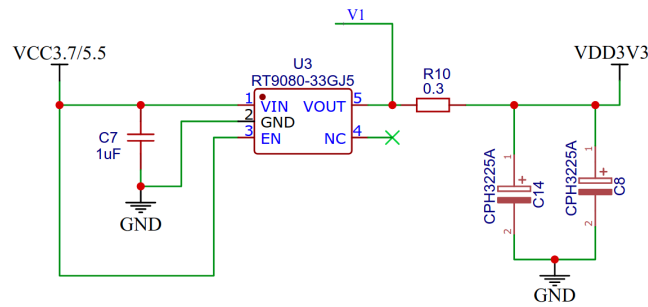
Para o sistema projetado definiu-se a corrente máxima de entrada $I_{MAX} = 1,291 A$ e a corrente de carga da bateria $I_{CARGA} = 0,206 A$. O esquemático de ligação do controlador de carga é apresentado na Figura 15.

O conector J4 serve para conectar a bateria ao medidor de vibração. Os pinos ILIM, ISET, EN1 e EN2 são utilizados para limitar e configurar as correntes de entrada e de carga. Os pinos CHG e PGOOD indicam se a bateria está carregando/carregada e se uma fonte de alimentação válida está conectada, respectivamente. Todas as conexões elétricas do controlador de carga foram realizadas conforme informações que coletou-se em (INSTRUMENTS, 2014).

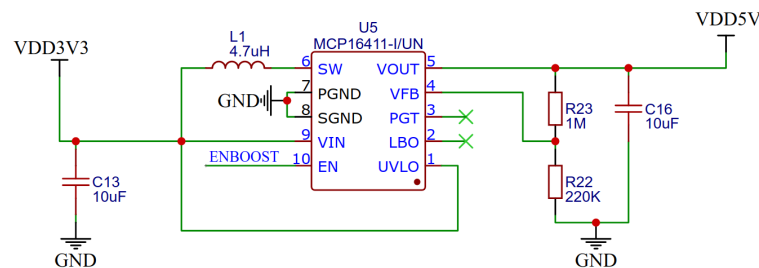
Para a obtenção de informações do nível de bateria utilizou-se uma das entradas analógicas disponíveis no microcontrolador. Para isso, a fim de atender aos limites de tensão dos pinos de entrada do microcontrolador, utilizou-se um divisor de tensão dado pelos resistores R7 e R8, mostrados na Figura 15.

A tensão disponível na saída do controlador de carga é responsável por alimentar todos os demais módulos eletrônicos do medidor de vibração. Essa tensão pode variar significativamente. Quando tem-se a bateria e uma fonte de alimentação externa conectada, ou seja, bateria carregando, o controlador de carga disponibiliza em sua saída para alimentação do circuito eletrônico uma tensão regulada de 5,5 V e uma tensão de carga

Figura 16 – Esquema de conexão do regulador de tensão RT9080-33GJ5.

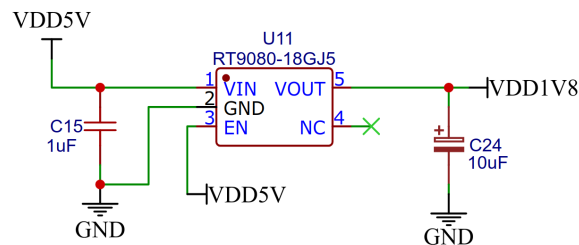


Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 17 – Esquema de conexão do conversor *boost* MCP16411.

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 18 – Esquema de conexão do regulador de tensão RT9080-18GJ5.



Fonte: Elaborada pelo autor

para bateria de 4,2 V. Quando o sistema é alimentado através da bateria a tensão na saída do controlador de carga é igual à tensão da bateria.

Devido a grande variação de tensão na saída do controlador de carga, necessitou-se a utilização de um regulador linear de tensão para estabilização e adequação dos níveis de tensão. Para isso utilizou-se o regulador RT9080-33GJ5 com tensão de saída regulada em 3,3 V. O esquema de ligação do regulador RT9080-33GJ5 é mostrado na Figura 16.

O resistor R10 que pode ser visto na Figura 16 possui uma resistência de 0,3 Ω e é utilizado para medição de corrente elétrica consumida pelo circuito. Para isso conectou-se a saída V1 e a saída VDD3V3 em duas entradas analógicas do microcontrolador, permitindo realizar a medição da diferença de tensão entre os pontos V1 e VDD3V3. Conhecendo-se o valor da resistência R10 e a diferença de tensão entre os pontos de medição torna-se possível calcular e monitorar o consumo de corrente do sistema desenvolvido.

No circuito de conversão analógica digital já descrito, utiliza-se tensões de 5 V para alimentação do sensor ADXL10002 e também como tensão de referência para o conversor AD4000 e o amplificador AD8065. Ainda, para o conversor AD4000 necessita-se de tensão de 1,8 V para alimentação. Tendo em vista a necessidade dos níveis de tensão de 5 V e 1,8 V utilizou-se um conversor *boost* com saída ajustável para elevar a tensão da saída do regulador RT9080-33GJ5 de 3,3 V para 5 V, e um segundo regulador de tensão com saída de tensão fixa em 1,8 V.

Para elevação da tensão de 3,3 para 5 V utilizou-se o conversor *boost* MCP16411. O MCP16411 possui uma arquitetura projetada para baixa tensão permitindo que o regulador dê partida de uma tensão de entrada baixa sem alta corrente de pico ou excesso de tensão de saída (tensão mínima 0,85 V).

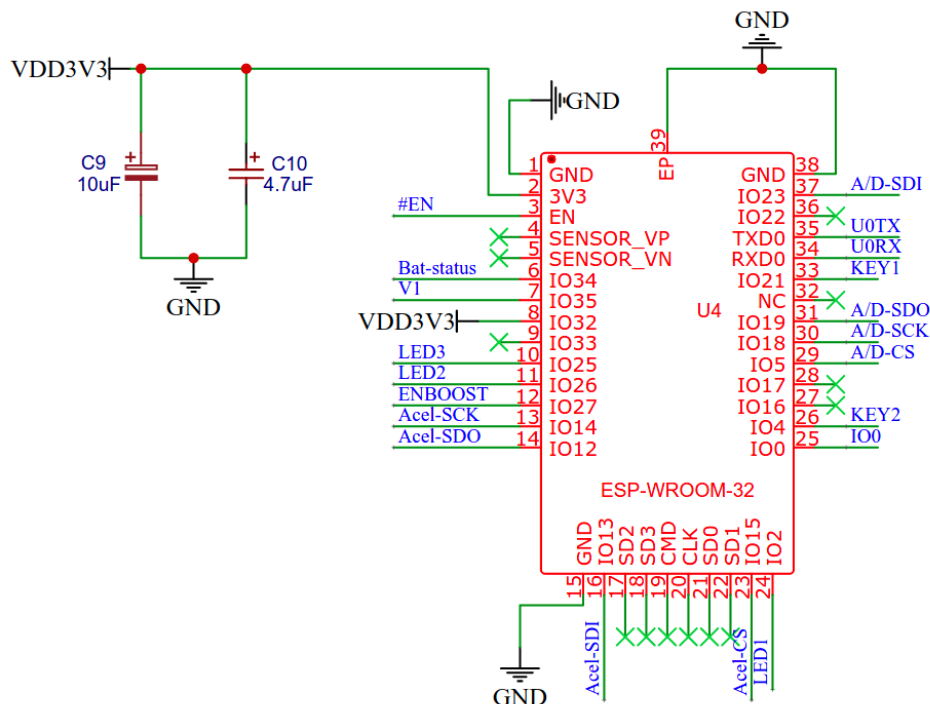
A saída de tensão do conversor *boost* utilizado pode ser ajustada através da relação entre o resistor R23 e R22. Essa relação é dada pela Equação 3.17.

$$R23 = R22 \times \left(\frac{V_{OUT}}{0,97V} - 1 \right) \tag{3.17}$$

Resolvendo a equação em relação a R22 e R23 tem-se que para uma tensão de 5 V na saída $R23 = R22 \times 4,1546$. O esquema de ligação elétrica do conversor *boost* e do regulador de tensão 1,8 V podem ser vistos nas Figuras 17 e 18.

3.1.5 MICROCONTROLADOR ESP32-WROOM-32

Figura 19 – Esquema de conexão do microcontrolador ESP32-WROOM-32.



Fonte: Elaborada pelo autor

O ESP32-WROOM-32 é um módulo microcontrolador genérico e poderoso. O ESP32 é considerado um sistema em um Chip (SoC, do inglês *System on Chip*). Possui Wi-Fi 2,4 GHz e Bluetooth integrados em um mesmo chip, conta ainda com uma memória flash de 4 MB e com dois núcleos de CPU que podem ser controlados separadamente. A frequência de clock da CPU pode ser ajustada de 80 até 240 MHz (SYSTEMS, 2021).

O chip também conta com um coprocessador de baixo consumo que pode ser usado no lugar da CPU para economizar energia ao executar tarefas que não requerem muito poder de computação, como o monitoramento de periféricos. ESP32 possui uma ampla gama de periféricos, como sensores de toque capacitivos, sensores Hall, SD interface de cartão, Ethernet, dois barramentos SPI de alta velocidade, UART, I2S e I2C (SYSTEMS, 2021).

No sistema implementado utilizou-se o ESP32 para controle, leitura e processamento dos dados de aceleração coletados pelos acelerômetros e também para transmissão dos dados de aceleração e tempo para o dispositivo final. Para isso, configurou-se o clock de CPU igual a 80 MHz a fim de otimizar o consumo, já que os requisitos de processamento não são críticos.

Para leitura dos dados de aceleração utilizou-se dois barramentos SPI, sendo um para comunicação com o sensor embarcado ICM40688 e outro para comunicação com o conversor analógico digital AD4000 responsável por digitalizar os valores de aceleração lidos pelo sensor ADXL10002. O esquemático da conexão do microcontrolador ESP32-WROOM-32 é mostrado na Figura 19.

Como pode-se ver na Figura 19, o ESP32 conta com 38 pinos para conexão, sendo que 36 podem ser configurados como entrada/saída para conexão de periféricos. Para implementação do medidor de vibrações, dos 36 pinos disponíveis, utilizou-se 23, os quais são listados e descritos no ANEXO A.

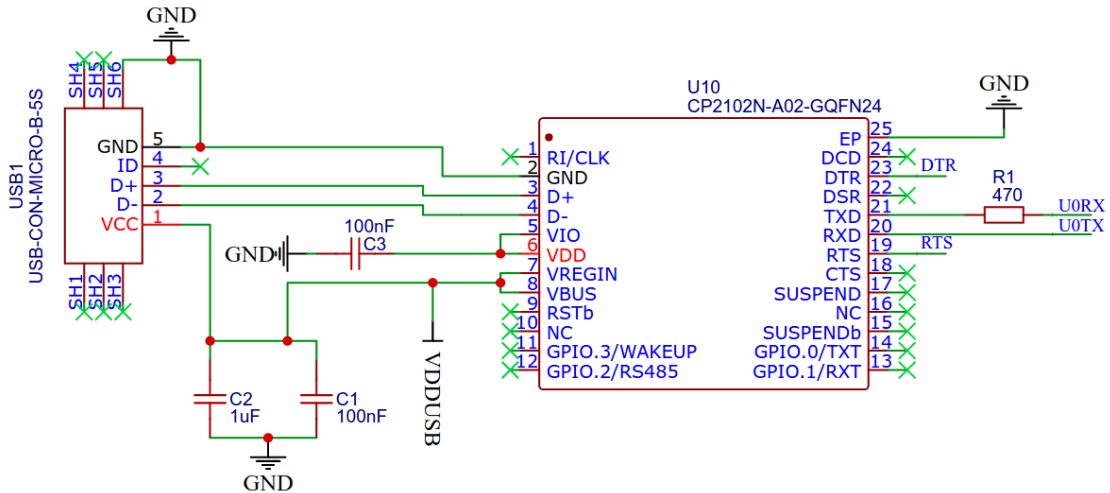
3.1.6 CONVERSOR USB-UART CP2102

O conversor USB-UART resume-se em um circuito integrado que permite uma fácil adaptação do protocolo RS232 para comunicação através de um conector USB. No medidor de vibrações desenvolvido utilizou-se o CP2102 especificamente para interface de gravação e *debugging* do microcontrolador, não tendo nenhuma outra função na aquisição de dados, processamento ou gerenciamento de energia do sistema. A Figura 20 mostra o esquema de ligação do conversor USB-UART CP2102 e também o conector USB-MICRO B.

3.1.7 BOTÕES DE CONFIGURAÇÃO E LEDS

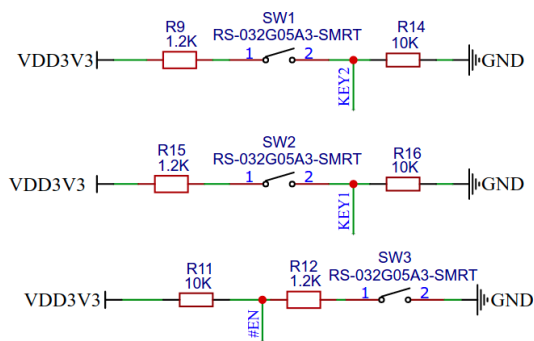
Para inicialização, reinicialização e configuração do sistema implementado utilizou-se três chaves tácteis SW1, SW2 e SW3. O esquema de ligação das chaves é mostrado na Figura 21.

Figura 20 – Esquema de conexão do conversor UART CP2102.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 21 – Esquema de conexão das chaves tácteis de configurações.



Fonte: Elaborada pelo autor

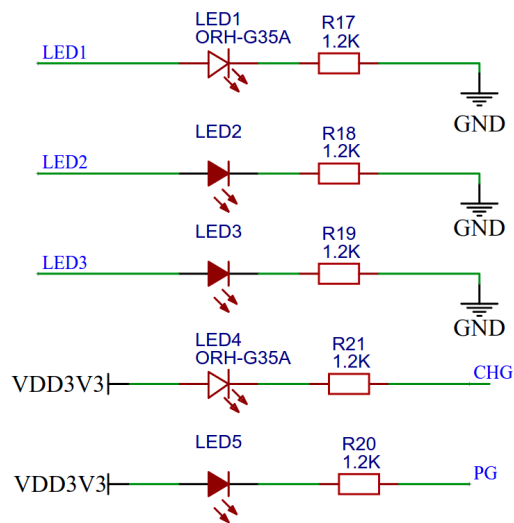
Para indicação do sistema ligado/desligado, bateria fraca, conetado à rede Wi-Fi, bateria carregando e conetado a uma fonte de alimentação externa, respectivamente, utilizou-se cinco leds. Os leds LED1, LED2 e LD3 são controlados pelo microcontrolador sendo possível configurar suas funções. Os dois últimos leds são controlados diretamente pelo controlador de carga BQ24075RGTR. O esquema de ligação dos LEDs é mostrada na Figura 22.

3.1.8 PROTOTIPAÇÃO

Após o dimensionamento, escolha de todos os componentes e a elaboração do esquemático eletrônico, para conclusão do medidor de vibrações fez-se a prototipação do circuito eletrônico. Utilizando-se do *software EasyEDA* (EASYEDA, 2021), fez-se o posicionamento dos componentes e o roteamento das conexões elétricas, tanto para a placa de processamento e aquisição quanto para a placa do sensor ADXL10002. O projeto de ambas as placas eletrônicas é mostrado nas Figuras 23 e 24.

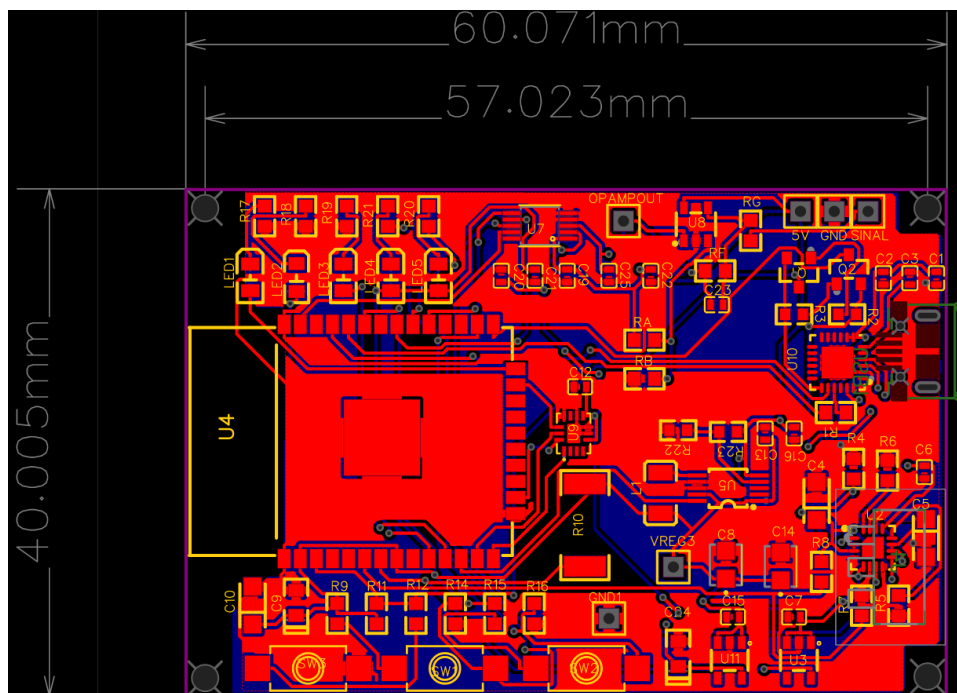
Após o roteamento do circuito eletrônico realizou-se a confecção da placa de circuito impresso e a soldagem dos componentes. Na Figura 25 pode ser vista a placa de processamento e aquisição já em protótipo e com todos os componentes eletrônicos soldados. Também realizou-se a confecção da placa para o sensor ADXL1002, como pode ser visto na Figura 26. A lista completa de componentes utilizados para a implementação eletrônica do medidor de vibração encontra-se disponível no ANEXO B.

Figura 22 – Esquema de conexão dos leds.



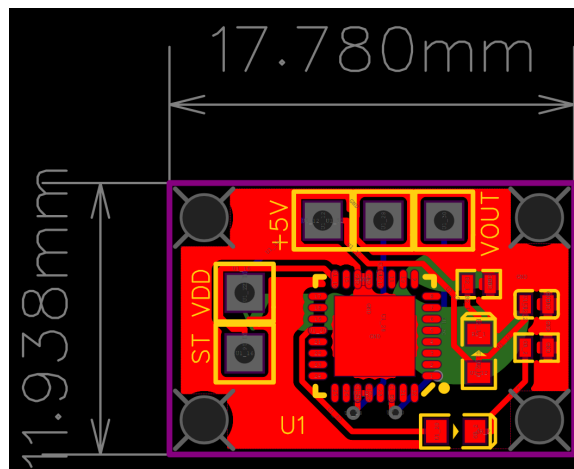
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 23 – Projeto da placa eletrônica de processamento e aquisição de dados com os componentes posicionados e roteamento eletrônico feito.



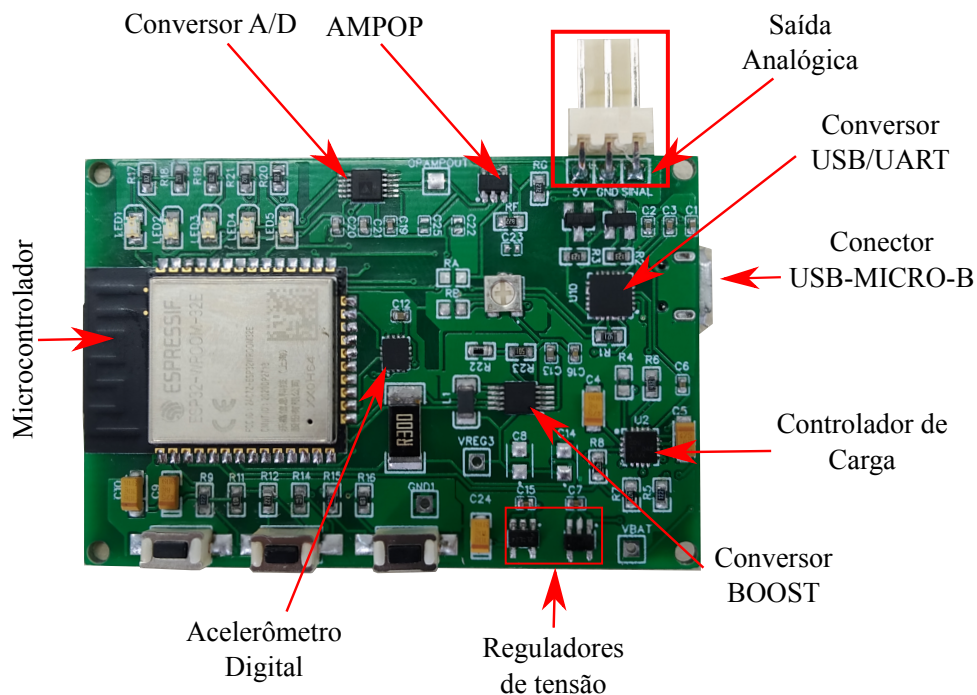
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 24 – Projeto da placa eletrônica para o sensor ADXL1002 com os componentes posicionados e roteamento da placa de circuito impresso.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 25 – Protótipo da placa de processamento e aquisição de dados do medidor de vibrações desenvolvido.



Fonte: Elaborada pelo autor

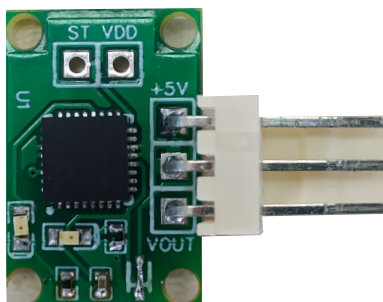
3.2 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE IMPLEMENTADO

3.2.1 SOFTWARE EMBARCADO

Para controle de leitura dos acelerômetros, armazenamento e transmissão dos dados de aceleração e tempo para o dispositivo final, implementou-se no microcontrolador o *software* representado na Figura 27.

Quando o medidor de vibração inicializa pela primeira vez, ou seja, na primeira

Figura 26 – Protótipo da placa para o sensor ADXL1002.



Fonte: Elaborada pelo autor

utilização é possível fazer a configuração da rede que deseja-se que ele se conecte. Depois de feita a configuração inicial o medidor de vibração reinicia e se conecta à rede configurada. Conectado, verifica se há acesso ao servidor. Se sim, certifica-se da existência de atualizações de *software* disponível. Caso positivo, o *software* é atualizado, e se não existir nova atualização disponível o medidor de vibração fica aguardando a conexão com o dispositivo final.

Uma vez estabelecida a conexão com o dispositivo final via Wi-Fi o medidor de vibrações envia as informações de modelo e versão do *software* embarcado. Após isso, aguarda as configurações de escala segundo a Tabela 3 e a taxa de amostragem configuradas através da *interface* de recepção e processamento de dados implementada no computador. Com as configurações recebidas aplica-se então as configurações no sensor. Com o sensor configurado espera-se a recepção da requisição de dados. Tendo recebido a requisição inicia-se a rotina de leitura e envio dos dados de aceleração e tempo. Essa rotina será interrompida apenas quando a requisição de dados for encerrada via *interface* de recepção. Por último verifica-se se a conexão foi fechada. Se fechada o medidor de vibração retorna ao *loop* no qual aguarda conexão com o dispositivo final; se a conexão não for encerrada o sistema retorna ao *loop* onde aguarda as configurações dos sensores.

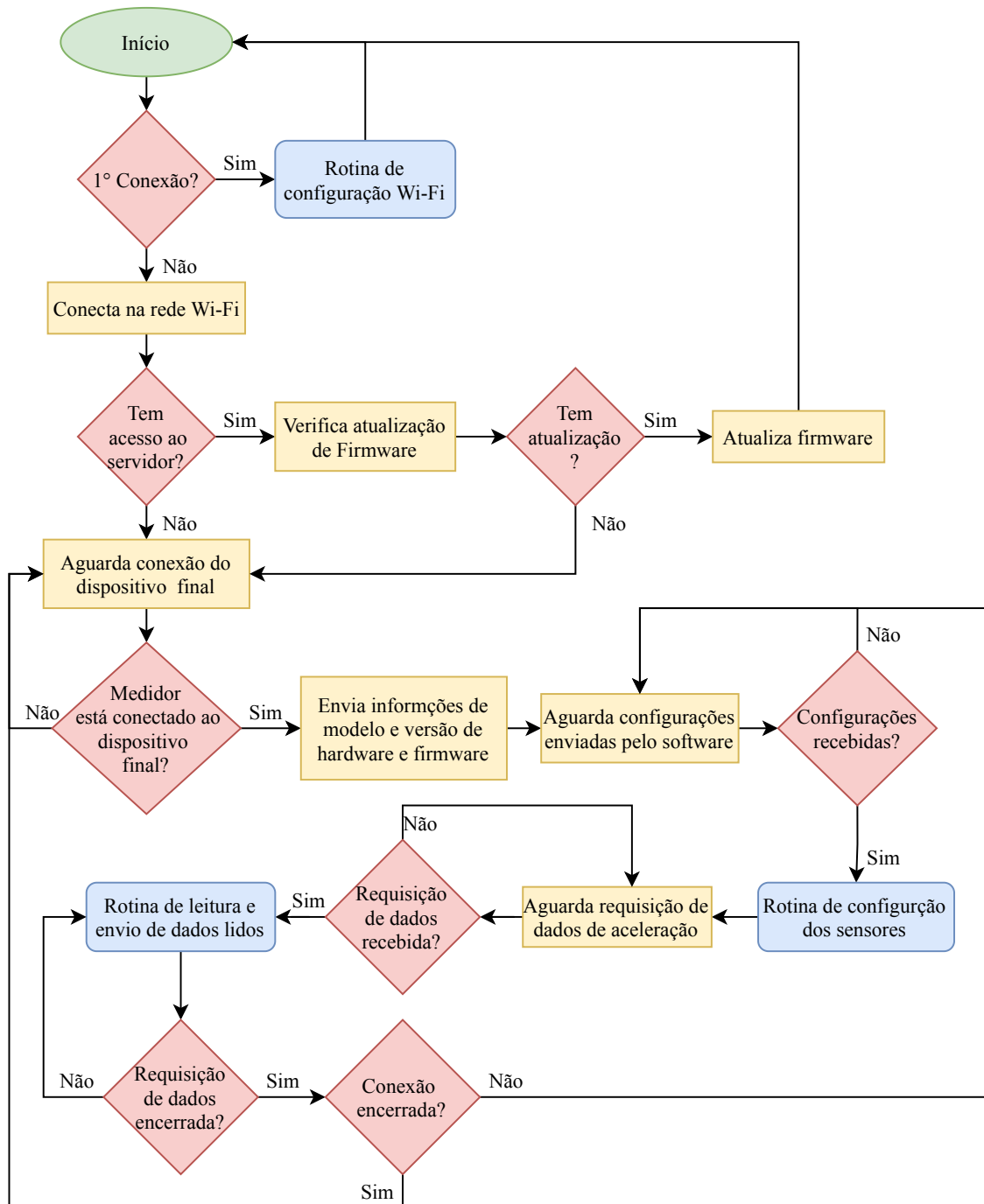
Sempre que o medidor de vibrações não está realizando leituras de aceleração os sensores são desativados de modo a otimizar o consumo de energia do sistema.

3.2.2 SOFTWARE PARA RECEPÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE ACELERAÇÃO

Para recepção e processamentos dos dados de aceleração pelo computador implementou-se uma *interface* em Python, que pode ser vista na Figura 28. Através da interface desenvolvida pode-se configurar o medidor de vibração bem como fazer o processamento e visualização dos dados de velocidade de vibração em RMS.

Com a interface é possível visualizar os dados de velocidade de vibração em RMS nos eixos x e y, velocidade total de vibração em RMS, taxa de aquisição (em amostras por segundo) e *status* da bateria em tempo real. Também através da interface pode-se

Figura 27 – Fluxograma de funcionamento do software embarcado.

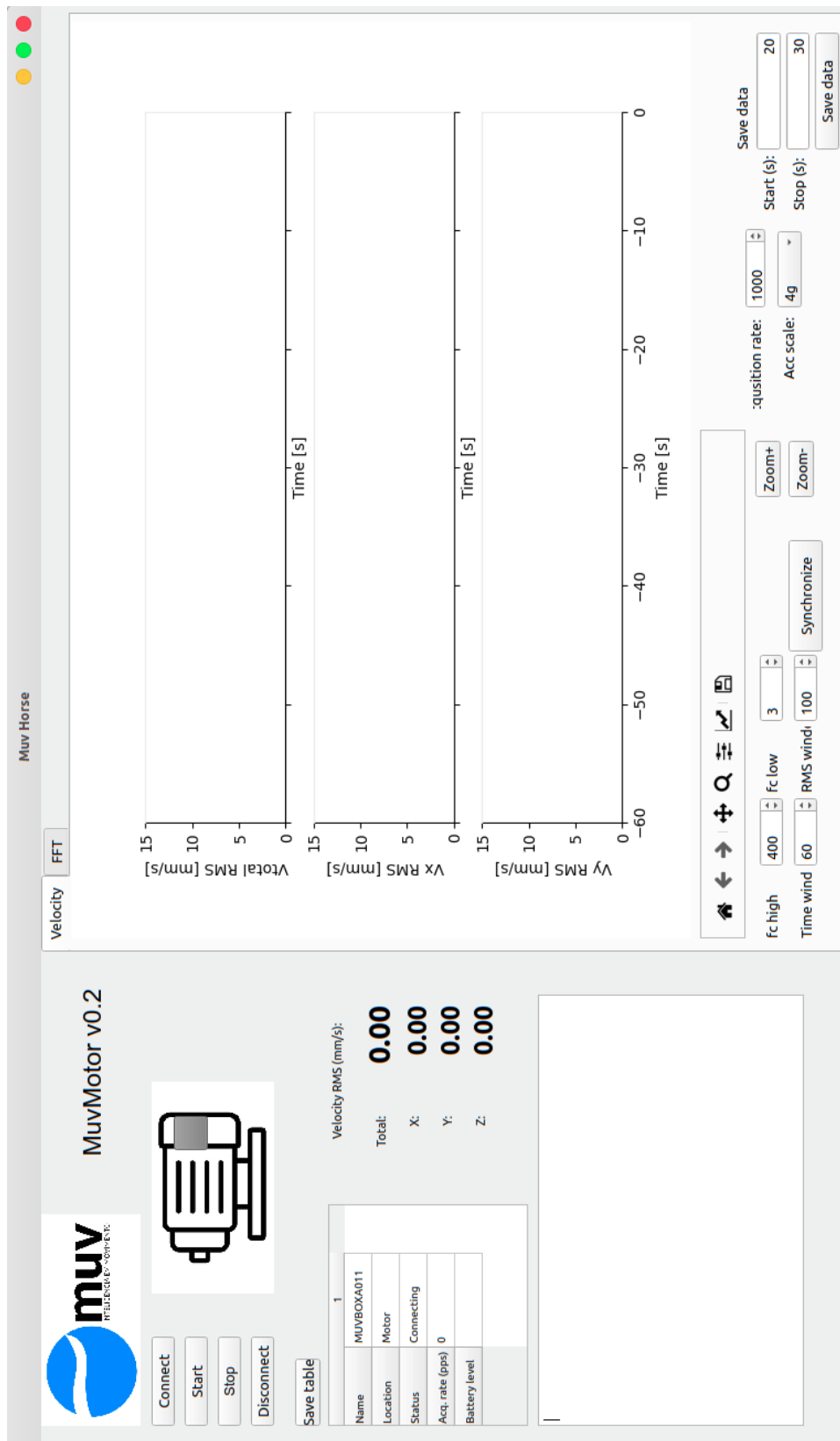


Fonte: Elaborada pelo autor

configurar a escala e a taxa de aquisição de dados desejadas. Na parte de processamento de dados pode-se configurar as frequências de corte dos filtros passa-baixas e passa-alta, o tamanho da janela de dados para realização do cálculo da velocidade em RMS, o tamanho da janela de dados a ser plotado no gráfico. Ainda é possível salvar todos ou uma janela de dados e também os gráficos.

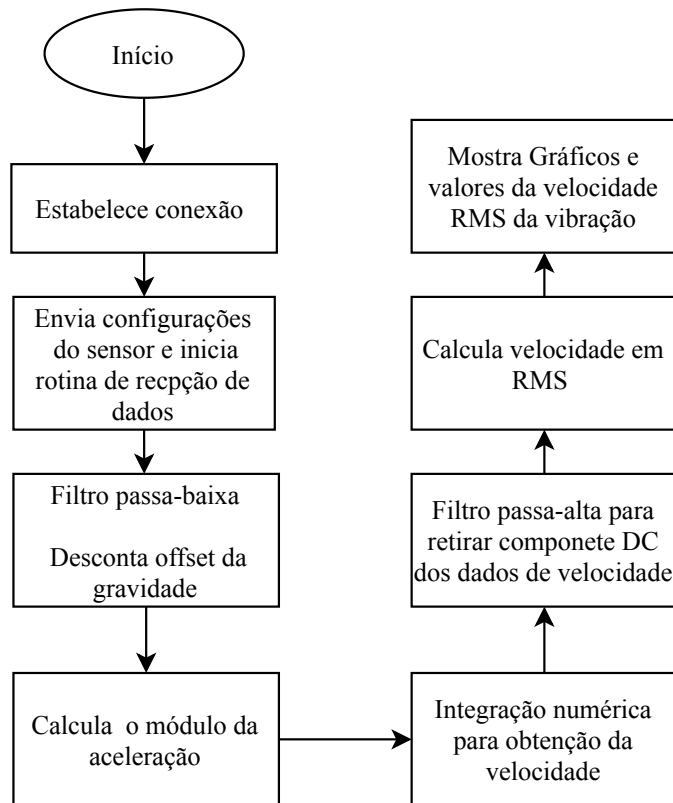
O fluxo de processamento dos dados de aceleração recebidos através da *interface* pode ser visualizado na Figura 29. Primeiro é feita a conexão com o medidor de vibrações

Figura 28 – Interface implementada em Python.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 29 – Fluxograma simplificado do processamento dos dados de aceleração.



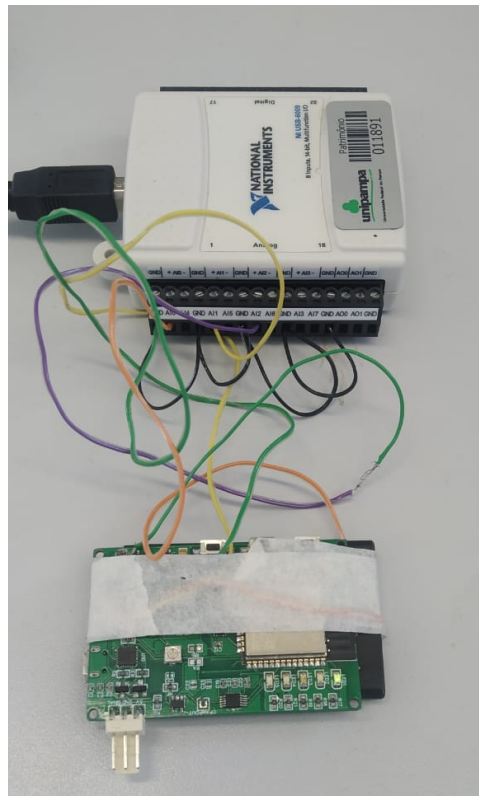
Fonte: Elaborada pelo autor

utilizando o botão de *Connect*. Após conectado, a interface recebe informações do modelo e versão do *software* embarcado implementado no medidor. Em seguida o usuário faz as configurações desejadas de escala e taxa de aquisição e faz a requisição de dados clicando no botão *Start*. Com isso, inicia-se a rotina de recepção dos dados de aceleração. Tendo recebido os dados de aceleração na primeira etapa do processamento passa-se um filtro passa-baixa para eliminar os ruídos de altas frequências e também desconta-se o valor da gravidade. Então calcula-se o módulo da aceleração. Com o resultado realiza-se a integração numérica para obter-se a velocidade. Após a integração numérica utiliza-se um filtro passa-alta para eliminar ruídos de baixa frequência inseridos pela integração numérica. Tendo a informação da velocidade faz-se o cálculo da velocidade RMS. Esse cálculo da velocidade RMS é realizado de modo a adequar a unidade de medida à norma ISO108016, que é milímetros por segundo (mm/s). Por fim, os dados são exibidos na interface implementada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a placa de aquisição montada em protótipo fez-se a gravação do *software* no microcontrolador. Primeiramente verificou-se o funcionamento testando rotinas simples utilizando os leds e os botões implementados na placa de aquisição desenvolvida. Após isso iniciou-se os testes para validação do sistema, onde fez-se o monitoramento do processo de carga da bateria para verificar os níveis de tensão e a corrente de carga. Fez-se ainda o monitoramento com um *datalogger* de todas as tensões do sistema com o medidor de vibrações funcionando e transmitindo dados. Por fim, testou-se a captura de dados de aceleração através do sensor embarcado e do sensor externo e realizou-se teste de leitura de vibração em um motor elétrico instalado em bancada.

Figura 30 – *Setup* para monitoramento de carga, descarga da bateria e níveis de tensão do sistema.

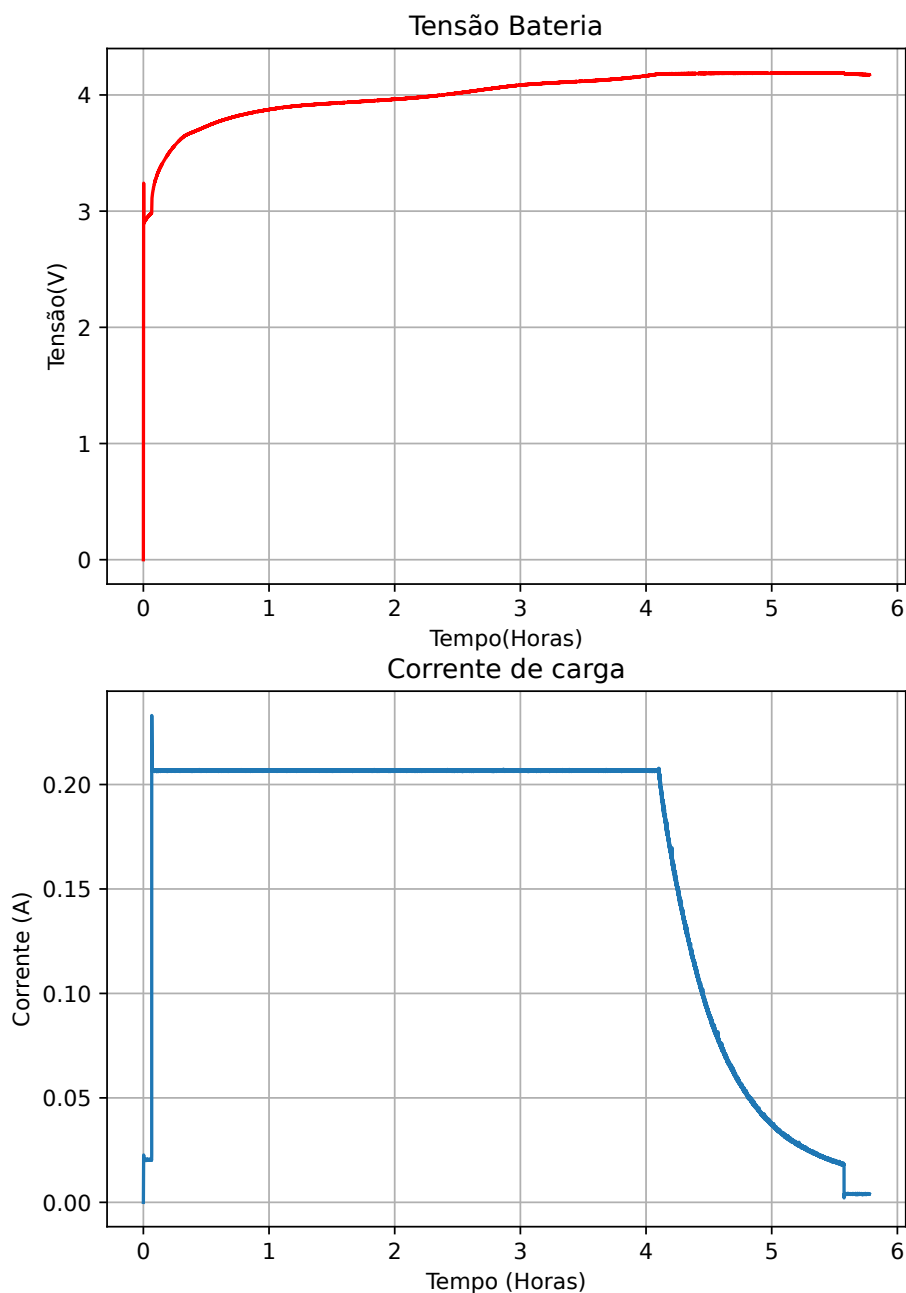


Fonte: Elaborada pelo autor

4.1 TESTE DE CARGA E DESCARGA DA BATERIA

Para o teste de carga e descarga de bateria utilizou-se a bateria modelo BV-5j. A bateria possui uma capacidade de 1560 *mAh*, tensão nominal de 3,7 *V* e consegue fornecer 5,8 *Wh* de energia. Para o monitoramento de carga da bateria utilizou-se um *datalogger* modelo NI USB-6009 (INSTRUMENTS, 2015). O *setup* utilizado para o monitoramento de carga da bateria pode ser visto na Figura 30. Com o *setup* montado conectou-se o medidor de vibrações ao carregador X-cell, modelo Xc-v8/MICRO USB, com saída 5 *V* e

Figura 31 – Tensão da bateria e corrente de carga durante o processo de carga da bateria.



Fonte: Elaborada pelo autor

corrente máxima de $1,5 A$. A conexão deu-se através da porta MICRO-USB B disponível na placa de aquisição do medidor de vibração.

Os dados de tensão e correntes adquiridos através do *Datalogger* foram processados em Python onde gerou-se as curvas de tensão da bateria e corrente de carga. Esse gráfico é mostrado na Figura 31. A bateria, quando iniciou-se o processo de carga, possuía uma tensão de $2,88 V$. Através do gráfico de corrente de carga percebe-se três etapas durante a carga da bateria. Na primeira etapa, tem-se uma corrente de carga muito menor que a corrente nominal de carga configurada. Esta consiste na etapa de pré carga. Na segunda

etapa a corrente de carga é elevada até a corrente configurada, na qual se mantém constante até a bateria se aproximar da tensão final de carga de 4,2 V. Quando a tensão da bateria chega muito próximo da tensão de 4,2 V inicia-se a terceira etapa onde a corrente de carga é reduzida de forma exponencial até o momento que a bateria atinge a tensão final de carga, onde tem-se a suspensão da carga da bateria.

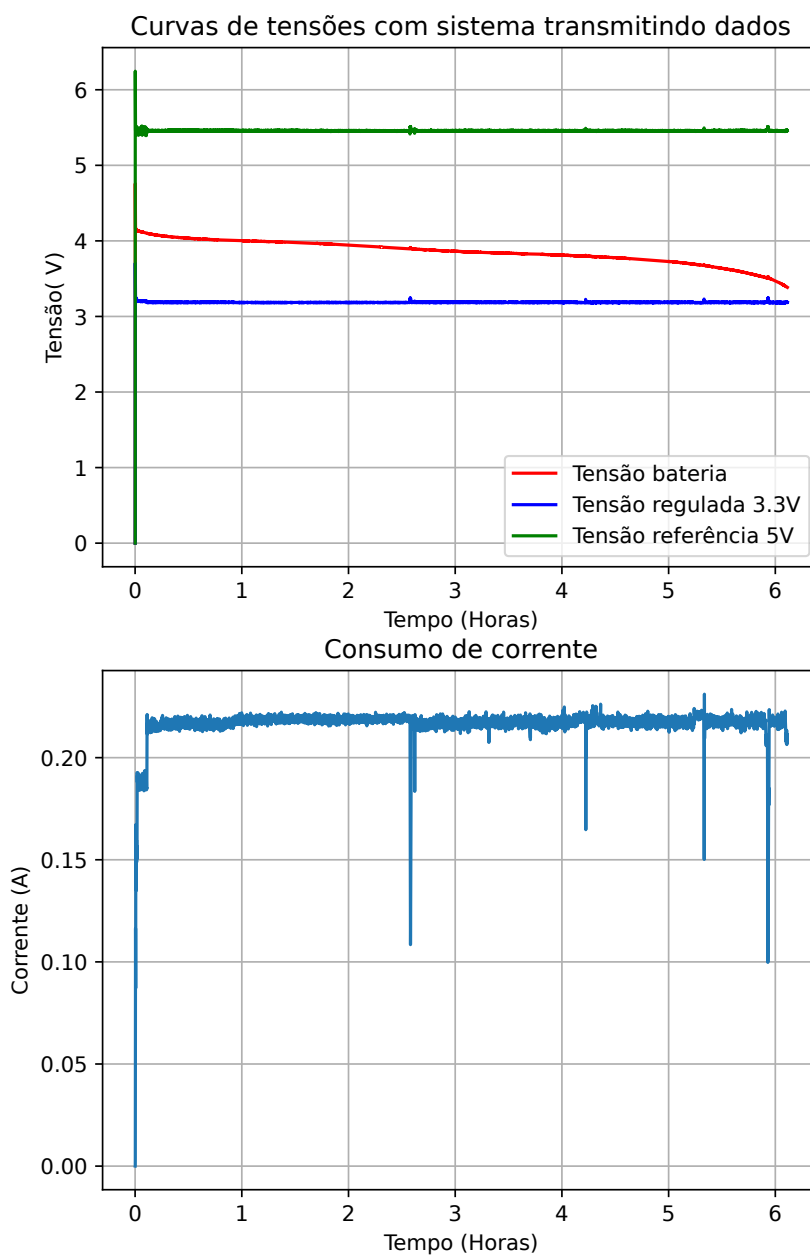
Com o monitoramento de carga da bateria pode-se afirmar que o controlador de carga utilizado funcionou conforme o esperado, respeitando a corrente de carga de 0,206 mA configurada e interrompendo a carga da bateria quando a tensão final de carga é atingida, evitando sobretensão e aquecimento. Apesar do controlador de carga ter funcionado conforme o esperado, o processo de carga da bateria se estendeu por mais de cinco horas. Esse tempo pode ser reduzido pela metade substituindo-se o resistor R6 mostrado na Figura 15 por outro resistor com resistência duas vezes menor, o que elevaria a corrente de carga para 0,413 mA.

4.2 MONITORAMENTO DE TENSÕES NA PLACA DE AQUISIÇÃO DO MEDIDOR DE VIBRAÇÕES

Utilizando-se de um *setup* parecido com o montado para o monitoramento da tensão da bateria e corrente de carga monitorou-se os níveis de tensão na placa de controle e aquisição implementada para o medidor de vibrações. Para isso conectou-se três entradas analógicas do *Datalogger* em cinco pontos da placa desenvolvida, sendo eles: saída da bateria, saída do regulador de tensão 3,3 V, saída do conversor *boost*, saída do regulador de tensão 1,8 V e a tensão sobre o resistor R10, conforme mostrado na Figura 16, para estimarmos o consumo de corrente do sistema. Realizou-se esse monitoramento para estimar o tempo de duração da bateria com o sistema lendo dados de aceleração do sensor embarcado e transmitindo esses dados para um computador via Wi-Fi, e para avaliar o comportamento das tensões do circuito à medida que a bateria descarrega.

Com os dados coletados utilizou-se uma rotina em Python para gerar as curvas das principais tensões e do consumo do sistema. As curvas traçadas podem ser vistas na Figura 32. Através das curvas traçadas pode-se ver que as tensões de 3,3 V e a tensão da saída do conversor *boost* de 5,47 V se mantiveram constantes até que a tensão da bateria chegasse próxima dos 3,3 V. Embora as tensões tenham permanecido constantes ao longo do tempo enquanto a tensão da bateria diminuía, a tensão de saída do conversor *boost* ficou acima dos 5 V. Isso deu-se devido à relação entre os resistores R22 e R23 mostrados na Figura 17 e definida através da relação $R23 = R22 \times 4,1546$ não ser atendida devido à não disponibilidade de componentes que pudessem atender a dada relação. Na Figura 32 pode-se ver que a corrente consumida pelo sistema é, aproximadamente, 220 mA. Pode-se afirmar que o circuito de condicionamento de tensão projetado funcionou conforme esperado já que não houve variações de tensões no sistema. Também pelo teste realizado conclui-se que a bateria utilizada pode ser adotada para alimentação do medidor

Figura 32 – Níveis de tensão e corrente consumidas pelo medidor de vibrações durante leitura e transmissão de dados a uma taxa de 2000 pontos/segundo

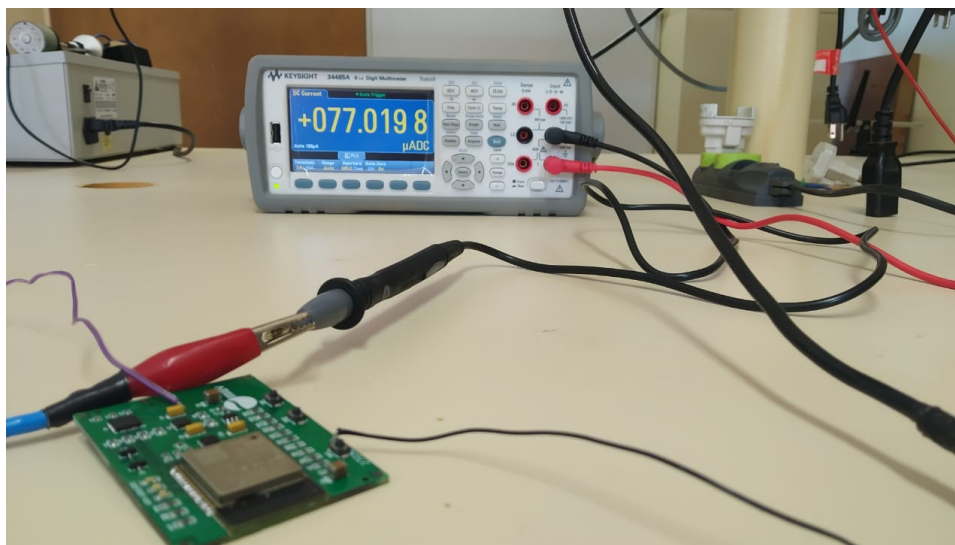


Fonte: Elaborada pelo autor

de vibrações desenvolvido, já que a mesma sustentou o dispositivo em funcionamento lendo e transmitindo dados por seis horas.

Tratando-se ainda do consumo do medidor de vibrações implementado, fez-se a medição do consumo do sistema enquanto o mesmo estava em modo *deep sleep*, ou seja, enquanto o sistema não estava em operação. Para isso utilizou-se o multímetro digital de bancada modelo KEYSIGHT 34456A. Nas Figuras 33 e 34 é mostrado o *setup* utilizado para medição e o valor de corrente medida, respectivamente.

Figura 33 – *Setup* utilizado para medição da corrente consumida com o sistema em *deep sleep*.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 34 – Imagem aproximada do multímetro digital utilizado para medição de corrente do sistema em *deep sleep*.

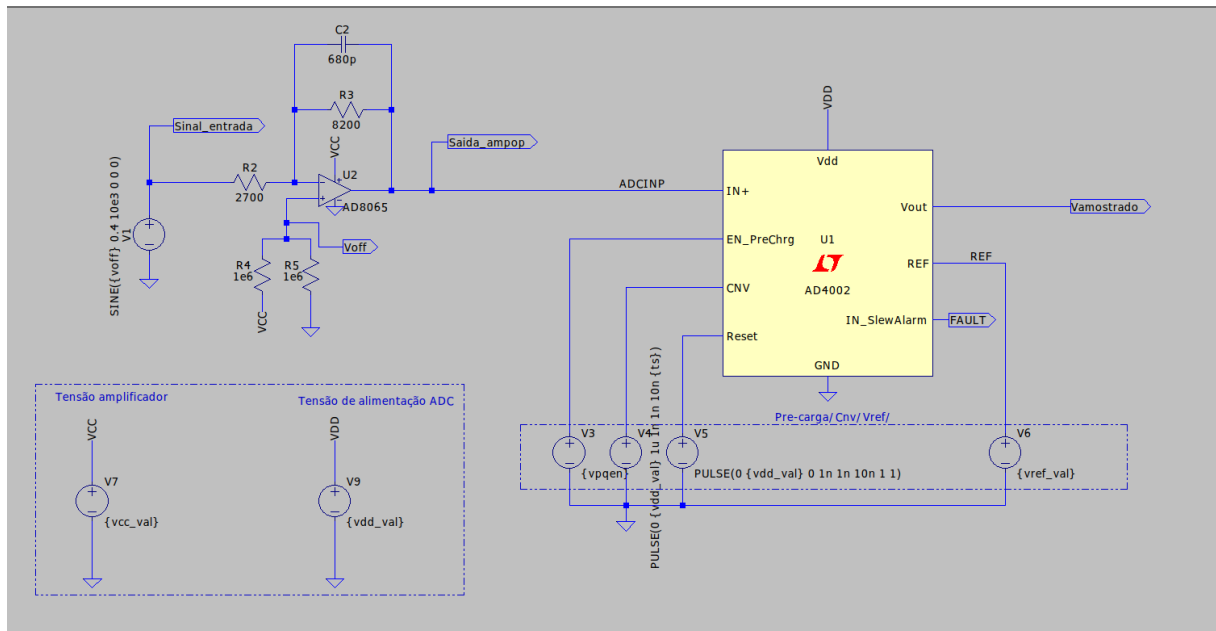


Fonte: Elaborada pelo autor

4.3 TESTE CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE SINAL

A validação física do circuito de condicionamento de sinal projetado para tratamento e digitalização dos dados de aceleração fornecidos pelo sensor ADXL1002 não foi possível, devido a um erro no processo de solda do amplificador operacional AD8065 na placa prototipada. Durante o processo de solda não ajustou-se a temperatura para a soldagem desse componente, o que ocasionou a danificação do componente. Então, para verificar-se o correto funcionamento do circuito projetado elaborou-se no *software* LTsice o esquemático eletrônico do circuito projetado e implementado em placa de circuito impresso.

Figura 35 – Esquemático do circuito de condicionamento de sinal implementado no *software* LTspice para simulação



Fonte: Elaborada pelo autor

O esquemático do circuito simulado pode ser visto na Figura 35.

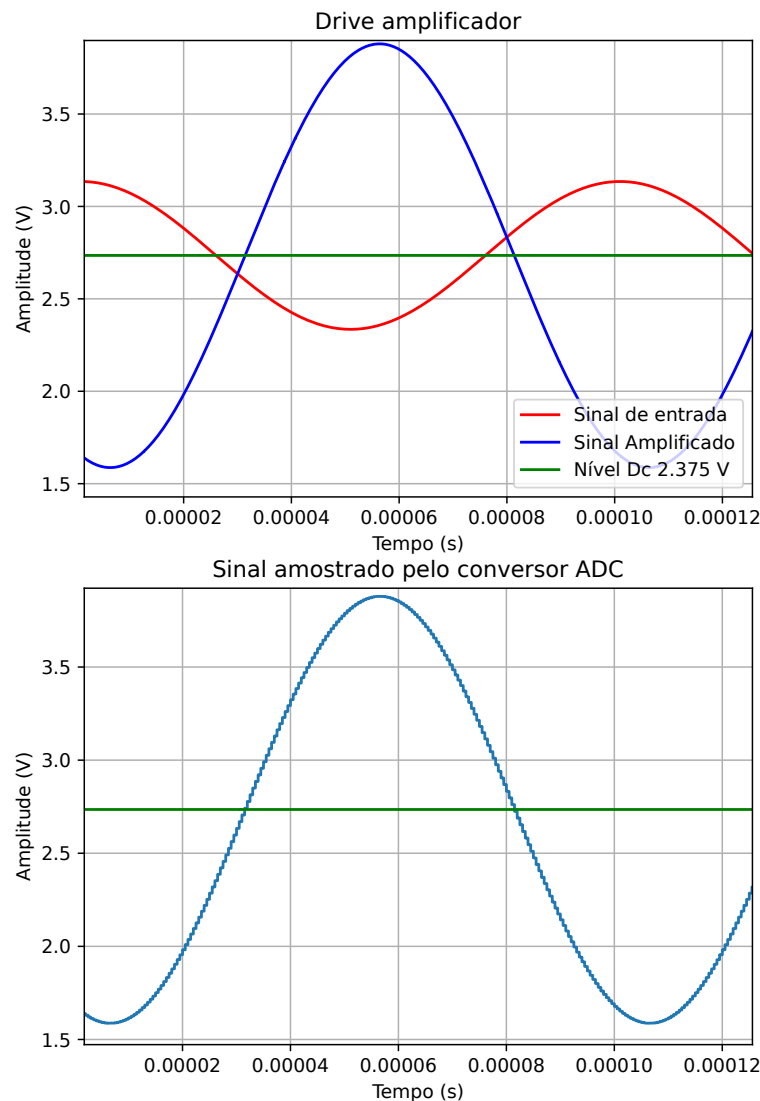
Para simulação gerou-se um sinal senoidal ideal com tensão de pico de $0,8\text{ V}$ e frequência de 10 kHz . Como tensão de referência tanto para o conversor AD4000 quanto para o amplificador AD8065 utilizou-se a tensão de $5,47\text{ V}$, ou seja, a mesma tensão gerada na saída do conversor *boost* implementado e verificado em protótipo. Configurou-se também o conversor AD4000 com uma frequência de amostragem de 2 Msps . Os resultados da simulação podem ser vistos na Figura 36.

Analisando os sinais da simulação apresentados na Figura 36 pode-se perceber que o sinal na saída do amplificador apresenta uma amplitude três vezes maior do que o sinal de entrada, exatamente o ganho projetado para o drive amplificador. Percebe-se também que o sinal amostrado pelo conversor AD4000 reproduz exatamente o sinal da entrada do conversor. Sendo assim, apesar de ter-se simulado o condicionamento de um sinal ideal sem levar em considerações os ruídos inseridos pelo sensor, pelo amplificador e pelo próprio conversor ADC, pode-se afirmar que o projeto e a forma que circuito de condicionamento de sinal foi implementado é funcional.

4.4 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES DE UM MOTOR ELÉTRICO

Por fim, testou-se a captura de dados de aceleração através do sensor embarcado. Para isso utilizou-se um motor instalado em bancada onde prendeu-se o medidor de vibrações prototipado conforme mostrado na Figura 37. O objetivo da realização desse

Figura 36 – Resultado da simulação do circuito de condicionamento de sinal implementado no medidor de vibrações desenvolvido



Fonte: Elaborada pelo autor

teste é a validação da integração entre *software* embarcado e *interface* de configuração e processamento de dados, e também a leitura e transmissão de dados via Wi-Fi. O teste realizado consistiu basicamente em prender o medidor de vibrações no motor, colocar o motor em operação a vazio, estabelecer comunicação via Wi-Fi com o dispositivo desenvolvido, realizar as configurações de escala e taxa de aquisição via interface no computador e iniciar a aquisição de dados.

Depois de ter instalado o dispositivo desenvolvido no motor fez-se a conexão e configuração via *interface*, onde configurou-se o acelerômetro com a escala de $\pm 4 g$ e uma taxa de leitura de 1000 pontos/segundo. Após ter-se configurado o sistema iniciou-se a aquisição de dados. Na Figura 38 pode ver uma janela de dados plotados durante o teste. Ainda na mesma figura pode-se verificar a taxa de aquisição real que foi de 952 pontos/segundo.

Figura 37 – Motor elétrico instalado em bancada com o protótipo do medidor de vibrações fixado através de adesivo dupla face em aleta de refrigeração do motor.

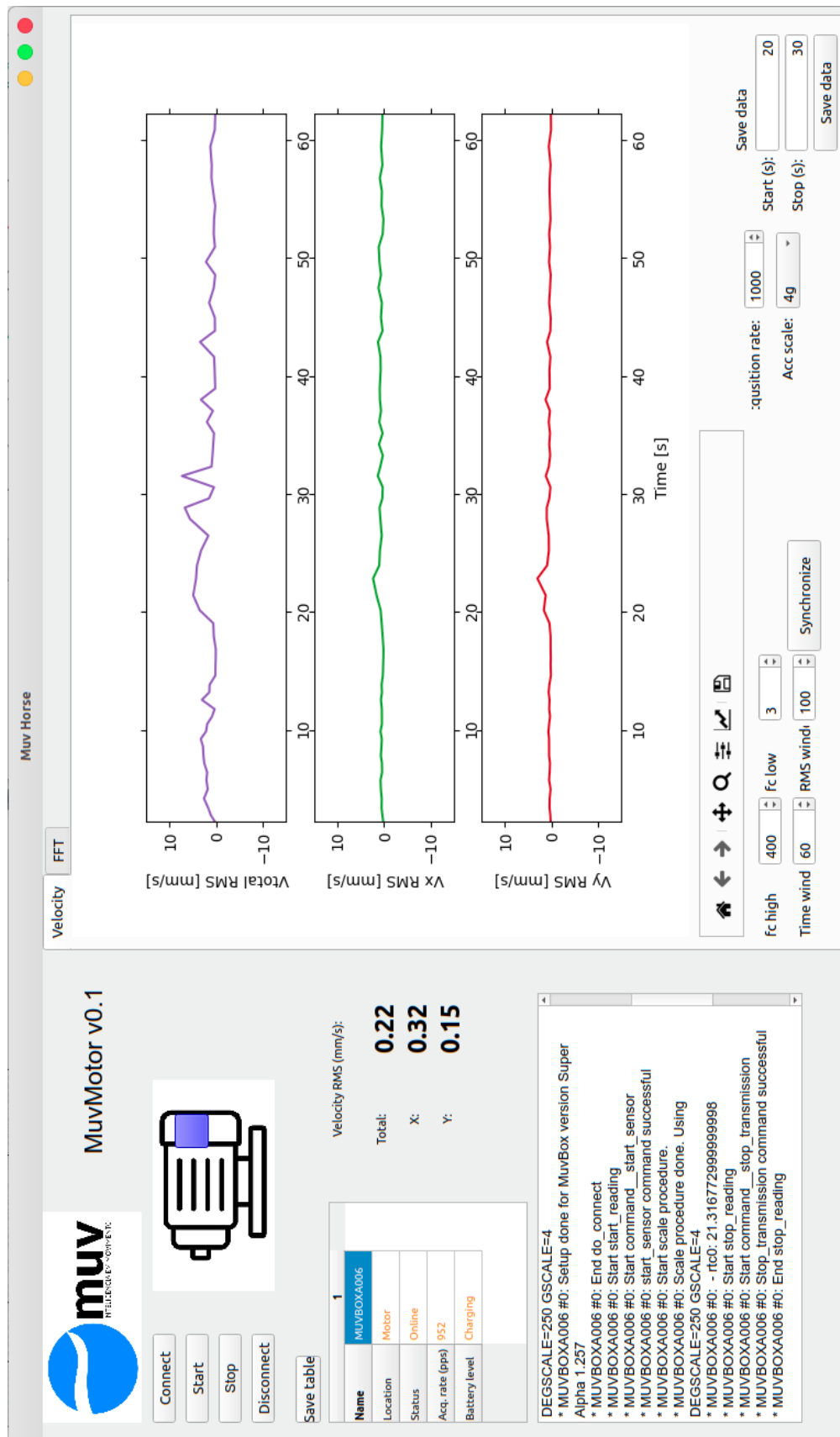


Fonte: Elaborada pelo autor

Os gráficos dos dados obtidos no teste podem ser vistos na Figura 38. Esses dados são referentes à velocidade de vibração, ou seja, os dados de aceleração já tratados e processados conforme descrito brevemente na Figura 29. O valor total da velocidade de vibração medido no motor utilizado para o teste foi de $0,22 \text{ mm/s}$. Comparando o valor de vibrações medido com os valores mostrados na Figura 2 pode-se dizer que motor utilizado para o teste não apresenta defeitos, já que o nível de vibração está na faixa de vibração considerado bom. Do teste realizado com o motor, conclui-se que o sistema é funcional, a transmissão de dados via Wi-Fi ocorreu de forma contínua sem interrupção, as configurações do medidor de vibração realizadas via *interface* foram aplicadas no *software* embarcado e gravado no microcontrolador de forma correta.

O sistema implementado consiste em um medidor de vibrações versátil já que possui dois acelerômetros, transmissão de dados via Wi-fi, alimentação via bateria e configuração via *interface* em *software*. Embora não tenhamos validado o medidor de vibração em campo e nem comparado o medidor desenvolvido com algum sistema já comercial, pode-se afirmar que o objetivo principal proposto pelo trabalho foi atingindo, ou seja, o projeto e implementação do dispositivo para medição de vibração foi efetivado.

Figura 38 – Dados de aceleração capturados pelo medidor de vibração processados em tempo real através da interface desenvolvida.



Fonte: Elaborada pelo autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

Este trabalho descreveu o desenvolvimento de um sistema de medidor de vibração digital baseado em acelerômetros do tipo MEMS. A comunicação entre o sistema implementado e o computador é sem fio, através de comunicação Wi-Fi, proporcionando uma conexão fácil para a transmissão de dados. O *design* é configurável em termos de sensores e inclui o microcontrolador ESP32-WROOM32, o que permite alto desempenho na leitura e também no processamento e envio de dados. O medidor de vibração desenvolvido também permite alimentação via bateria de íon de lítio recarregável.

O sistema implementado conta com dois sensores, sendo um embarcado na placa de aquisição e um externo que pode ser conectado e desconectado do sistema conforme necessidade. Isso permite uma fácil adaptação à maioria das aplicações. O sistema implementado apresenta baixo custo e fácil manutenção.

Embora não tenhamos conseguido testar totalmente o sistema implementado, o sistema protótipo apresentou bons resultados nos testes realizados. Para o teste de carga da bateria percebeu-se claramente a atuação do controlador de carga na corrente de carga, sendo que o nível de corrente medida foi exatamente o que foi projetado. O tempo de carga da bateria não foi muito satisfatório, já que levou mais de cinco horas para que a bateria fosse carregada plenamente. Porém, isso pode ser facilmente corrigido fazendo-se pequenos ajustes de resistências, alterando alguns resistores conectados ao controlador de carga. Quanto ao circuito de condicionamento de tensão implementado, pode-se perceber que as tensões do circuito se mantiveram constantes enquanto a tensão da bateria diminuía. Sendo assim, conclui-se que o circuito funcionou conforme esperado.

A parte do circuito de condicionamento de sinal ainda necessita-se de mais testes, já que não foi possível realizar o teste no protótipo por falta de componente de reposição. Através do circuito simulado pode-se perceber que a conexão entre os componentes do circuito está correta, já que em simulação o circuito apresentou a resposta esperada, ou seja, o *driver* de amplificação aplicou o ganho de três que foi projetado e o conversor AD4000 conseguiu amostrar o sinal de forma que fosse possível reconstitui-lo.

Por fim, no último teste realizado validou-se a integração entre o *interface* de recepção, configuração e processamento dos dados de aceleração com o *software* embarcado. Nesse teste mediu-se a aceleração da vibração em um motor elétrico instalado em bancada. Os dados foram transmitidos sem nenhuma interrupção via Wi-Fi. Ainda foi possível realizar a conexão e a configuração do medidor de vibração através da *interface* em *software* implementado no computador. Embora tenhamos conseguido bons resultados nos teste realizados, esses consistem apenas em alguns resultados preliminares que comprovam o funcionamento geral do sistema, mas ainda são necessários mais testes no sistema e também valida-lo e calibra-lo para medição de vibração em máquinas elétricas rotativas.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Para o prosseguimento deste trabalho, propõe-se os seguintes itens:

- Realização de testes no circuito de condicionamento de sinal implementado na placa de controle e aquisição de sinais;
- Realização de testes em máquinas elétricas em campo;
- Estudo e aplicação do método de avaliação de vibração via análise espectral;
- Transferir processamentos de dados de aceleração para *software* embarcado;

REFERÊNCIAS

- ACAR, C.; SHKEL, A. M. Experimental evaluation and comparative analysis of commercial variable-capacitance mems accelerometers. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, IOP Publishing, v. 13, n. 5, p. 634, 2003.
- ÁGOSTON, K. Fault detection with vibration transducers. **Procedia Technology**, Elsevier B.V., v. 12, p. 119–124, 2014. ISSN 22120173. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.464>>.
- BENEVENUTI, É. d. L. **Metodologia Para Monitoração e Diagnóstico de Vibração das Bombas Moto-Operadas do Circuito Primário de Refrigeração do Reator IEA-R1**. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Autarquia associada à Universidade De São Paulo, 2004. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/EriondeLimaBenevenuti{_}M.>
- CARDEN, E. P.; FANNING, P. Vibration based condition monitoring: A review. **Structural Health Monitoring**, v. 3, n. 4, p. 355–377, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1475921704047500>>.
- COMPANY, B. . K. E. **Measuring Vibration**. [S.l.], 1982. Disponível em: <<https://www.bksv.com/media/doc/br0094.pdf>>.
- COMPANY, S. M. **Vibration Sensors**. [S.l.], 1999. 39 p.
- DEVICE, A. **Data Sheet ADXL1001/ADXL1002**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL1001-1002.pdf>>.
- DEWESOFT. **Medindo choque e vibração com sensores de acelerômetro**. 2021. Disponível em: <<https://dewesoft.com/br/aquisicao-de-dados/medir-choque-vibrao-com-acelermetros>>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- DINEVA, A. et al. Fault diagnosis of rotating electrical machines using multi-label classification. **Applied Sciences**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 23, p. 5086, 2019.
- DZHUDZHEV, B. et al. Vibration measurement with piezoelectric transducer. In: **XLVIII International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies ICEST 2013**. [S.l.: s.n.], 2013.
- EASYEDA. **An Easier and Powerful, Online PCB Design Tool**. 2021. Disponível em: <<https://easyeda.com/>>.
- EISENMANN, R. C.; PRENTICE, H. **Machinery Malfunction Diagnosis and Correction**. [S.l.]: Pearson Education, Inc, 2005. ISBN 0132409461.
- ENDAQ. **Vibration Sensor Types and Where to Buy Them**. 2017. Disponível em: <<https://blog.endaq.com/vibration-sensor-types-and-where-to-buy-them>>. Acesso em: 9 jul. 2021.
- ENGETELES. **Curva PF: O que é e como usar**. 2017. Disponível em: <<https://engeteles.com.br/curva-pf/>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

ETHW. MEMS. 2017. Disponível em: <<https://ethw.org/MEMS>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

FLUKE. **VM-6360 Hand Held Vibration Meter**. 2021. Disponível em: <<https://www.fluke.com/pt-br/produto/manutencao-mecanica/analise-de-vibracoes/fluke-805>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

GHEMARI, Z. Study and analysis of the piezoresistive accelerometer stability and improvement of their performances. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, Springer, v. 8, n. 2, p. 1520–1526, 2017.

GONZÁLEZ, R. C. D. **Desenvolvimento de um Protótipo Analisador de Vibração de Baixo Custo Para Uso em Manutenção Preditiva**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

GOYAL, D. et al. Intelligent predictive maintenance of dynamic systems using condition monitoring and signal processing techniques—a review. In: IEEE. **2016 International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation (ICACCA)(Spring)**. [S.l.], 2016. p. 1–6.

HASHEMIAN, H. M. State-of-the-art predictive maintenance techniques. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 60, n. 1, p. 226–236, 2011.

INSTRUMENTS, N. **User Guide NI USB-6008/6009**. 2015. Disponível em: <<https://www.ni.com/pdf/manuals/371303n.pdf>>.

INSTRUMENTS, T. **1.5A USB-FRIENDLY Li-Ion BATTERY CHARGER AND POWER-PATH MANAGEMENT IC**. [S.l.], 2014. Disponível em: <https://datasheet.lcsc.com/lcsc/1810271109_Texas-Instruments-BQ24075RGTR_C15464.pdf>.

INSTRUMENTS. **Medidor de Vibrações Fluke 805**. 2018. Disponível em: <<https://www.omniinstruments.co.uk/vm220-portable-vibration-meter-958.html>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

INSTRUMENTS. **VM220 Portable Vibration Meters**. 2018. Disponível em: <<https://www.omniinstruments.co.uk/vm220-portable-vibration-meter-958.html>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

INVENSENSE, T. **ICM-42688-P Datasheet**. [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://3cfeqx1hf82y3xcoull08ihx-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2021/06/DS-000347-ICM-42688-P-v1.5.pdf>>.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção Função Estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

KHAZRAEI, K.; DEUSE, J. A strategic standpoint on maintenance taxonomy. **Journal of Facilities Management**, Emerald Group Publishing Limited, 2011.

LIPUS, J. et al. Vibration and related diagnostics of motors and generators. **MM Science Journal**, p. 1639–1642, 2016.

MOGHIMI, R. Seven steps to successful analog-to-digital signal conversion (noise calculation for proper signal conditioning). **Analog Devices, Inc. MS-2022**, Citeseer, 2011.

- MOLINA, R. **Conceitos Básicos sobre Vibrações**. [S.l.], 2003. 1–10 p. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/gmap/www-gmap.mecanica.ufrgs.br/html/sumulas/MEC081/Ap-Molina.zip>>.
- MURPHY, C. Choosing the most suitable mems accelerometer for your application—part. **50 Maximize the Run Time in Automotive Battery Stacks Even as Cells Age**, p. 5, 2020.
- OCELLA, S.; SHAFIEE, M.; SANSOM, C. Adopting machine learning and condition monitoring pf curves in determining and prioritizing high-value assets for life extension. **Expert Systems with Applications**, Elsevier, v. 176, p. 114897, 2021.
- OMEGA. **HHVB82 - MEDIDOR DE VIBRAÇÃO**. 2021. Disponível em: <https://br.omega.com/googlebase/product.html?pn=HHVB82&gclid=CjwKCAjwiPbWBRBtEiwAJakcpArcBAixshs8op_3GGuRKJZS2z_inNTPVgoUkk3QaxZmkb4dUV1c9BoC0rEQAvD_BwE>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- ONUORAH, C. A. et al. Development of a vibration measurement device based on a mems accelerometer. In: SCITEPRESS. **VEHITS 2017-Proceedings of the 3rd International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems**. [S.l.], 2017.
- PAOLANTI, M. et al. Machine learning approach for predictive maintenance in industry 4.0. In: IEEE. **2018 14th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)**. [S.l.], 2018. p. 1–6.
- PATRANABI, D. **Sensors and Tranducers**. [S.l.]: PHI Learning Pvt. Ltd., 2003.
- PEDOTTI, L. A. d. S. et al. Dispositivo iot de baixo custo para diagnóstico de falhas em máquinas rotativas. [sn], 2019.
- PEDOTTI, L. A. D. S.; ZAGO, R. M.; FRUETT, F. Fault diagnostics in rotary machines through spectral vibration analysis using low-cost mems devices. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, IEEE, v. 20, n. 6, p. 39–44, 2017.
- PEDOTTI, L. A. S.; ZAGO, R. M.; FRUETT, F. Instrument based on mems accelerometer for vibration and unbalance analysis in rotating machines. In: IEEE. **2016 1st International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)**. [S.l.], 2016. p. 25–30.
- SCHEFFER, C.; GIRDHAR, P. **Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance**. First. Burlington, Reino Unido: Elsevier, 2004. 264 p.
- Shaeffer, D. K. Memes inertial sensors: A tutorial overview. **IEEE Communications Magazine**, v. 51, n. 4, p. 100–109, April 2013.
- SILVA, C. W. D. **Vibration: fundamentals and practice**. [S.l.]: CRC press, 2006.
- SILVESTRE, J. d. S. F. Dissertação de mestrado, **Diagnóstico de Máquinas Elétricas Pela Análise de Vibração Mestrado em Engenharia Eletrotécnica Sistemas Elétricos de Energia Novembro de 2012**. 2012. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/47138270.pdf>>.

- SINCLAIR, I. **Sensors and transducers**. [S.l.]: Elsevier, 2000.
- SMITH, J. D. **Vibration measurement and analysis**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2013.
- SYSTEMS, E. **ESP32WROOM32E & ESP32WROOM32UE Datasheet**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf>.
- TEZ, S.; AKIN, T. Fabrication of a sandwich type three axis capacitive mems accelerometer. In: IEEE. **SENSORS, 2013 IEEE**. [S.l.], 2013. p. 1–4.
- TRAN, D. T. A piezoresistive acceleration sensor: from system to physical levels. **Sensors & Transducers**, International Frequency Sensor Association, 2012.
- 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**, Springer, v. 40, n. 11, p. 1–18, 2018.
- VISHWAKARMA, M. et al. Vibration analysis & condition monitoring for rotating machines: a review. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, v. 4, n. 2, p. 2659–2664, 2017.
- WAEYENBERGH, G.; PINTELON, L. Maintenance concept development: a case study. **International journal of production economics**, Elsevier, v. 89, n. 3, p. 395–405, 2004.
- WOWK, V. A brief tutorial on machine vibration. **Machine Dynamics, Inc**, 2005.

Anexos

ANEXO A – CONEXÕES DOS PINOS DO MICROCONTROLADOR ESP32-WROOM32

Tabela 7 – Conexões dos pinos do microcontrolador ESP32-WROOM32

Pino - I/O	Conexão	Descrição
3 - EN	#EN	Pino conectado ao botão de reinício. Quando colocado em nível lógico baixo o microcontrolador é desabilitado. Pino conectado a chave táctil SW3.
6 - IO34	Bat-status	Entrada analógica conectada ao divisor resistivo para monitoramento do nível de tensão da bateria.
7 - IO35	V1	Entrada analógica conectada na saída do regulador de tensão RT9080-33GJ5. Utilizado para realizar o monitoramento de consumo de corrente do sistema.
8 - IO32	VDD3V3	Entrada analógica conectada na saída do regulador de tensão RT9080-33GJ5. Utilizado para realizar o monitoramento de consumo de corrente do sistema.
10 - IO25	LED3	Conectado ao LED 3, utilizado para indicação de conexão Wi-Fi.
11 - IO26	LED2	Conectado ao LED 2, utilizado para indicação de bateria fraca.
12 - IO27	ENBOOST	Pino utilizado para habilitar/desabilitar circuito de condicionamento de sinal e sensor analógico externo.
13 - IO14	Acel-SCK	Sinal de clock para comunicação SPI entre microcontrolador e sensor ICM42688.
14 - IO12	Acel-SDO	Pino MISO protocolo de comunicação SPI. Utilizado para transferência de dados do sensor ICM42688 para o microcontrolador.
16 - IO13	Acel-SDI	Pino MOSI protocolo de comunicação SPI. Utilizado para transferência de dados do microcontrolador para o sensor ICM42688.

Continua...

Pino - I/O	Conexão	Descrição
23 - IO15	Acel-CS	Pino <i>chip select</i> protocolo de comunicação SPI. Utilizado para habilitar e desabilitar o dispositivo escravo (ICM42688) do barramento SPI.
24 - IO2	LED1	Conectado ao LED 1, utilizado para indicação de on/off.
25 - IO0	IO0	Utilizado para gravação do microcontrolador.
26 - IO4	KEY2	Conectado a chave táctil SW1. Utilizada para ligar e desligar o sistema.
29 - IO5	A/D-CS	Pino <i>chip select</i> protocolo de comunicação SPI. Utilizado para habilitar e desabilitar o dispositivo escravo (AD4000) do barramento SPI.
30 - IO18	A/D-SCK	Sinal de clock para comunicação SPI entre microcontrolador e conversor digital analógico AD4000.
31 - IO19	A/SDO	Pino MISO protocolo de comunicação SPI. Utilizado para transferência de dados do conversor digital analógico AD4000 para o microcontrolador.
33 - IO21	KEY1	Conectado a chave táctil SW2. Chave de propósito geral que pode ter sua função configurada
34 - RXD0	U0RX	Pino utilizado para comunicação serial com o microcontrolador. Conectado ao conversor USB-UART CP2102
35 - TXD0	U0TX	Pino utilizado para comunicação serial com o microcontrolador. Conectado ao conversor USB-UART CP2102
37 - IO23	A/D-SDI	Pino MOSI protocolo de comunicação SPI. Utilizado para transferência de dados do microcontrolador para o conversor digital analógico AD4000.

ANEXO B – LISTA DE COMPONENTES NECESSÁRIOS PARA FABRICAÇÃO DA PLACA DE AQUISIÇÃO PARA O MEDIDOR DE VIBRAÇÕES

A lista de todos os componentes necessários para fabricação de cada placa de medidor de vibrações desenvolvido e do sensor externo estão especificados nas Tabelas 8 e 9. A maioria dos componentes escolhidos são do tipo SMD (do inglês, *Surface Mount Device*), somente o conector utilizado para conexão do sensor ADXL10002 é do tipo THT (do inglês, *Through-Hole Technology*). A escolha dos elementos do tipo SMD deve-se pelo fato de serem mais compactos permitindo a confecção de uma placa de circuito impresso de tamanho reduzido.

Tabela 8 – Lista de componentes necessários para fabricação da placa eletrônica do medidor de vibrações.

Designação	Descrição (<i>Footprint</i>)	Valor
C1, C3	Capacitor cerâmico (0402)	100 nF
C2, C6, C7, C15, C25	Capacitor cerâmico (0402)	1 μF
C5, C4, C10	Capacitor tântalo (1206)	4,7 μF
C9, C24,	Capacitor cerâmico (1206)	10 μF
C12, C13, C16, C19, C23	Capacitor cerâmico (0402)	10 μF
C20, C21, C22	Capacitor cerâmico (0402)	100 nF
j4	Conector bateria (9155003541006)	-
L1	Indutor (1206)	4 μH
LED1, LED4	LED verde (0805)	-
LED2, LED3, LED5	LED Vermelho (0805)	-
Q1, Q2	Transistor bipolar NPN (SOT-23)	-
R1	Resistor (0603)	470 Ω
R2, R3	Resistor (0603)	12 $k\Omega$
R4, R11, R14, R16	Resistor (0603)	10 $k\Omega$
R5, R9, R12	Resistor (0603)	1,2 $k\Omega$
R15, R17, R18	Resistor (0603)	1,2 $k\Omega$
R19, R20, R21	Resistor (0603)	1,2 $k\Omega$
RA, RB	Resistor (0603)	1 $M\Omega$
RG	Resistor (0603)	2,7 $k\Omega$
RF	Resistor (0603)	8,2 $k\Omega$
R6	Resistor (0603)	4,3 $k\Omega$
R7, R8	Resistor (0603)	47 $k\Omega$
R10	Resistor (2512)	0,3 Ω

Continua...

Designação	Descrição (<i>Footprint</i>)	Valor
R22	Resistor (0603)	220 $k\Omega$
R23	Resistor (0603)	1 $M\Omega$
SW1, SW2, SW3	Chave táctil (KEY-SMD_RS-032G05A3)	-
U2	Controlador de carga BQ24075RGTR (QFN-16)	-
U3	Regulador de tensão 3,3 V RT9080-33GJ5 (TSOT-23)	-
U4	Microcontrolador ESP-WROOM-32	-
U5	Conversor Boost MCP16411 (MSOP-10)	-
U7	Conversor analógico digital AD4000 (MSOP-10)	-
U8	Amplificador operacional AD8065 (SOT-23-5)	-
U9	Sensor ICM-42688-P	-
U10	Conversor USB-UART C2102 (QFN-24_4)	-
U11	Regulador de tensão 1,8 V RT9080-18GJ5 (TSOT-23)	-
USB1	Conector USB-CON-MICRO-B-5S	-
Conector	Conector 3 pinos para conexão sensor ADXL1002	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 – Lista de componentes necessários para fabricação da placa eletrônica do sensor externo.

Designação	Descrição (<i>Footprint</i>)	Valor
U1	Sensor ADXL10002	-
R1, R2	Resistor (0603)	470 Ω
C1	Capacitor cerâmico (0402)	1 μF
LED ON, LED OR	Led Vermelho (0603)	-
Conector	Conector 3 pinos	-

Fonte: Elaborada pelo autor