

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**ANDREY ALEXANDRE GUIMARÃES
RAFAEL FELIPE PAROLIN**

**PROPOSTA DE UM MULTIMEDIDOR MODULAR COM OSCILOSCÓPIO E
COMUNICAÇÃO SEM FIO DE BAIXO CUSTO PARA APOIO AOS
LABORATÓRIOS DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**CURITIBA
2024**

**ANDREY ALEXANDRE GUIMARÃES
RAFAEL FELIPE PAROLIN**

**PROPOSTA DE UM MULTIMEDIDOR MODULAR COM OSCILOSCÓPIO E
COMUNICAÇÃO SEM FIO DE BAIXO CUSTO PARA APOIO AOS
LABORATÓRIOS DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**Proposal of a Modular Low-Cost Multimeter with Oscilloscope and Wireless
Communication to Support the Laboratories of the Federal University of
Technology – Paraná**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Juan Camilo Castellanos Rodriguez

Coorientador: Prof. Dr. Clovis Ronaldo da Costa Bento

**CURITIBA
2024**



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ANDREY ALEXANDRE GUIMARÃES
RAFAEL FELIPE PAROLIN**

**PROPOSTA DE UM MULTIMEDIDOR MODULAR COM OSCILOSCÓPIO E
COMUNICAÇÃO SEM FIO DE BAIXO CUSTO PARA APOIO AOS
LABORATÓRIOS DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 25/Novembro/2024

Juan Camilo Castellanos Rodriguez
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Clóvis Ronaldo da Costa Bento
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Nastasha Salame da Silva
Doutorando
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Paulo Cícero Fritzen
Doutorando
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA
2024**

RESUMO

Esta monografia explora a viabilidade e o desenvolvimento de um protótipo de multimedidor de baixo custo. Nos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, são realizados testes com o objetivo de proporcionar aprendizado prático aos alunos do curso de Engenharia Elétrica e áreas afins. Para a realização desses experimentos, é essencial o uso de equipamentos de metrologia, além dos circuitos que serão analisados. Neste contexto, propõe-se o desenvolvimento de um multimedidor osciloscópio com comunicação via Wi-Fi, capaz de realizar medições em diversos experimentos realizados nos laboratórios. O projeto foi concebido para ser simples e didático, permitindo a integração da interface homem-máquina por meio da tela de um *smartphone* ou computador conectado ao dispositivo. Desta maneira, é possível a visualização de formas de onda e a obtenção das medições relevantes para os projetos. O protótipo é composto por *hardware*, *software* e *firmware*, desenvolvidos integralmente com o uso de plataformas *open source*. Além disso, todos os seus componentes foram detalhadamente discretizados, com o intuito de maximizar a replicabilidade do projeto. Foi possível realizar o desenvolvimento e validação do protótipo dentro das escalas de tensão e corrente propostas, com resultados apresentados em navegador, sendo estas possíveis de serem medidas simultaneamente com resultados próximos a equipamentos convencionais. Também foi explorado o conceito de modularidade na representação da estrutura do sistema, visando diminuir sua complexidade e facilitar a montagem e manutenção do equipamento, porém esta facilidade não foi implementada. Dessa forma, se torna necessário desenvolvimento futuro para que seja possível realizar a leitura de mais de uma fase utilizando réplicas do dispositivo.

Palavras-chave: multimedidor com osciloscópio; medição de tensão; medição de corrente.

ABSTRACT

This undergraduate thesis explores the feasibility and development of a low-cost multimeter prototype. In the laboratories of the Federal Technological University of Paraná, tests are conducted with the aim of providing practical learning to students in the Electrical Engineering program and related fields. For the execution of these experiments, the use of metrology equipment is essential, along with the circuits that will be analyzed. In this context, the development of an oscilloscope multimeter with communication via Wi-Fi is proposed, capable of performing measurements in various experiments conducted in the laboratories. The project was designed to be simple and educational, allowing the integration of the human-machine interface through the screen of a smartphone or computer connected to the device, thus enabling the visualization of waveforms and the acquisition of measurements relevant to the projects. The prototype consists of hardware, software, and firmware, developed entirely using open source platforms. Furthermore, all its components have been thoroughly discretized, aiming to maximize the replicability of the project. It was possible to validate the prototype regarding its current and voltage scales as proposed, with results shown on browser, being possible to measure them simultaneously with very close results to conventional equipment. The concept of modularity was also explored in the system's structure, aiming to reduce the complexity, facilitate assembly and maintenance of the equipment, but it was not implemented. That being said, future development is necessary to make it possible to measure more than a single phase utilizing replicas of the device.

Keywords: multimeter with oscilloscope; voltage measurement; current measurement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de blocos do multimedidor trifásico oZm3	19
Figura 2 – Exemplo de um Diagrama de Blocos de um Multímetro de Bancada	19
Figura 3 – Fluke 28-II	20
Figura 4 – Gráfico de corrente de consumo de um dispositivo, feito pelo DMM7510 7.5 Digit Graphical Sampling Multimeter	20
Figura 5 – Exemplo de multimedidor, familia MMW	21
Figura 6 – Exemplo de uso TVS Unidirecional	22
Figura 7 – Exemplo de uso TVS Bidirecional	22
Figura 8 – Ilustração da Classificação CAT	23
Figura 9 – Fluke 28-II PCB	24
Figura 10 – <i>Switches</i> de um Fluke 28-II	25
Figura 11 – AD202 um exemplo de amplificador isolador	26
Figura 12 – Bobina Rogowski aberta	27
Figura 13 – Diagrama de blocos de um ADC	28
Figura 14 – Diagrama de blocos de um ADC <i>Flash</i>	29
Figura 15 – Diagrama de blocos de um ADC SAR	30
Figura 16 – Plot sobre o tempo da saída de um ADC SAR	30
Figura 17 – Circuito de um comparador utilizando dois resistores como referência de tensão	31
Figura 18 – Família STM32 separada por função	34
Figura 19 – Interface WEB usada no 3Ph-ozm	35
Figura 20 – Módulo ESP32-WROOM-32D frente e verso	36
Figura 21 – Diagrama de Blocos de um Multimetro Portátil	36
Figura 22 – Diagrama de Blocos de um Multímetro de Bancada	36
Figura 23 – Diagrama de Blocos da Lógica de Funcionamento	42
Figura 24 – Entrada de Tensão e Corrente	43
Figura 25 – Condicionamento de sinais por divisor resistivo para leitura <i>Single-Ended</i>	43
Figura 26 – Condicionamento de sinais por divisor resistivo para leitura <i>Single- Ended</i>, menor range	45
Figura 27 – Condicionamento de sinais por divisor resistivo para leitura diferencial	46

Figura 28 – Circuito de condicionamento de sinais para tensão	47
Figura 29 – Circuito de condicionamento de sinais para corrente	48
Figura 30 – Simulação da resistência de <i>Thevenin</i>	48
Figura 31 – Simulação sem filtro passa-baixa para a corrente	49
Figura 32 – Simulação com filtro passa-baixa para a corrente	49
Figura 33 – Circuito diferencial simplificado com conexão específica para referência	50
Figura 34 – Circuito diferencial simplificado sem conexões adicionais	51
Figura 35 – Circuito diferencial simplificado com referência em mais de uma ponteira	51
Figura 36 – Circuito diferencial simplificado isolado	52
Figura 37 – Circuito de comunicação isolado	53
Figura 38 – Diagrama de conexão modular entre dispositivos	54
Figura 39 – Detalhe da conexão modular entre dispositivos utilizando dois fios para sincronização de leituras	55
Figura 40 – Circuito de regulação de tensão	57
Figura 41 – Circuito utilizando transistor para o <i>buzzer</i>	58
Figura 42 – Máquina de estados simplificada para apenas um dispositivo	60
Figura 43 – Detalhe do cabeçalho de informações da página da Web gerada pelo dispositivo	63
Figura 44 – Detalhe do gráfico da página da Web gerada pelo dispositivo	63
Figura 45 – Máquina de Estados Completa	64
Figura 46 – Comparação entre ADS1015 cópia e original	66
Figura 47 – Circuito de leitura simplificado utilizando ponto comum de referência	67
Figura 48 – Módulo de Bancada	69
Figura 49 – Modelo virtual do encapsulamento	70
Figura 50 – Detalhes de suportes para PCB e periféricos	71
Figura 51 – Diagrama do circuito do teste da rede elétrica.	72
Figura 52 – Setup básico para testes completo.	73
Figura 53 – Leitura da tensão do circuito do teste de leitura de rede - Osciloscópio.	73
Figura 54 – Leitura completa do circuito do teste de leitura de rede - Protótipo	74
Figura 55 – Gerador de funções - Sinal 200 mVp.	74
Figura 56 – Diagrama do circuito do teste de 200 mVp	75
Figura 57 – Leitura da onda de 200 mVp - Osciloscópio	75

Figura 58 – Leitura da onda de 200 mVp - Protótipo	76
Figura 59 – Diagrama do circuito do teste de μA	76
Figura 60 – Leitura da corrente de 217 μA - Protótipo.	77
Figura 61 – Diagrama circuito Wheatstone	78
Figura 62 – Circuito wheatstone	78
Figura 63 – Leitura de tensão do circuito Wheatstone - Osciloscópio	79
Figura 64 – Leitura do circuito Wheatstone - Protótipo	80
Figura 65 – Circuito - EasyEda	87
Figura 66 – Repositório do Código - GitHub	87
Figura 67 – Modelo 3D do encapsulamento - OnShape	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 3 – Resolução e precisão necessárias para o dispositivo	39
Tabela 4 – Chart data	61
Tabela 5 – Tabela de multiplicadores de tensão	62
Tabela 6 – Tabela de multiplicadores de corrente	62
Tabela 7 – Tabela de multiplicadores de corrente	62
Tabela 8 – Lista de Materiais e Custos	68
Tabela 9 – Resultados do teste de leitura da rede.	72
Tabela 10 – Resultados do teste de 200 mVp.	74
Tabela 11 – Resultados do teste de μA.	77
Tabela 12 – Resultados do teste do circuito Wheatstone.	79
Tabela 13 – Precisões solicitadas e resultados	82
Tabela 14 – Implementação de funções de acordo com especificações	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviaturas

amp-op Amplificador Operacional

Wi-Fi *Wireless Fidelity*

Siglas

I²C *Inter-Integrated Circuit*

ADC *Analogic-to-Digital Converter*

BOM *Bill of Materials*

CA Corrente Alternada

CC Corrente Contínua

CI Circuito Integrado

DAC *Digital-to-Analogic Converter*

ESD *Electrostatic Discharge*

HRC *High Rupturing Capacity*

IDE *Integrated Development Environment*

IoT *Internet of Things*

JS JavaScript

LCD *Liquid Crystal Display*

MCU *Microcontroller Unit*

MOV *Metal Oxide Varistor*

PCB *Printed Circuit Board*

PGA *Programmable-gain Amplifier*

PTC *Positive Temperature Coefficient*

SAR *Successive Approximation Register*

SEMAP Setor de Almoxarifado/Manutenção dos Laboratórios

SPS *Samples per Second*

TI *Texas Instruments*

TVS *Transient Voltage Suppressor*

UTFPR Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UUT *Unit Under Test*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	TEMA	14
1.1.1	Delimitações do tema	14
1.2	PROBLEMA E PREMISSAS	15
1.3	OBJETIVOS	15
1.3.1	Objetivo Geral	15
1.3.2	Objetivos Específicos	16
1.4	JUSTIFICATIVA	16
1.5	METODOLOGIA DE PESQUISA	17
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Proteção de Entrada	21
2.1.1	ESD	21
2.1.2	Proteção Específica para Equipamentos de Medição de Sinais Elétricos	22
2.1.2.1	Proteção de Entrada para Circuitos de Corrente	23
2.1.2.2	Proteção de Entrada para Circuitos de Tensão	23
2.2	Condicionamento e Aquisição de Sinal	24
2.2.1	Resistor <i>Shunt</i>	25
2.2.2	Bobina Rogowski	26
2.2.3	Circuito Integrado de Medição (<i>hall effect</i>)	27
2.3	Conversor Analógico Digital	27
2.3.1	Flash ADC	28
2.3.2	SAR ADC	29
2.4	Referência de Tensão	29
2.5	Aviso de Entrada Incorreta (<i>Input Warning</i>)	30
2.5.1	Comparador para detecção de falhas	31
2.5.2	Tipos de aviso	32
2.5.3	Alerta durante uso no laboratório	32
2.6	MCU e Interface de Comunicação	32
2.6.1	Microcontroladores	32
2.6.1.1	Microcontroladores Considerados	33

2.6.2	Apresentação dos dados e Comunicação	34
2.6.3	Soluções completas	35
2.7	<i>Power Management</i>	36
2.8	Calibração	37
3	ESPECIFICAÇÕES E PREMISSAS ADOTADAS	39
3.1	Especificações	39
3.2	Premissas Adotadas	40
3.2.1	<i>Hardware</i>	40
3.2.2	Software e Firmware	40
4	MATERIAIS E METODOLOGIA	41
4.1	Metodologia	41
4.1.1	Circuito	41
4.1.1.1	<u>ADC - Modo <i>Single-Ended</i></u>	42
4.1.1.2	<u>ADC - Modo Diferencial</u>	45
4.1.1.3	<u>Isolamento</u>	50
4.1.1.4	<u>Modularidade no <i>Hardware</i></u>	52
4.1.1.5	<u>Microcontrolador</u>	54
4.1.1.6	<u>Alimentação e regulação de tensão</u>	56
4.1.1.7	<u>Avisos sonoros</u>	56
4.1.1.8	<u>Disponibilidade do Circuito</u>	56
4.1.1.9	<u>Resumo de <i>Hardware</i></u>	56
4.1.2	<u>Software e Firmware</u>	58
4.1.2.1	<u>Firmware</u>	59
4.1.2.2	<u>Software</u>	61
4.1.2.2.1	<u>Tensão e Corrente</u>	61
4.1.2.2.2	<u>Apresentação Visual</u>	62
4.1.2.3	<u>Modularidade no <i>Software</i></u>	64
4.1.3	Dificuldades encontradas e trabalhos futuros	65
4.1.3.1	<u>ADC falsificado</u>	65
4.1.3.2	<u>Limitação do protocolo <i>ESP-NOW</i></u>	65
4.1.3.3	<u>Isolamento entre canais</u>	66
4.2	Materiais	67

4.3	<i>Casing</i>	68
5	TESTES E RESULTADOS	72
5.1	Teste da Medição da Rede Elétrica	72
5.2	Teste 200 mVp	73
5.3	Teste uA	76
5.4	Teste Wheatstone	77
6	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICE A ACESSO AO CIRCUITO, CÓDIGO E MODELO 3D	87

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia, a metrologia é a ciência da medição e suas aplicações. Ela engloba todos os aspectos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação (LINCK, 2017).

Para efeito de medição, são utilizados diversos instrumentos, dependendo da área de atuação e também dos parâmetros desejados. Existem medidores de temperatura, de PH, balanças digitais, espectrofotômetros, cromatógrafos, entre vários outros instrumentos de medição. O escopo de atuação deste trabalho está limitado a equipamentos de medição de múltiplas grandezas elétricas denominados multímetros. Existem multímetros tanto analógicos quanto digitais.

O multímetro digital é a ferramenta padrão utilizada por profissionais nas áreas de elétrica ou eletrônica, principalmente, para medir tensão, corrente e resistência, podendo este ter funções adicionais dependendo do fabricante.

Tão cedo quanto 1950, foram feitas as primeiras iterações do multímetro digital, sendo a primeira versão portátil e confiável fabricada pela Fluke, em 1977, com o modelo 8020A, que revolucionou a indústria (EDISONT, 2016). Desenvolvidos com a expectativa de leituras mais precisas, maior confiabilidade, robustez e menores preços, este equipamento começou a ser estudado para substituir o voltímetro, amperímetro, ohmímetro, e também os multímetros analógicos.

Com a evolução da tecnologia, existe a possibilidade da utilização de computadores junto aos instrumentos de medição, tornando-os ainda mais práticos, fornecendo também a possibilidade de armazenamento e tratamento dos dados obtidos.

No curso de Engenharia Elétrica da UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), a primeira interação dos alunos com instrumentos de medição, mais especificamente o multímetro digital, é feita nas disciplinas de Fenômenos Eletromagnéticos e Análise de Circuitos A. Os laboratórios de tais disciplinas e de algumas outras serão o ponto focal da utilização do dispositivo neste trabalho desenvolvido.

1.1.1 Delimitações do tema

Para o desenvolvimento de um multimedidor capaz de ler diversos canais de maneira isolada é necessária a utilização de tecnologias de maior custo, tais como: amplificadores operacionais isolados, transformadores de corrente com múltiplos taps, ADCs de alta precisão e velocidade, entre outras.

Dessa maneira, para que o dispositivo mantenha-se de baixo custo, este será feito de maneira modular, possuindo apenas um canal de tensão e um canal de corrente isolados entre si. Sua modularização se dará pela possibilidade de utilizar mais de um multimedidor em paralelo — medindo um canal extra de tensão e corrente para cada adição — com seus sinais sincronizados.

Existem vários modos de se projetar uma fonte de alimentação adequada ao sistema proposto, mas para o escopo deste trabalho, foi optado por se utilizar uma fonte comercial que será escolhida para atender as necessidades do protótipo em questão.

1.2 PROBLEMA E PREMISSAS

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná - campus Curitiba, possui dois laboratórios de ensino para as disciplinas de Fenômenos Eletromagnéticos e Análise de Circuitos A e B, ofertadas por diversos cursos da universidade. Os laboratórios são salas com bancadas de testes para circuitos elétricos que possuem fontes de tensão e corrente, bem como módulos de medidores para diversos fins.

Esses medidores, porém, são completamente analógicos, possuem fundo de escala que não condizem necessariamente com os testes que precisam ser realizados durante as aulas práticas e, muitas vezes, não estão em condições adequadas de funcionamento. Isso se dá por sua complexidade de reparos. Tanto por necessitarem peças antigas para reposição, quanto pela quantidade de peças mecânicas em seu interior. Adicionalmente, o processo de reparo demanda tempo adicional para a realização de testes, como calibração posterior. Finalmente, estes equipamentos não possuem sistemas de proteção adequados para o uso em sala de aula – local em que o aparelho sofre desgaste por erros comuns da prática de discentes.

Adicionalmente, há também a questão de custos de aquisição de módulos novos que se adéquem às bancadas utilizadas nos laboratórios e ao tipo de uso. Há uma grande limitação sobre o número de dispositivos disponíveis, dado os valores de medidores encontrados no mercado e disponibilidade de recursos da universidade.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolvimento de um multimedidor modular open source com comunicação *wireless* de baixo custo para laboratórios da UTFPR.

1.3.2 Objetivos Específicos

Projetar um multimedidor de baixo custo modular capaz de medir tensão e corrente CC/CA simultaneamente, com proteções contra curto-circuito e sobretensão. Comunicação com um *smartphone* ou um computador por protocolo *wireless* para apresentar as formas de onda para ser utilizado nos laboratórios das disciplinas iniciais de engenharia elétrica da UTFPR – campus Curitiba.

Para o desenvolvimento do multimedidor, são necessários os seguintes objetivos secundários:

- Levantar, juntamente dos professores que utilizam os laboratórios e que utilizarão o equipamento, quais as necessidades físicas, parâmetros de medida, e níveis de tensão e corrente necessários para atender os requerimentos das práticas experimentais;
- Verificar quais são os métodos comumente utilizados por equipamentos profissionais para proteção e amostragem de dados;
- Definir as funções específicas do equipamento;
- Listar os materiais necessários para a construção do equipamento;
- Escolher os softwares e protocolos a serem utilizados para o desenvolvimento do projeto;
- Projetar um protótipo do multimedidor;
- Desenvolver um sistema de fixação e alimentação para sua instalação nas bancadas de laboratório e;
- Realizar o teste do protótipo.

1.4 JUSTIFICATIVA

Uma ferramenta de medição de baixo custo, com capacidade de atender às principais demandas de obtenção de dados, proteção e simplicidade de reparos, bem como a possibilidade de replicabilidade de maneira simples, facilita o dia a dia dos usuários dos laboratórios de aulas práticas. Assim, tornar o ensino mais dinâmico e adequado à prática almejada, entendendo a experiência de ensino das disciplinas através do tratamento de dados de maneira mais específica e observação simultânea das formas de onda. Apesar do foco ser a UTFPR, o projeto pode ser implementado por outras universidades, escolas e entusiastas por ser uma ferramenta *open source*.

1.5 METODOLOGIA DE PESQUISA

Este trabalho se trata de uma pesquisa exploratória aplicada que visa o desenvolvimento de um protótipo de multimedidor com suas especificidades e testes para assegurar sua viabilidade.

Na sequência, serão pesquisados métodos de amostragem utilizados em produtos comerciais e aprofundar os conhecimentos sobre microcontroladores, componentes e plataformas de desenvolvimento escolhidos.

Para a elaboração deste, será necessário compreender melhor o problema que os professores das disciplinas de circuitos da UTFPR enfrentam com os equipamentos de medição disponíveis para as aulas, coletando informações sobre quais medições seriam mais importantes e quais proteções deveriam ser consideradas para os mesmos.

Finalmente, será necessário desenvolver um sistema elétrico, um sistema mecânico (carcaça), um software e um firmware para a interação do usuário com o medidor. Isso demandará um estudo dos componentes a serem utilizados, bem como definir quais programas e ferramentas de desenvolvimento serão necessários para cada uma das áreas.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para atingir os objetivos geral e específicos, este trabalho será estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 01: Introdução do tema, motivação e dos objetivos.
- Capítulo 02: Referencial Teórico.
- Capítulo 03: Especificações e Premissas Adotadas.
- Capítulo 04: Materiais e Metodologia.
- Capítulo 05: Testes e Resultados.
- Capítulo 06: Conclusões.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo será dedicado a explicar como funcionam as várias partes envolvidas na construção e funcionamento de um multímetro digital e/ou multimedidor.

Neste trabalho, o objetivo é desenvolver um multímetro capaz de medir tensão e corrente simultaneamente e enviar os dados para um *smartphone* por meio de conexão *wireless*. Considerando essa proposta, foram analisadas três opções para servir como base: um multimedidor, um multímetro e um osciloscópio.

O multimedidor é um dispositivo geralmente trifásico, que permite a medição simultânea de tensão e corrente, exibindo as formas de onda em um display. Possui três ou mais canais simultâneos. No entanto, apresenta a limitação de possuir apenas um referencial de medição e resolução na ordem de 1 V nos modelos mais baratos e 0,1 V nos modelos mais caros. A mesma limitação (e valores) acontece para a resolução da corrente (FLUKE, 2014).

Por outro lado, o multímetro é um dispositivo monofásico que permite a medição de apenas um canal por vez, como tensão, corrente, resistência, capacidade, entre outros. Este não exibe as curvas na tela, fornecendo apenas valores. A resolução varia, sendo que nos modelos mais simples utilizados nos laboratórios da UTFPR pode chegar a 0,1 mV, enquanto a resolução da corrente é da ordem de 1 μ A (MINIPA, 2013).

O osciloscópio, por sua vez, é uma ferramenta amplamente utilizada para a visualização gráfica de sinais elétricos, oferecendo uma leitura detalhada das variações de tensão ao longo do tempo. Com ele, é possível medir sinais com alta precisão e analisar eventos rápidos que não seriam capturados por multímetros convencionais. Equipado com múltiplos canais, o osciloscópio permite a comparação simultânea de diferentes sinais. Sua resolução de tela varia dependendo do modelo, indo de 800x600 até 1920x1080 pixels, o que proporciona uma visualização clara de formas de onda complexas. Além disso, os sistemas de disparo (*triggering*) garantem a captura e estabilização de sinais repetitivos, essenciais para análises em tempo real (KEYSIGHT, 2024).

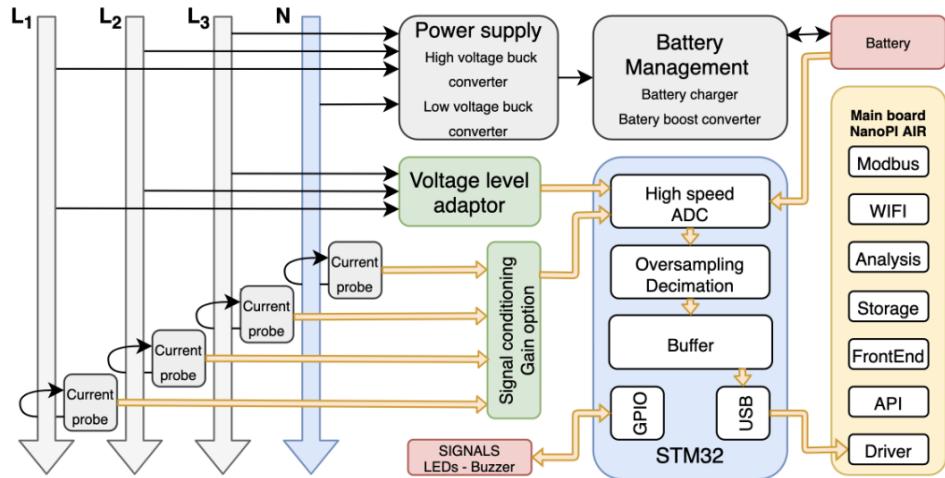
Considerando que o dispositivo deve ser utilizado como uma ferramenta didática em sala de aula, a apresentação das formas de onda é relevante e é essencial uma resolução adequada para o bom aproveitamento das disciplinas. Assim, optou-se por uma abordagem que reúne as características de um multímetro e um osciloscópio.

Como base para o multimedidor foi utilizado o diagrama de blocos do *oZm3* (Figura 1), um produto *open source* (projeto aberto) já introduzido no mercado. O *oZm3*, por sua vez, é uma versão trifásica do (*openZmeter*). Ambos possuem interface de apresentação dos dados via uma página do navegador de um celular ou computador.

Para o multímetro, foi utilizado um diagrama de blocos, conforme Figura 2 disponível no site da *Texas Instruments*, que explica o funcionamento de um produto completo.

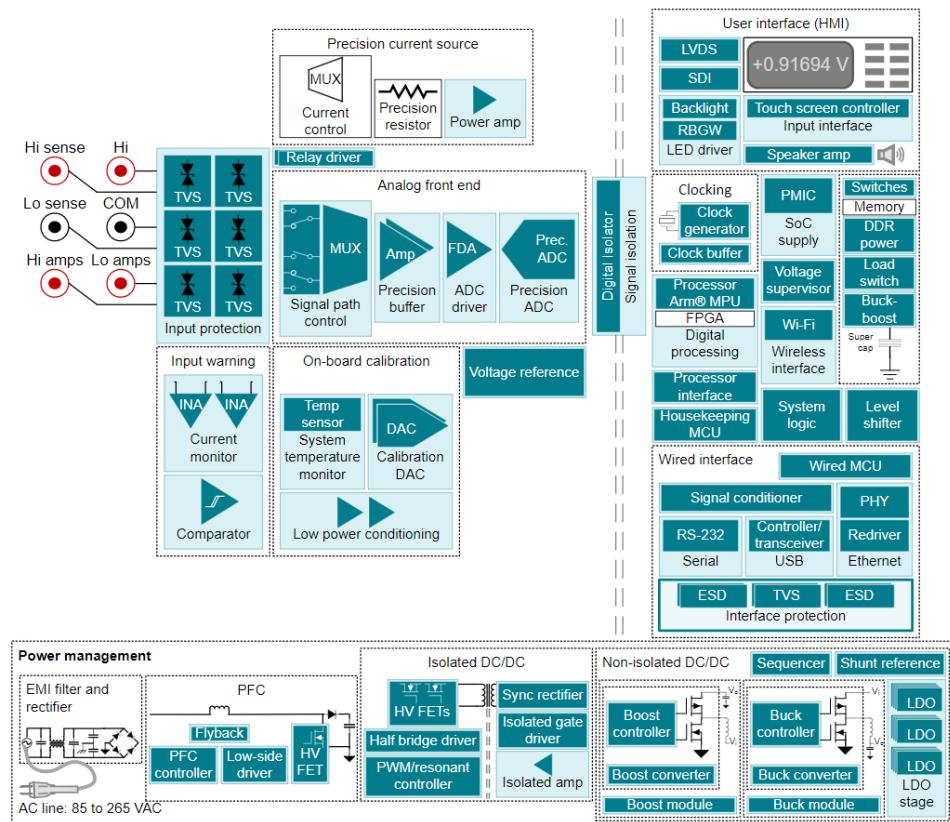
Sobre o padrão comercial, existem diversos dispositivos que atendem a necessidades diferentes, como por exemplo, segurança (CAT rating), resolução, precisão ou até mesmo con-

Figura 1 – Diagrama de blocos do multimedidor trifásico oZm3



Fonte: (VICIANA et al., 2023).

Figura 2 – Exemplo de um Diagrama de Blocos de um Multímetro de Bancada



Fonte: (INSTRUMENTS, 2022).

fiabilidade de leitura em condições de temperaturas elevadas, entre vários outros. Adicionalmente, existem também inúmeros fornecedores, tanto regionais, nacionais como internacionais, salientando a diversidade de produtos.

Dispositivos como o representado na Figura 3 possuem boa métrica de confiabilidade e também são portáteis, além de provirem medidas em *True-RMS* (*True Root Mean Square*). Este dispositivo é muito benquisto, tendo boas avaliações no mundo inteiro.

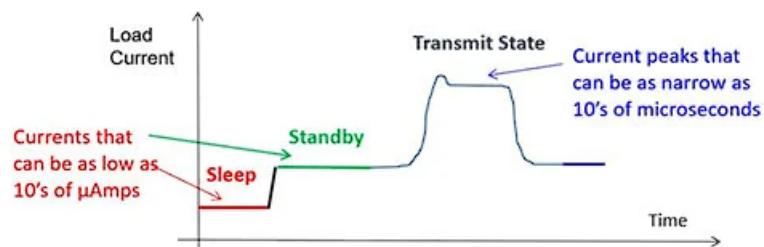
Figura 3 – Fluke 28-II



Fonte: (FLUKE, 2023).

Sobre multímetros digitais, também existem aqueles que são de bancada ou *bench-top*. Tais dispositivos são de uso mais específico, prezando a precisão de leitura, resolução e também contendo algumas *features* a mais. Como exemplo, o DMM7510 7.5 *Digit Graphical Sampling Multimeter* da Tektronix é um dispositivo que porta todas as funções já explícitas e também várias outras de uso extremamente específico, como *profiling* de corrente de consumo de energia em dispositivos IoT (Internet das Coisas), como mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Gráfico de corrente de consumo de um dispositivo, feito pelo DMM7510 7.5 Digit Graphical Sampling Multimeter



Fonte: (TEK, 2012).

No caso de multimedidores, que são somente de uso específico industrial, alguns fornecedores e dispositivos se sobressaem. O dispositivo da Figura 5 é um multimedidor da família MMW e é capaz de coletar todas as medidas de grandezas elétricas no meio industrial, tem a função de parametrizá-las por meio de aplicativos IoT, identifica sequência e falta de fases, entre outras várias funções que são benéficas para tal aplicação.

Figura 5 – Exemplo de multimedidor, família MMW



Fonte: (WEG, 2023).

2.1 Proteção de Entrada

Proteção de entrada é um assunto extremamente abrangente quando se trata de circuitos eletrônicos. Dependendo da função que este tenha que exercer, existem infinitas topologias que podem ser consideradas. Algumas exigências, porém, são comuns, como a necessidade de um circuito de proteção contra descargas eletrostáticas, ou ESD (*Electrostatic Discharge*). Tais descargas podem entregar picos de tensão extremamente altos, chegando até 30 kV, o que é extremamente danoso a qualquer circuito que use semicondutores. Pulsos de pico tão alto quanto 2500 V (Volts) já são o suficiente para danificar a maioria dos circuitos eletrônicos. Notoriamente, seres humanos são capazes de entregar descargas de até 20 kV por consequência da capacidade inata à sua fisiologia (ONSEMICONDUCTOR, 2005).

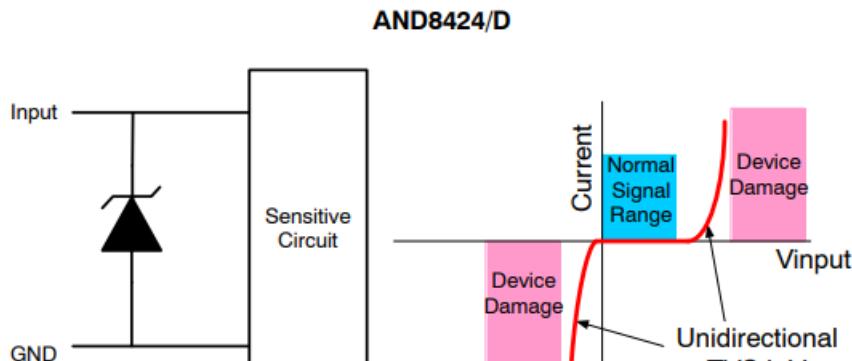
2.1.1 ESD

Esse tipo de proteção é necessária para circuitos que fazem interface com o meio físico e normalmente é exercida por um circuito básico de componentes TVS (*Transient Voltage Suppressor*). Os dispositivos semicondutores mais simples (e também regularmente) utilizados para exercer esta função são diodos Zener (INFO, 2023b).

Ao serem submetidos a uma tensão maior que à especificada como limite de operação do circuito a ser protegido, diodos Zener apresentam uma resistência baixa, fechando a passagem de corrente entre o circuito e o terra do equipamento. Este circuito pode apresentar uma configuração unidirecional ou bidirecional, dependendo da necessidade do circuito a ser protegido (INSTRUMENTS, 2012).

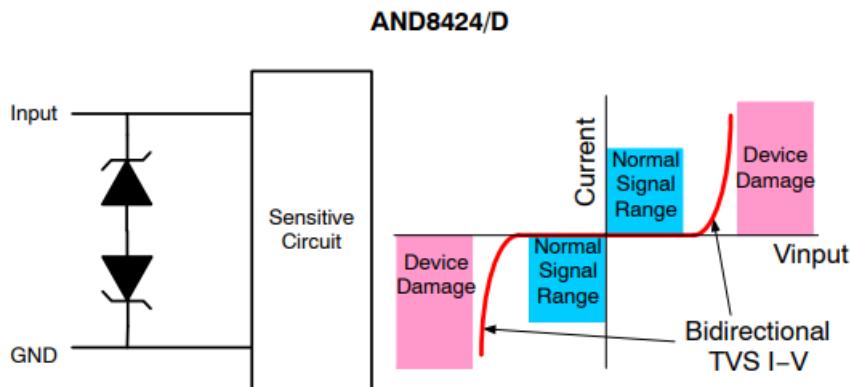
As Figuras 6 e 7 demonstram a utilização básica de tal circuito e o conceito por trás da tensão de ruptura de tal semicondutor.

Figura 6 – Exemplo de uso TVS Unidirecional



Fonte: (ONSEMICONDUCTOR, 2009).

Figura 7 – Exemplo de uso TVS Bidirecional



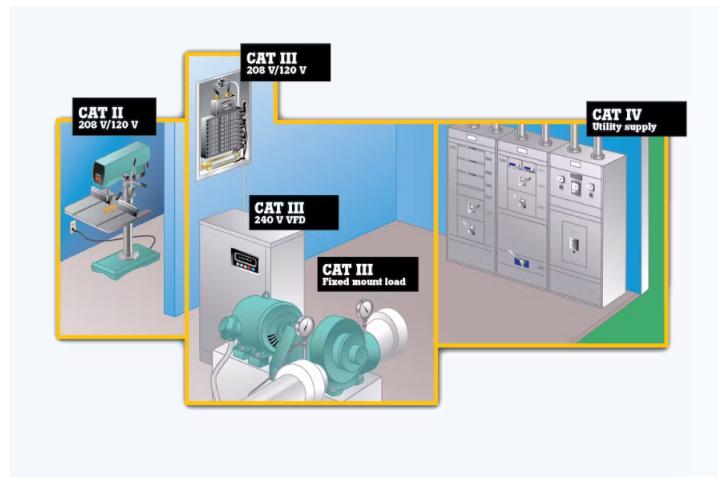
Fonte: (ONSEMICONDUCTOR, 2009).

2.1.2 Proteção Específica para Equipamentos de Medição de Sinais Elétricos

Primeiramente, se faz necessário explicar sobre a classificação de proteção em relação a equipamentos elétricos. A classificação mais robustamente utilizada é a CAT, definida pela norma IEC 61010-1, que funciona conforme a Figura 8. Os numerais indicam o potencial de energia que o sistema pode entregar caso ocorra um curto-circuito ou um transiente de tensão, i.e. um instrumento CAT III tem que estar protegido contra transientes muito maiores que um dispositivo CAT II.

Dispositivos CAT IV devem estar protegidos a nível de distribuição de energia, pois estes serão utilizados em conexão entrada de energia de uma facilidade. Dispositivos CAT III devem estar protegidos a nível de distribuição interna (quadros de distribuição), podendo esta ser trifásica ou monofásica. Dispositivos CAT II devem estar protegidos a nível de equipamento terminal ou de uso comum, sendo estes eletrodomésticos e afins. Dispositivos CAT I devem estar protegidos a nível de circuitos eletrônicos e transformadores de baixa potência (SILVEY, 2022).

Figura 8 – Ilustração da Classificação CAT



Fonte: (SILVEY, 2022).

2.1.2.1 Proteção de Entrada para Circuitos de Corrente

O circuito de proteção para a entrada de correntes se divide em duas partes, sendo uma delas para o *range* de A (Amperes) e os *ranges* de mA e μ A.

Para a entrada de Amperes, é utilizado um fusível HRC (*High Rupturing Capacity*), geralmente de 11 A e 1000 V (para se adequar à classificação CAT III, no caso do multímetro que foi estudado), para se prevenir arcos voltaicos após a queima do fusível, negando a possibilidade de uma continuação da condução de curto-circuito ou sobrecorrente. Logo após, é conectado um *shunt*, 0R01 Ω , entre o terra e a entrada, no qual será feita a medida.

Para a entrada de mA e μ A, também é utilizado um fusível HRC, mas de 500 mA e 1000 V. Em sequência, é colocado um retificador em ponte de diodos entre o canal e o terra, para dar clamp em possíveis sobretensões (normalmente ocasionada pela utilização errônea do equipamento, colocando-se a entrada de corrente para medir tensão) até que o fusível possa atuar. Internamente, há um *switch* entre mA e μ A. (FLUKE, 1998)

Para o *switch* de mA, é conectado em série um resistor *shunt* de 1 Ω com o *shunt* do *range* de A (0R01 Ω), para ser feita a medição em uma resistência aproximada de 1 Ω .

Para o *switch* de μ A, é conectado um resistor *shunt* de 100 Ω , no qual será feita a medição. (INFO, 2023b)

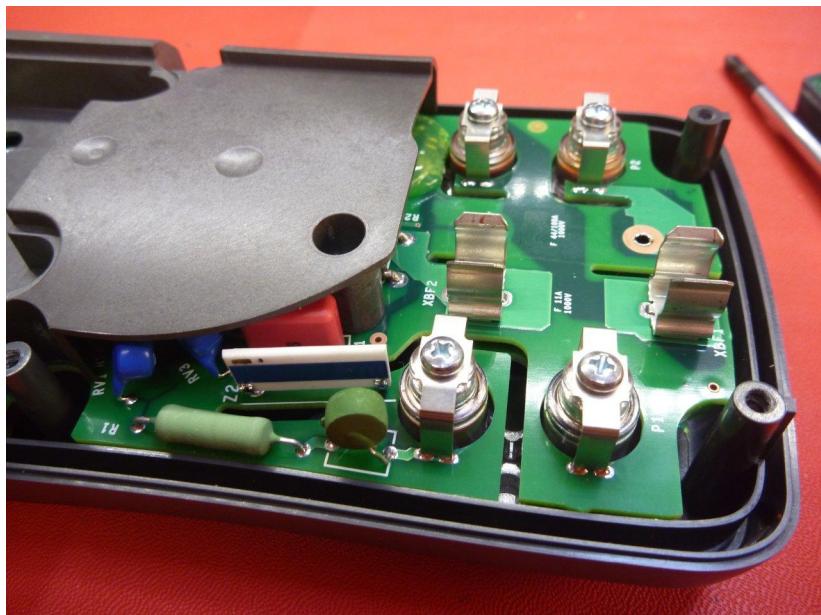
2.1.2.2 Proteção de Entrada para Circuitos de Tensão

O circuito de proteção para a entrada de tensão é simples, sendo composto por um termistor PTC (*Positive Temperature Coefficient*) em série com um resistor de 10 M Ω , no qual será feita a medida (FLUKE, 1998). Esse termistor atua limitando a corrente inicial, enquanto o resistor é responsável pela medição precisa da tensão.

Para complementar essa proteção, conectado em paralelo ao resistor de $10 \text{ M}\Omega$ com o *ground input*, há uma série de varistores MOV (*Metal Oxide Varistor*) de rápida atuação. Esses varistores protegem contra transientes de sobretensão enquanto o termistor está esquentando e ajustando sua resistência. Embora seja possível utilizar apenas um varistor, a utilização de vários em série aumenta a distância de fuga de corrente, reduz a chance de arcos voltaicos e dissipá a energia entre os componentes, resultando em uma proteção mais eficiente (EEV-BLOG, 2012).

Uma parte comum do design geral da PCB (*Printed Circuit Board*) são *slots* de isolamento de alta tensão, que se resumem a espaços abertos entre partes da placa, que vão receber altas tensões em funcionamento indesejado, para minimizar as chances de arcos voltaicos entre partes do circuito, como destacado na Figura 9.

Figura 9 – Fluke 28-II PCB



Fonte: (MJLORTON, 2012).

2.2 Condicionamento e Aquisição de Sinal

O condicionamento de sinal refere-se ao processo de ajustar e controlar o sinal de entrada que será avaliado pelo ADC (Conversor Analógico-Digital). Esse processo é essencial para garantir que o sinal fornecido ao ADC esteja dentro da faixa adequada de operação e com a qualidade necessária para uma conversão precisa. Normalmente, essa seleção de entrada é realizada por um *MUX* (Multiplexador), que alterna entre diferentes sinais analógicos, ou por *switches* mecânicos, conforme ilustrado na Figura 10. Em algumas situações, pode-se empregar uma combinação desses dois métodos para otimizar a seleção e o condicionamento do sinal de acordo com as características específicas do sistema.

Além de garantir que o sinal analógico esteja dentro do intervalo correto, o condicionamento de sinal também pode envolver o uso de filtros e amplificadores para eliminar ruídos indesejados e aumentar a resolução da medição. Dessa forma, o sinal que chega ao ADC está devidamente ajustado, garantindo maior precisão e confiabilidade nos dados convertidos (INFO, 2023a).

Figura 10 – Switches de um Fluke 28-II



Fonte: (MJLORTON, 2012).

A aquisição de sinal é o processo de captura e conversão de sinais físicos em um formato adequado para análise, processamento ou armazenamento. No contexto da medição de tensão e corrente, a aquisição de sinal refere-se à captura e registro desses parâmetros elétricos em um sistema de medição, permitindo sua análise, processamento ou armazenamento em um formato adequado.

Essa pode ser realizada de diferentes maneiras, dependendo do caso. Em alguns cenários, utiliza-se sondas específicas para cada aplicação, as quais permitem capturar e registrar os parâmetros elétricos de forma precisa. Por outro lado, em certos casos, a aquisição ocorre internamente dentro do circuito do próprio medidor, proporcionando uma solução integrada e simplificada para a captura e registro dos sinais elétricos.

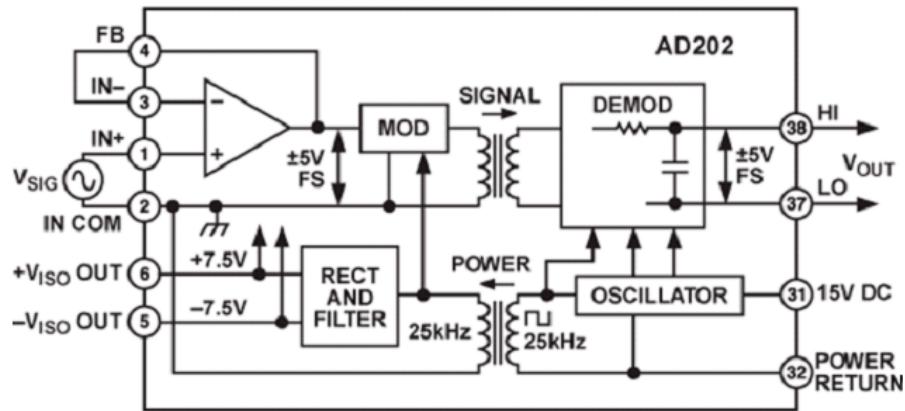
2.2.1 Resistor Shunt

Neste tipo de medição, um resistor de baixo valor ($< 0,1 \Omega$) é colocado em série com o circuito no qual se deseja medir a corrente elétrica, quando esta atravessa o componente, ocorre uma queda de tensão proporcional. Essa queda de tensão pode ser então medida diretamente através de um ADC ou amplificada e então medida para se obter os valores da corrente original (ZIEGLER *et al.*, 2009).

Para a aplicação em 3 canais independentes de corrente, torna-se necessária algum tipo de isolamento. Isso pode ser obtido utilizando-se de amplificadores isoladores — amplificado-

res operacionais que possuem duas referências isoladas entre si. Permitindo uma medição da queda de tensão sobre o resistor *shunt* para cada canal sem interferência mútua, como exemplo o AD202 na Figura 11.

Figura 11 – AD202 um exemplo de amplificador isolador



Fonte: (DEVICES, 2001).

Esse tipo de amplificador, porém, apresenta alto custo e possui uma variação de leitura considerável com a temperatura. São inferiores em precisão a outros métodos de medição que realizam o isolamento do circuito inherentemente por seus aspectos construtivos.

2.2.2 Bobina Rogowski

Utilizando-se do princípio da Lei da Indução de Faraday, a bobina Rogowski trata-se de um loop fechado de fio enrolado em volta de um aro. Esse aro envolve o condutor que, por sua variação de corrente, induz uma tensão elétrica proporcional ao número de espiras e a intensidade da própria corrente a ser medida. Para a medida dos valores obtidos pela bobina Rogowski, é necessário o uso de um integrador (por vezes acoplado no próprio cabo da ponteira de medição) para relacionar a derivada da corrente com a tensão obtida em seus terminais, podendo causar certo erro introduzido pela operação. Um exemplo deste componente é apresentado na Figura 12

É um método amplamente utilizado para medições de correntes CA elevadas e suporta uma grande faixa de frequências. Tem um custo próximo dos transformadores de corrente e insere menos impedância parasita no circuito (ZIEGLER *et al.*, 2009).

Figura 12 – Bobina Rogowski aberta



Fonte: (ZIEGLER *et al.*, 2009).

2.2.3 Circuito Integrado de Medição (*hall effect*)

Existem circuitos integrados capazes de medir a corrente alternada de maneira isolada do restante do circuito. Utilizando-se do efeito hall, o campo magnético gerado pela corrente que passa entre seus terminais é medida por um sensor montado diretamente no substrato do *chip*. A saída do CI (Circuito Integrado) é uma tensão proporcional ao campo magnético e pode ser medida por um ADC, recuperando-se o valor da corrente original.

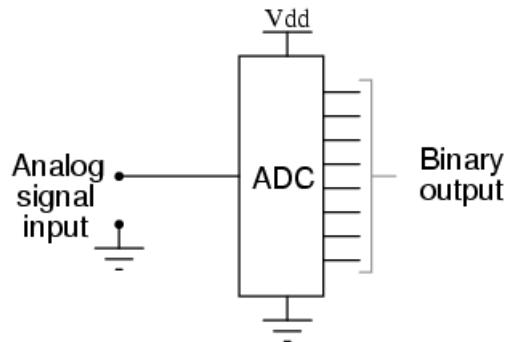
O uso dessa tecnologia traz custo baixo em relação ao uso de TC's ou bobinas Rogowski, fácil implementação no sistema, isolamento diretamente no *chip*. Tal medição, porém, possui uma resolução na ordem de 100 mV/A (considerando um CI que suporte acima de 10 A) e um ruído intrínseco de 11 mV. Como é o caso do ACS712 (SYSTEMS, 2022).

2.3 Conversor Analógico Digital

O ADC (*Analog-to-Digital Converter*) é uma parte integral do funcionamento dos equipamentos de medição elétrica, pois este fará o interfaceamento, ou seja, a leitura do sinal analógico a ser interpretado e o converterá para um sinal digital que pode assim ser processado, como mostrado na Figura 13.

Existem vários tipos de ADCs, sendo alguns deles:

Figura 13 – Diagrama de blocos de um ADC



Fonte: (KUPHALDT, 2021).

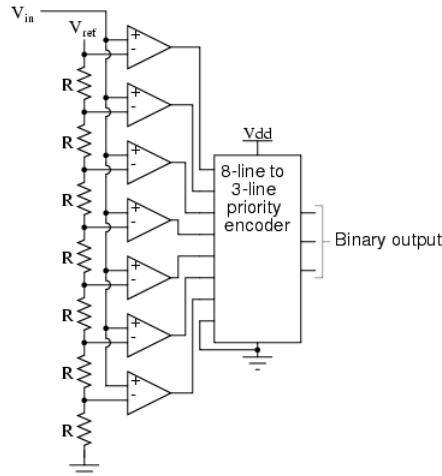
- *Flash* ADC;
- *Digital Ramp* ADC;
- *Successive Approximation* ADC;
- *Tracking* ADC;
- *Slope (integrating)* ADC;
- *Delta-Sigma ($\Delta \Sigma$)* ADC;
- entre outros...

Para fins de objetividade, será somente apresentado o SAR (*Successive Approximation Register*), pois este é o mais comumente utilizado em multímetros e o ADC mais básico, chamado de *Flash*. Porém, dependendo da aplicação e necessidade de resolução ou precisão, são utilizados outros tipos de ADC também.

2.3.1 Flash ADC

Este ADC delimita o princípio de funcionamento desse tipo de dispositivo, formado de uma série de comparadores, como mostrado na Figura 14. Este compara o sinal de entrada com uma tensão de referência única para cada comparador. As saídas destes comparadores são conectadas a um *encoder* de prioridade que produz uma saída binária. Esta topologia não só é a mais simples em termos de operação, mas também é o mais eficiente, em termos de velocidade, sendo limitado só pelos comparadores e *delays* de propagação dos gates. Infelizmente, o *flash* ADC necessita de um número excessivo de componentes, sendo necessários 255 comparadores para uma saída de 8-bits, que seria a necessidade de saída de qualquer ADC moderno.

Figura 14 – Diagrama de blocos de um ADC Flash



Fonte: (KUPHALDT, 2021).

2.3.2 SAR ADC

O SAR funciona de maneira que se é conectado um contador SAR, que faz uma contagem testando todos os valores de bits, começando com o mais significativo e terminando com o menos significativo a um DAC que então sua saída é comparada com o sinal analógico a ser obtido.

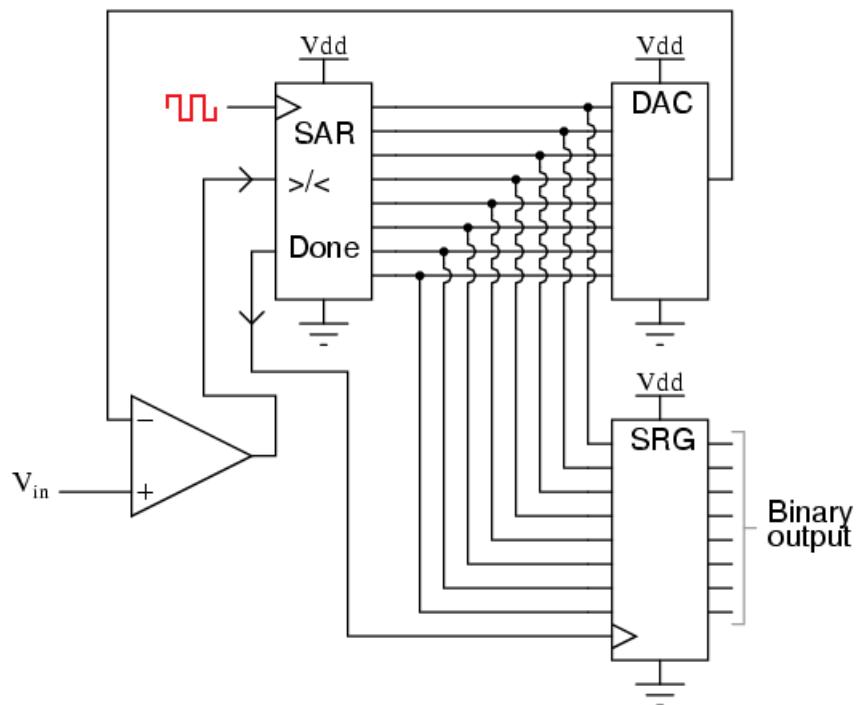
Durante o processo de contagem, um registro monitora a saída deste comparador para ver se a contagem binária é maior ou menor que a entrada do sinal analógico, ajustando os valores de bit de acordo. A maneira que este registro conta é idêntica ao método de conversão decimal para binário, portanto diferentes valores de bits são testados do bit mais significante ao menos significante para conseguir um número binário que se iguala ao número decimal original.

O circuito e resultado de leitura do ADC em questão, em termos simples, pode ser representado pelas Figuras 15 e 16.

2.4 Referência de Tensão

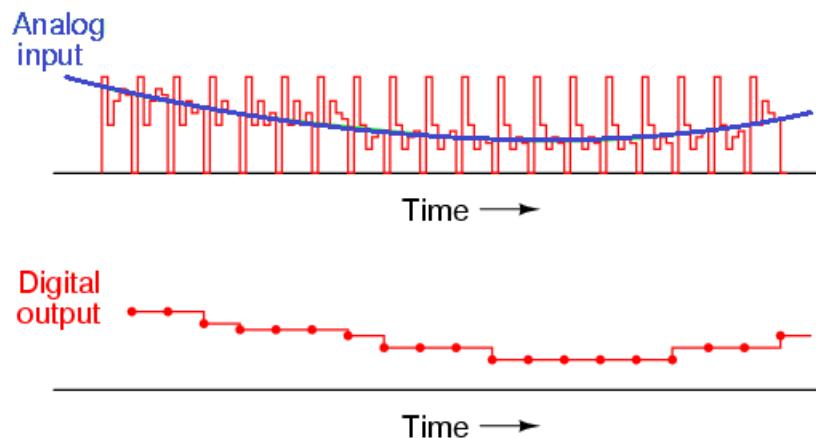
A referência de tensão do ADC, utilizada para a leitura do sinal analógico, pode ser interna ou externa ao *chip*. Quando interna, trata-se de uma solução mais barata e de menor precisão, adequada para equipamentos que não exigem alta precisão. Quando externa, oferece uma melhor precisão e, consequentemente, uma leitura mais precisa. Atualmente, essa referência externa é fornecida por um CI (Circuito Integrado) especializado, como o ICL8069 (MAXIM, 2005), amplamente utilizado nas soluções mais avançadas.

Figura 15 – Diagrama de blocos de um ADC SAR



Fonte: Adaptado de: (KUPHALDT, 2021).

Figura 16 – Plot sobre o tempo da saída de um ADC SAR



Fonte: Adaptado de: (KUPHALDT, 2021).

2.5 Aviso de Entrada Incorreta (*Input Warning*)

O termo *input warning* refere-se a um aviso emitido quando ocorre uma entrada incorreta ou anormal em um sistema de medição. Esse tipo de aviso é acionado quando há um problema que pode afetar a precisão ou a confiabilidade dos dados de medição, como condições fora

dos limites esperados, por exemplo, valores de tensão ou corrente que ultrapassam os limites especificados pelo instrumento de medição.

Quando isso ocorre, pode-se utilizar um alarme para alertar o usuário sobre um erro que pode prejudicar a leitura do dispositivo. Os alarmes são divididos em duas categorias principais: *hard* e *soft*.

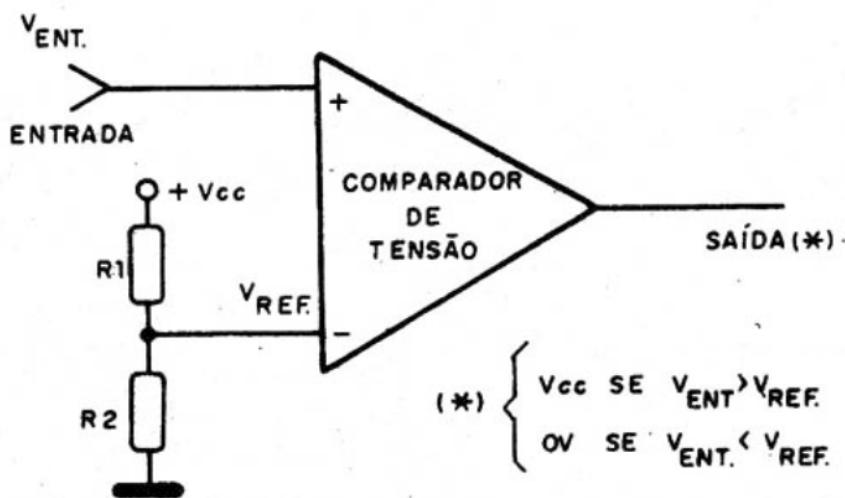
No caso do alarme *hard*, o aviso é emitido por uma fonte que não depende do circuito, como um relé externo ou um circuito separado de monitoramento. Isso garante que, mesmo que o sistema principal apresente uma falha total, o alerta ainda esteja ativo. No entanto, essa abordagem torna a implementação mais custosa e complexa. Por outro lado, o alarme *soft* provém do próprio circuito e é utilizado como uma forma de alerta quando não há risco direto de falha total do sistema ou quando o alarme é de baixa urgência (STAFF, 2015).

No contexto do projeto, optou-se pela utilização de um alarme *soft*, uma vez que sua implementação é mais simples — consistindo apenas em um buzzer ligado a uma das portas lógicas disponíveis do microcontrolador — e possui um custo extremamente baixo.

2.5.1 Comparador para detecção de falhas

Para o caso do multímetro a ser desenvolvido pode-se utilizar um simples circuito comparador para monitorar as tensões de entrada e indicar ao usuário que a escala utilizada está incorreta ou, até mesmo, que a tensão ou corrente medidas está acima do limite suportado. O circuito pode ser visto na Figura 17 e consiste apenas em um amp-op.

Figura 17 – Circuito de um comparador utilizando dois resistores como referência de tensão



Fonte: (BRAGA, 2017).

Dessa maneira, uma vez definida a tensão de referência, pode-se utilizar-se da saída para disparar algum tipo de aviso.

2.5.2 Tipos de aviso

Os avisos podem ser luminosos, sonoros ou até mesmo gerar vibrações e movimentações mecânicas mais intensas para alertar ou notificar o usuário sobre o estado do dispositivo (STAFF, 2015).

Em situações menos graves, como o uso inadequado da escala do medidor, pode-se utilizar uma luz de aviso. Esse tipo de alerta não danifica o dispositivo, mas impede a leitura correta dos dados.

Por outro lado, em casos mais sérios, onde há risco de dano ao aparelho de medição ou até mesmo ao usuário, é necessário um aviso mais contundente, como uma sirene, para garantir a devida atenção (STAFF, 2015).

2.5.3 Alerta durante uso no laboratório

Um erro comum em laboratórios de eletrônica é a tentativa de medição de tensão elétrica utilizando-se do modo de medição de corrente elétrica do dispositivo.

Comumente a corrente é medida através da queda de tensão em um resistor *shunt*, conforme discorrido em 2.2.1. Colocar as ponteiras em um ponto onde haja tensão sem nenhum dispositivo limitador de corrente, faria com que o resistor *shunt* sofresse um enorme estresse levando possivelmente a sua falha ou diminuição drástica da vida útil.

Como geralmente há um sistema de proteção nesses dispositivos, muitas vezes, há a queima de um elemento fusível no lugar do resistor *shunt*. Porém, é necessário alertar o usuário de que o uso do equipamento foi incorreto e, caso a corrente seja removida a tempo, preservar a própria proteção. Caso essa seja rompida, também é importante notificar o usuário de que a mesma deve ser substituída.

Para tanto, pode-se utilizar um *buzzer* com o som alto o suficiente para notificar o usuário mesmo em um ambiente com certo ruído, como é o caso de um laboratório de aula.

2.6 MCU e Interface de Comunicação

2.6.1 Microcontroladores

O MCU ou *Microcontroller Unit* é um dispositivo eletrônico altamente integrado contendo um processador, memória e periféricos de entrada e saída. Os microcontroladores são amplamente utilizados em uma variedade de aplicações, desde eletrodomésticos e automóveis até dispositivos médicos e sistemas de controle industrial.

Ele é projetado para ser compacto, de baixo consumo de energia e fácil de programar. Eles são usados para controlar e executar tarefas específicas em um sistema eletrônico. Ao

contrário de um microprocessador, que é projetado para executar uma ampla variedade de tarefas e requer componentes externos adicionais, o MCU possui praticamente todos os recursos necessários integrados em um único *chip*.

No caso dos medidores, o MCU é utilizado como o interpretador dos sinais obtidos pelo ADC, podendo realizar as operações matemáticas necessárias para se obter os valores médios, eficazes, pico, e demais necessários, a partir da amostragem obtida. Esse é o caso do *3Ph-ozm*, que utiliza um microcontrolador com pré-processador dos dados e como sistema de controle para as funções fundamentais do dispositivo (VICIANA *et al.*, 2023).

Juntamente do MCU, o *3Ph-ozm* utiliza um microprocessador para realizar o trabalho de comunicação através de *Wi-Fi* e *Bluetooth*. Tal abordagem, porém, traz um custo mais alto ao projeto, uma vez que um microprocessador é mais caro que um microcontrolador — que pode ser capaz de tanto processar, como enviar os sinais (COMPONENTS101, 2019).

2.6.1.1 Microcontroladores Considerados

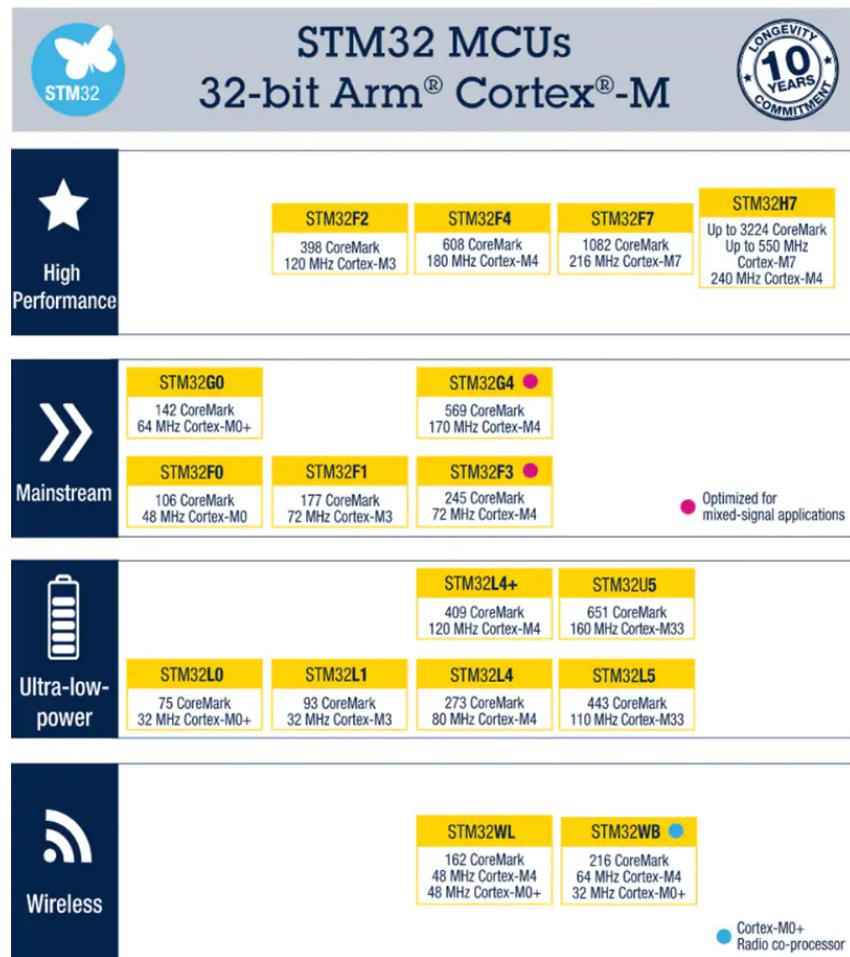
Existe uma vasta gama de MCU's capazes de realizar o processamento dos sinais obtidos. Logo, se faz necessária uma filtragem prévia dos principais requisitos do projeto antes mesmo do inicio da metodologia. Para tanto, foram considerados os seguintes pontos:

- Popularidade — um item popularmente conhecido pode ser encontrado com maior facilidade em lojas locais;
- Facilidade de programação — como um dos objetivos primordiais do projeto é a replicabilidade e a disponibilização por meios *open source*, a simplicidade na programação deve ser levada em conta;
- Preço — o microcontrolador tem potencial para ser o item único mais custoso do projeto, reduzir seu preço auxiliaria na questão do baixo custo;
- Comunicação — dispositivos com *Wi-Fi*, *I²C*, UART ou demais protocolos de comunicação já embarcados auxiliariam no processo de transmissão e tratamento dos dados obtidos.

Segundo esses critérios e as informações disponíveis no artigo *How to Select the Microcontroller for Your New Product* (TEEL, 2019), os MCU's adequados à finalidade de medição seriam os que possuem arquitetura de 32 bits. Estes possuem também certas características de microprocessadores como, por exemplo, a lógica de prioridade nas interrupções e a velocidade de trabalho com ponto flutuante.

Os MCU's mais populares dessa arquitetura são os da família STM32, representado na Figura 18.

Figura 18 – Família STM32 separada por função



Fonte: (Mouser, 2023).

Para a seleção de um microcontrolador adequado, pode-se seguir a linha *mainstream* da Figura 18, pois tratam-se de MCU's populares e que possuem vasta documentação disponível online. Porém, ao utilizar tais microcontroladores, seria necessária a utilização de outro periférico para a função de *Wi-Fi* e/ou *Bluetooth*.

2.6.2 Apresentação dos dados e Comunicação

Os dispositivos de medição que possuem comunicação com sistemas externos o fazem de diversas maneiras.

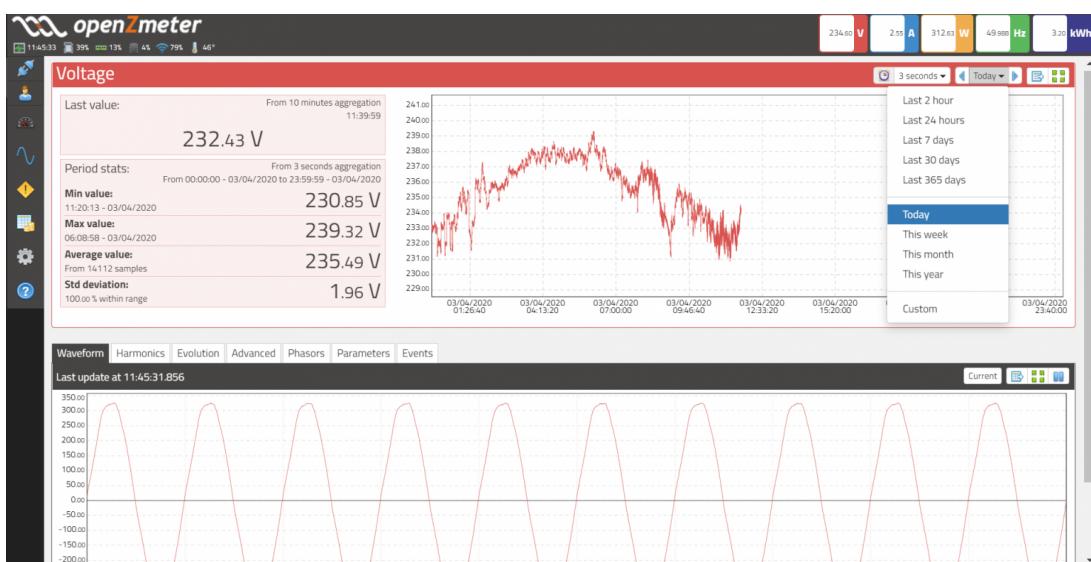
A mais simples delas trata-se de um display que apresenta os valores da leitura ao usuário. Este pode utilizar a tecnologia de LCD ou semelhantes para mostrar apenas números, como também pode mostrar as formas de onda em telas que possuam uma resolução maior.

Os dados também podem ser enviados a um sistema externo que fará a apresentação dos dados, os armazenará para usos posteriores, ou dará outra finalidade conforme o sistema.

Para realizar esse envio, podem-se utilizar diversas tecnologias diferentes, desde protocolos com fio (CAN, MODBUS, I^2C , UART, etc.) até protocolos *wireless* — que são os mais aprofundados nessa seção.

Baseando-se no artigo (ABATE *et al.*, 2019), as tecnologias que podem ser usadas são as encontradas no ambiente de IoT como LoRa, Sigfox e NB-IoT. Também é possível utilizar tecnologias mais populares, como é o caso do (VICIANA *et al.*, 2023) que utiliza *Wi-Fi* e *Bluetooth* para realizar sua comunicação e o display de seus dados através de uma interface web conforme a Figura 19.

Figura 19 – Interface WEB usada no 3Ph-ozm



Fonte: www.openzmeter.com/.

2.6.3 Soluções completas

Há também a possibilidade da utilização de módulos que possuem um microcontrolador e outras funções integradas. Como é o caso do ESP32-WROOM-32D (Figura 20), construído em torno do *chip* ESP32.

Esse módulo possui um microprocessador *Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6* e as funções principais de um microcontrolador, como ADC próprio e tratamento de interrupções por ordem de relevância. Além de possuir dois DACs. O principal diferencial desse módulo, porém, é a sua capacidade de trabalhar com *Wi-Fi* e *Bluetooth* sem a necessidade de nenhum periférico extra, além de possuir grande facilidade em sua programação (ESPRESSIF, 2023).

Figura 20 – Módulo ESP32-WROOM-32D frente e verso

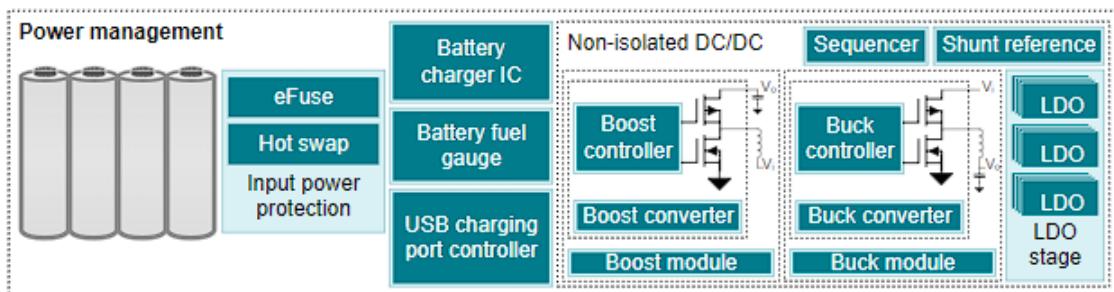


Fonte: DigiKey.

2.7 Power Management

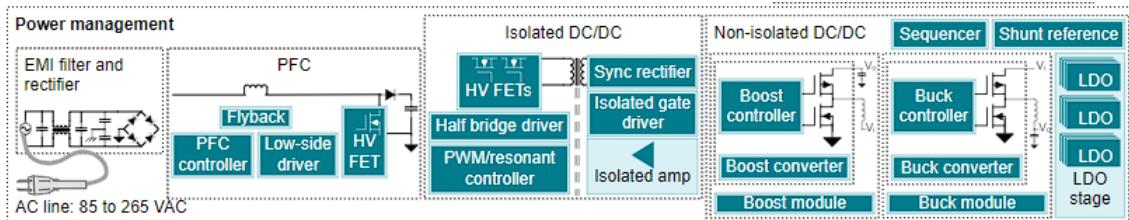
Multímetros digitais se apresentam em duas configurações, sendo estas de bancada e portátil. Na configuração portátil, se é utilizado pilhas ou baterias para prover a tensão necessária para se ligar todos os subsistemas do aparelho. Já na configuração de bancada, é utilizada uma fonte isolada, conectada à rede de energia para fornecer a tensão adequada para se ligar todos os subsistemas do dispositivo, como se pode ver nas Figuras 21 e 22, dos *designs* propostos pela TI.

Figura 21 – Diagrama de Blocos de um Multimetro Portátil



Fonte: (INSTRUMENTS, 2022).

Figura 22 – Diagrama de Blocos de um Multímetro de Bancada



Fonte: (INSTRUMENTS, 2022).

Existem vários modos de se projetar uma fonte adequada ao sistema proposto, mas para o escopo deste trabalho, foi optado por se utilizar uma fonte comercial que será escolhida para atender as necessidades do protótipo em questão.

2.8 Calibração

Todo equipamento de medição precisa ser calibrado para exercer a sua função com precisão. Normalmente, este serviço é feito pelo provedor do produto e, dependendo do tipo de uso de tal produto e sua precisão, feito em intervalos regulares para garantir sua eficácia. Muitas vezes, realizar a calibração de um equipamento como um multímetro pode ser mais caro que comprar um novo.

Para se calibrar um multímetro, é utilizado um outro dispositivo com no mínimo 4x a precisão do multímetro a ser calibrado. Portanto, normalmente se é utilizado um equipamento específico para exercer tal função. Esse equipamento geralmente é chamado de *calibrator* ou *standard* (FLUKE, 2023).

Tais equipamentos também necessitam ser calibrados, então o fornecedor deve garantir que estes estejam de acordo com os órgãos regionais, nacionais e internacionais em questão de procedência da calibração. Uma documentação e traçabilidade extensivas são requerimentos indispensáveis.

O *calibrator* tem a capacidade de fornecer sinais elétricos precisos e de função variável, que podem ser produzidos de μV a kV , normalmente. Estes sinais, em *ranges* específicos, serão lidos pela UUT (*Unit Under Test*) e então serão anotados os resultados da medição, fazendo-se um levantamento de dados do multímetro. Após tal levantamento, realiza-se os passos necessários para calibrar tal dispositivo, dependendo das suas necessidades e também do fabricante do mesmo. Este equipamento também consegue fazer medições de precisão, caso seja necessário.

O *standard* cumpre a mesma função do *calibrator*, mas geralmente é limitado a poucos *ranges* de geração de sinal e somente uma função, o que possibilita uma performance e precisão muito maior que a do *calibrator*.

Entretanto, existe uma proposta de calibração do equipamento on-board, feita pela TI (*Texas Instruments*), utilizando-se um DAC para corrigir erros de leitura, seja por mudanças de temperatura, mudança na tensão de referência do ADC ou qualquer outro fator que possa afetar a leitura do sinal. Também nesse circuito é incluído um sensor de temperatura para avisar o usuário sobre mudanças consideráveis de temperatura.

O funcionamento do DAC, porém, está diretamente relacionado à sua tensão de referência. Geralmente, se é utilizada uma referência externa para medidas de precisão, pois esta estará isolada da aquisição de sinal do multímetro e logo não será afetada caso haja uma mudança de temperatura (O'REILLY, 2012). A solução proposta pela TI é de se utilizar um DAC de precisão (16-Bits) com *on-board low-drift voltage reference* junto com um *buffer* por meio de

um amp-op de alta velocidade. Tais componentes são de uso extremamente específico e por isso são caros, colocando-os assim fora do escopo do estudo deste trabalho (INSTRUMENTS, 2017).

3 ESPECIFICAÇÕES E PREMISSAS ADOTADAS

Neste capítulo, serão apresentadas tanto as especificações do protótipo quanto as premissas adotadas, tendo em vista os objetivos do projeto.

3.1 Especificações

Baseado em relatos dos professores das disciplinas de Fenômenos Eletromagnéticos e Análise de Circuitos A e B da UTFPR de Curitiba, os equipamentos utilizados nos laboratórios destas disciplinas, bem como os utilizados no SEMAP (Setor de Almoxarifado/Manutenção dos Laboratórios) da universidade, definiram-se as seguintes especificações elétricas para o multímetro desenvolvido, conforme a Tabela 3:

Tabela 3 – Resolução e precisão necessárias para o dispositivo

Especificação	Tensão	Corrente
Faixa de Leitura	0 - 220V	0 - 10 A
Precisão	<2%	<5%

Fonte: Autoria própria (2024).

Foram também definidas as especificações quanto a construção e sistemas do dispositivo, conforme segue:

- Número de bornes para tensão: 2
- Número de bornes para corrente: 2
- Tipo de alimentação: Fonte interna isolada
- Display de dados: *Smartphones* com acesso a navegador, por *Wi-Fi*.

Os dados que o dispositivo será capaz de apresentar ao usuário são:

- Formas de onda de tensão e corrente simultâneas,
- Tensão e corrente RMS,
- Potência ativa, reativa, aparente,
- Fator de potência.

3.2 Premissas Adotadas

As premissas deste trabalho são de suma importância, visto que o objetivo do mesmo é projetar um protótipo com um alto nível de replicabilidade e sendo o mais barato possível. Para isso, serão utilizadas as plataformas gratuitas descritas em seguida e também será fornecido um *link* para o repositório no qual será desenvolvido o software.

3.2.1 Hardware

Primeiramente, nota-se que o circuito e a *PCB* estão sendo desenvolvidos em uma plataforma chamada easyEDA. Esta plataforma, além de fornecer todo um sistema para simulações e desenvolvimento, possui uma *supply chain* integrada, tornando extremamente simplificado o desenvolvimento e a prototipagem do circuito, sendo possível escolher já as *footprints* de todos os componentes e também já verificar a disponibilidade destes no mercado.

O roteamento das trilhas de cobre, definição de sua espessura e também o a modelagem em 3D da *PCB* são disponíveis nesta plataforma, tornando-a extremamente versátil. Tudo isto é fornecido de forma gratuita pelo site.

Assim, além de ser desenvolvido em uma plataforma gratuita, o projeto desenvolvido será disponibilizado para acesso pelo *link* disponibilizado no final deste trabalho.

3.2.2 Software e Firmware

O desenvolvimento completo do *software* utilizado neste projeto se dá pelo editor de código chamado *Visual Studio Code*, ou em abreviação, VSCode. Esta plataforma é gratuita e oferece suporte para todas as linguagens de programação.

Dentro deste editor, existem 3 vetores de programação que serão a base do *software* e *firmware*. Primeiramente, se é utilizado HTML 5 e JS (JavaScript) para a construção do aplicativo web que servirá de monitor para os dados obtidos pelos sensores.

Para o código em Arduino que controlará o ESP32 e também o *Firmware*, será utilizado o PlatformIO, uma *IDE* (*Integrated Development Environment*) gratuita que é uma extensão do VSCode.

Por último, será utilizado o Git, que é um software de controle e versionamento de código, tornando assim possível a disponibilização de todo o software desenvolvido neste projeto e também seu versionamento por meio de um site chamado GitHub. Tal software também pode ser utilizado como uma extensão do VSCode, aumentando e simplificando ainda mais a disponibilidade do software desenvolvido. O *link* para o repositório está disponibilizado no final deste trabalho.

4 MATERIAIS E METODOLOGIA

Neste capítulo, serão discutidos e analisados todos os processos relacionados com o desenvolvimento do protótipo, a justificativa de cada escolha tomada, assim como um *BOM (Bill of Materials)* consolidado, com os preços na data do trabalho, para a confecção de um protótipo.

4.1 Metodologia

Esta seção será dedicada à discussão sobre todas as partes integrantes do protótipo.

4.1.1 Circuito

O circuito foi projetado para seguir um fluxo de informações conforme o diagrama de blocos representado na Figura 23. Baseando-se na pesquisa apresentada no Capítulo 2, este fluxo foi feito para guiar a lógica de design e também para explicar sucintamente o que cada parte do sistema comprehende.

Primeiramente, se tem a proteção de entrada. Esta é dividida em duas partes, sendo uma delas a proteção da entrada da tensão e a outra da corrente. Para se proteger a entrada de tensão, utilizam-se um resistor PTC e MOVs. O PTC é projetado para caso a tensão de entrada do circuito seja muito maior que a desejada ou tenha um curto-circuito, este esquente e vire uma impedância muito grande, sendo assim uma barreira para qualquer tipo de corrente. Porém, a sua atuação para proteção é demasiada lenta, se pondo necessário a implementação dos MOVs, que atuarão mais rapidamente e fecharão um curto-circuito entre a entrada e o terra do circuito enquanto o resistor está sendo ativado.

Para a proteção de corrente, utiliza-se primeiramente fusíveis HRC, que são fusíveis especiais projetados para extinguir qualquer possível arco voltaico resultante da queima do filamento interno. Isso evita a continuidade da corrente após a atuação do fusível.

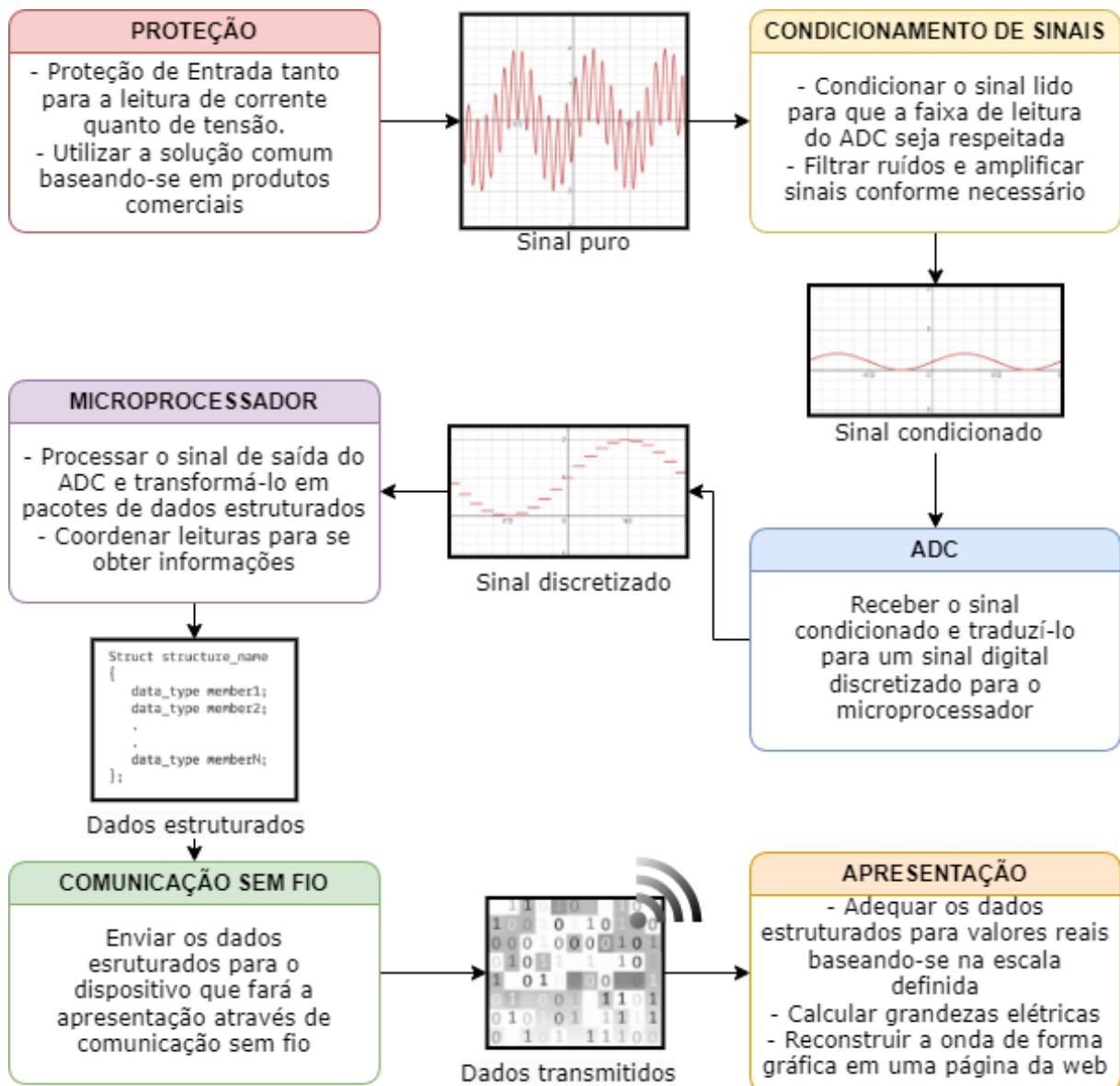
Em seguida, a ponte de diodos, posicionada logo após os resistores shunt, atua como um limitador de tensão (clamp) para evitar que a tensão ultrapasse os valores desejados. Além disso, ela proporciona um caminho para a corrente quando esta não é suficiente para queimar os fusíveis, mas pode danificar o circuito.

A disposição desses componentes e sua montagem estão detalhadas na Figura 24.

Nesta figura, também é possível observar as entradas do circuito. A entrada de tensão está diretamente conectada à próxima etapa, responsável pelo condicionamento dos sinais de tensão. Já a entrada de corrente é composta por resistores que atuam como shunts (R36, R40 e R41), permitindo a leitura da corrente.

O resistor de $10\text{ m}\Omega$ é para a leitura de corrente na proporção de Amperes, a série entre este e o resistor de $1\ \Omega$ compõe a leitura da entrada de mA e o resistor de $100\ \Omega$ para a leitura

Figura 23 – Diagrama de Blocos da Lógica de Funcionamento



Fonte: Autoria própria (2024).

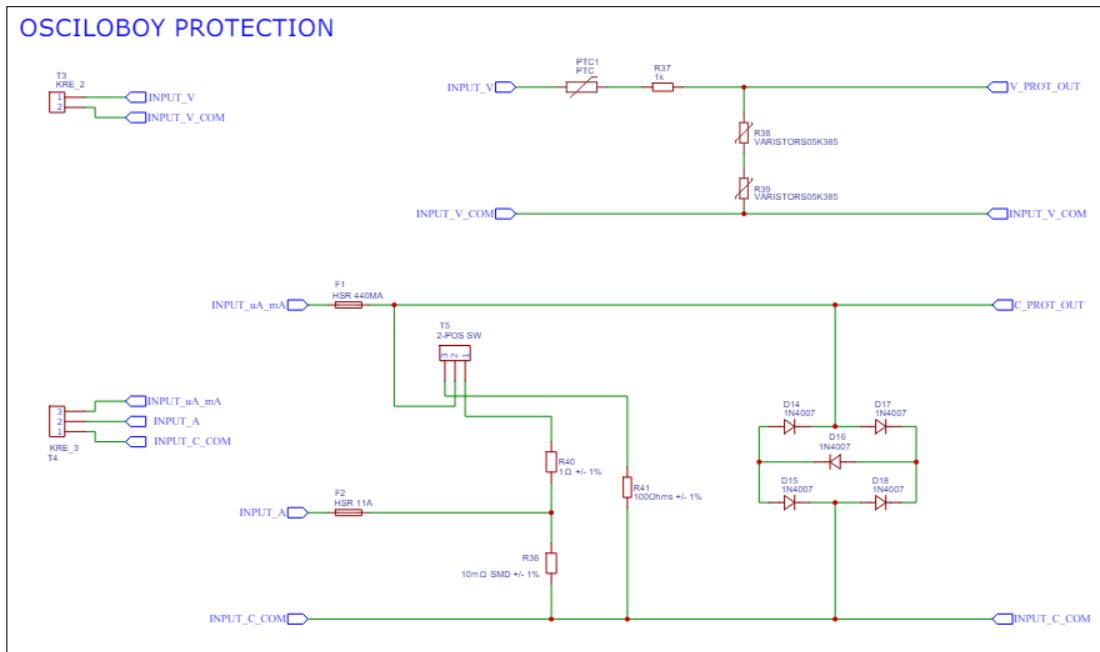
de μA . Para alternar entre as entradas de $\text{mA}/\mu\text{A}$ e A , foi colocada uma chave mecânica de duas posições.

Para se obter um sinal apropriado para o ADC, existem duas possibilidades: leitura "Diferencial" e leitura "*Single-Ended*".

4.1.1.1 ADC - Modo *Single-Ended*

A primeira opção a ser considerada foi a *Single-Ended*. Este tipo de leitura é feita pela comparação de tensão entre um ponto do circuito e o terra. Para fazer tal leitura com diferentes

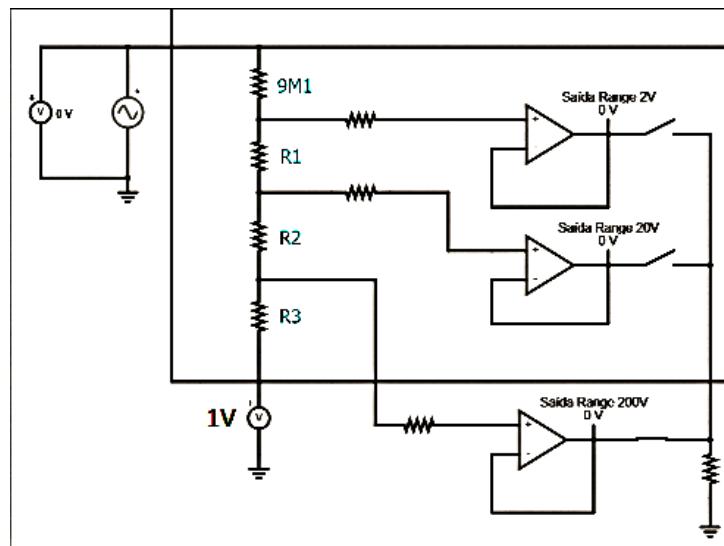
Figura 24 – Entrada de Tensão e Corrente



Fonte: Autoria própria (2024).

ranges, o que é fundamental para se alcançar uma boa precisão, foi primeiro projetado um condicionamento de sinais por divisor resistivo, como representado na Figura 25.

Figura 25 – Condicionamento de sinais por divisor resistivo para leitura Single-Ended



Fonte: Autoria própria (2024).

Esta topologia promete 4 ranges de leitura tanto para corrente quanto para tensão, sendo estes 200 V, 20 V, 2 V e 200 mV e 10 A, 200 mA, 20 mA e 2000 μ A. É também necessário o uso de amp-ops para a seleção do range, para isolar o ADC da entrada e também para manter a tensão de entrada do ADC dentro do range requerido.

Desta maneira, foram calculados os resistores de forma a manter a tensão de entrada dos amp-ops sempre entre 30 e -30 V no maior fundo de escala possível (atenuação de 10x), respeitando os aspectos construtivos destes componentes. Fixando-se o resistor de entrada como $9,1\text{ M}\Omega$, o cálculo para os demais resistores se resume na resolução do sistema representado pela Equação 1, na qual os valores 20, 200 e 300 são os *ranges*:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{300}{9100000+x+y+z} = i \\ \frac{20}{9100000+x+y+z} = j \\ \frac{200}{9100000+x+y+z} = k \\ i(x + y + z) = 30 \\ kz = 1 \\ j(y + z) = 1 \end{array} \right. \quad (1)$$

Obtendo os resultados de $x = 5,505556 \cdot 10^5$, $y = 4,55 \cdot 10^5$ e $z = 50555,6$, sendo escolhidos os valores comerciais mais próximos.

Substituindo x, y e z, respectivamente, em R1, R2 e R3 na Figura 25, chega-se às tensões condicionadas desejadas. Com isto, agora, é necessário serem respeitadas as necessidades do ADC, que é o componente principal do circuito, pois este efetivamente fará as leituras.

Primeiramente, foi escolhido o ADC ADS1115 da *Texas Instruments*, pois este possui 16-bits de resolução, o que torna a leitura extremamente precisa. Possui uma referência interna de tensão, sendo desnecessária a construção de uma referência no circuito, menos complexa, e compatível com o protocolo de comunicação I^2C que será utilizado para interfacear este com o microcontrolador. Porém, devido a sua taxa de leitura extremamente baixa, de 860 *samples per second* (SPS), prejudicando a leitura até de frequências na faixa de 60 Hz, foi decidido se utilizar o ADC ADS1015.

Este, também da TI, apesar de ter uma resolução mais baixa de 12-bits, oferece uma taxa de 3300 SPS, possibilitando assim uma reconstrução mais fiel da onda a ser lida e uma referência interna de tensão com compatibilidade com o protocolo I^2C . Este ADC também possui uma proteção interna contra surtos por TVS, tornando-o extremamente robusto. Os requerimentos para o funcionamento adequado deste ADC são uma tensão de entrada máxima de 3,3 V e esta não pode ser negativa.

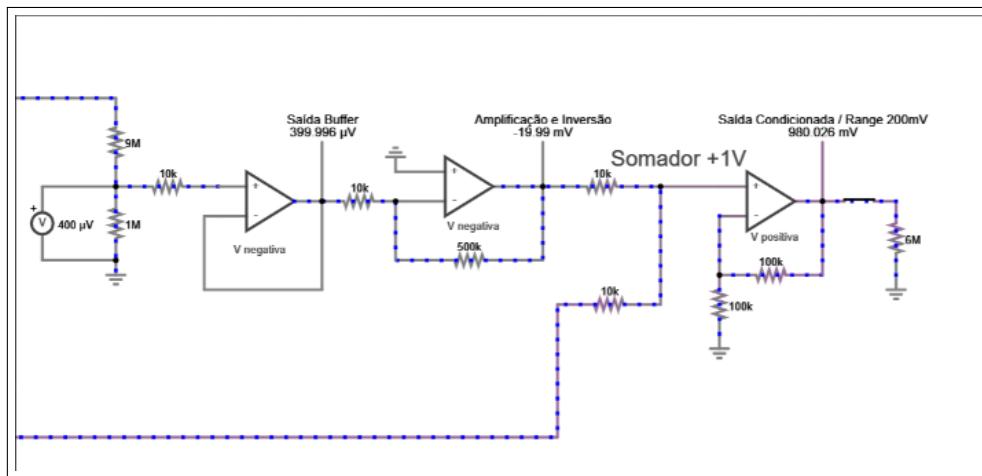
Seguindo esses parâmetros, percebe-se que o condicionamento de sinal é inadequado, exigindo mais componentes e circuitos auxiliares para funcionar corretamente. Para garantir a leitura de tensões negativas, limita-se a tensão de entrada a um intervalo entre -1 V e 1 V, adicionando um offset de 1 V. Dessa forma, sinais entre 0 V e 1 V são interpretados como negativos, enquanto sinais entre 1 V e 2 V são interpretados como positivos.

Na leitura *Single-Ended*, após o divisor resistivo e o primeiro buffer, é necessário inverter o sinal de saída do amp-op. Para isso, utiliza-se um amplificador operacional (amp-op) em cascata, que inverte o sinal de entrada. Além disso, para que esses componentes suportem tensões negativas é fundamental que a alimentação do circuito seja simétrica, o que requer a inclusão de um circuito auxiliar chamado *Negative Charge Pump*, capaz de fornecer essa tensão negativa.

Outro ponto crucial é que o offset de tensão precisa ser extremamente preciso para minimizar erros na leitura do sinal. Existem CLs que oferecem essa precisão, mas eles são bastante caros.

Por fim, para sinais com menor amplitude, é necessário adicionar mais um amp-op em cascata para amplificar o sinal, uma vez que ele estaria fora do alcance do bit menos significativo do ADC. O circuito de condicionamento de sinais resultante pode ser visto na Figura 26.

Figura 26 – Condicionamento de sinais por divisor resistivo para leitura *Single-Ended*, menor range



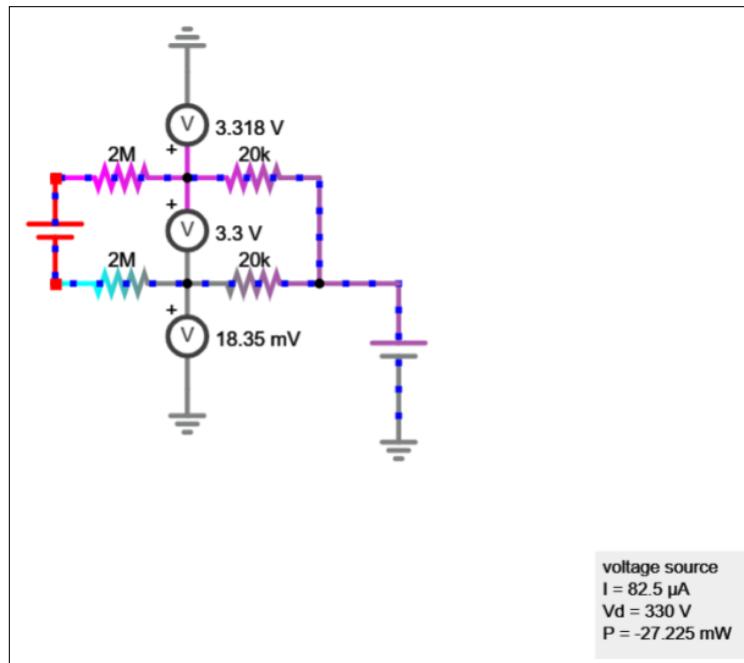
Fonte: Autoria própria (2024).

Cada amp-op possui um *drift* de saída, o que introduz ainda mais erro na leitura do ADC. Além disso, como é necessária uma amplificação final do sinal, quaisquer ruídos introduzidos também serão amplificados. Com esses problemas combinados, decidiu-se realizar a leitura no modo diferencial, que é a outra opção de leitura nativa disponível no ADC escolhido.

4.1.1.2 ADC - Modo Diferencial

Este tipo de leitura, ao invés de comparar a tensão entre um ponto do circuito e o terra, compara a tensão entre dois pontos do circuito e mede efetivamente a diferença entre elas, como mostrado na Figura 27. Isso significa que nenhuma das entradas está ligada a uma referência, eliminando assim problemas referentes ao isolamento da leitura com o terra e também eliminando ruídos de entrada, pois como estes são introduzidos dos dois lados, eles se cancelam.

Figura 27 – Condicionamento de sinais por divisor resistivo para leitura diferencial



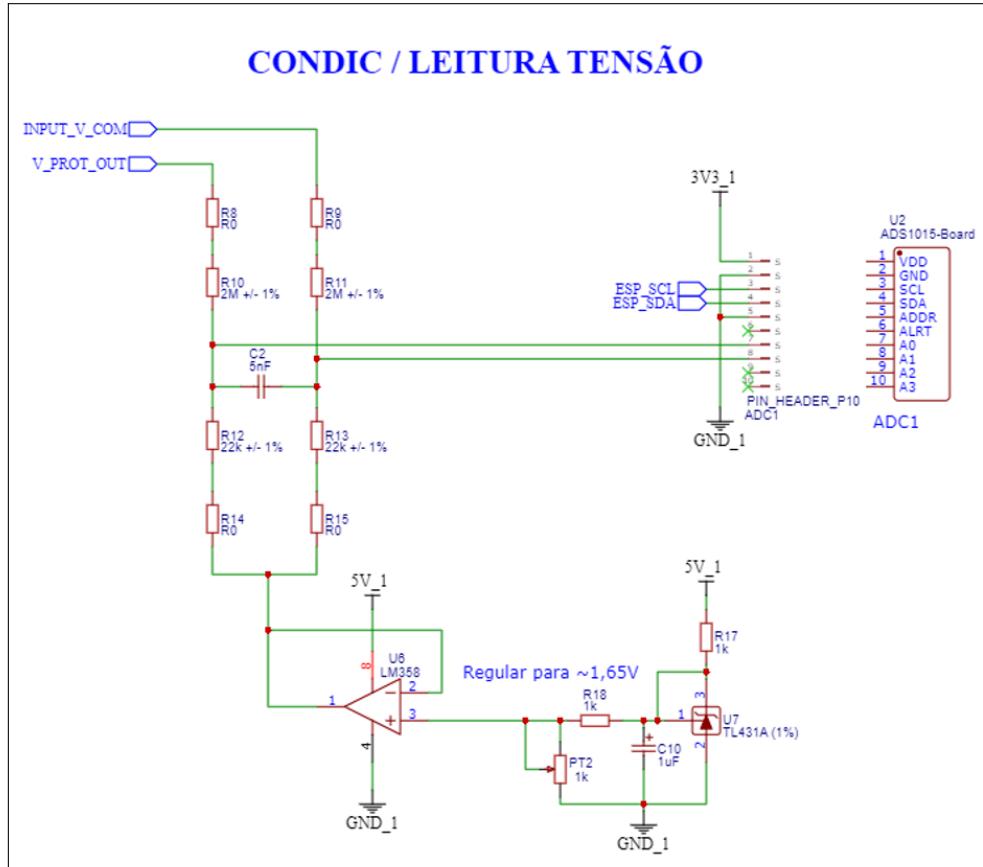
Fonte: Autoria própria (2024).

Para o dimensionamento dos resistores desta topologia, é necessário atenuar a tensão em aproximadamente 100 vezes, uma vez que um sinal de 330 V (o pico máximo suportado pelo sistema) deve ser condicionado para, no máximo, 3,3 V. Considerando o divisor resistivo, essa atenuação requer uma relação de cerca de 100 vezes entre os resistores. Para garantir uma corrente mínima de entrada, foi escolhido um resistor de $2 \text{ M}\Omega$, o que define o segundo valor em $20 \text{ k}\Omega$.

Para o offset de tensão, como os erros introduzidos são minimizados pela própria topologia, utiliza-se uma referência de tensão menos precisa, diminuindo o custo do circuito regulador como um todo. A referência de tensão utilizada para este projeto é fornecida pelo CI TL431A, tendo este ainda assim uma precisão de 1%, mas sendo muito mais barato que a opção anterior. Além disso, este possibilita a utilização do range inteiro de leitura do ADC, sendo necessário apenas um offset de $3,3/2V$, utilizado para garantir que as entradas do ADC não recebam tensões negativas, e que pode ser regulado pela ação do *trimpot* junto ao circuito auxiliar. Como não são utilizados amp-ops, também não é necessária a utilização do circuito auxiliar *Negative Charge Pump*.

Então, com todos estes benefícios em mente, foi escolhida esta topologia e tipo de leitura para o circuito final, como explícito na Figura 28. Para a leitura de corrente, a mesma lógica se aplica, pois o resistor shunt é visto como uma fonte de tensão pelo circuito de leitura. Como esta tensão é extremamente baixa, não há a necessidade de um resistor de entrada para a atenuação da mesma, como explícito na Figura 29.

Figura 28 – Circuito de condicionamento de sinais para tensão



Fonte: Autoria própria (2024).

Também sobre o condicionamento de sinais, é de suma importância se ter um filtro de entrada. Mesmo que a topologia em questão minimize ruídos, quanto mais limpo o sinal de entrada é, melhor serão as leituras e consequentemente o tratamento dos dados. Para este projeto, decidiu-se utilizar um filtro passa-baixas "RC", que consiste de um resistor e um capacitor em *shunt* (CARTER; MANCINI, 2003). O cálculo deste filtro é regido pela fórmula Equação 2:

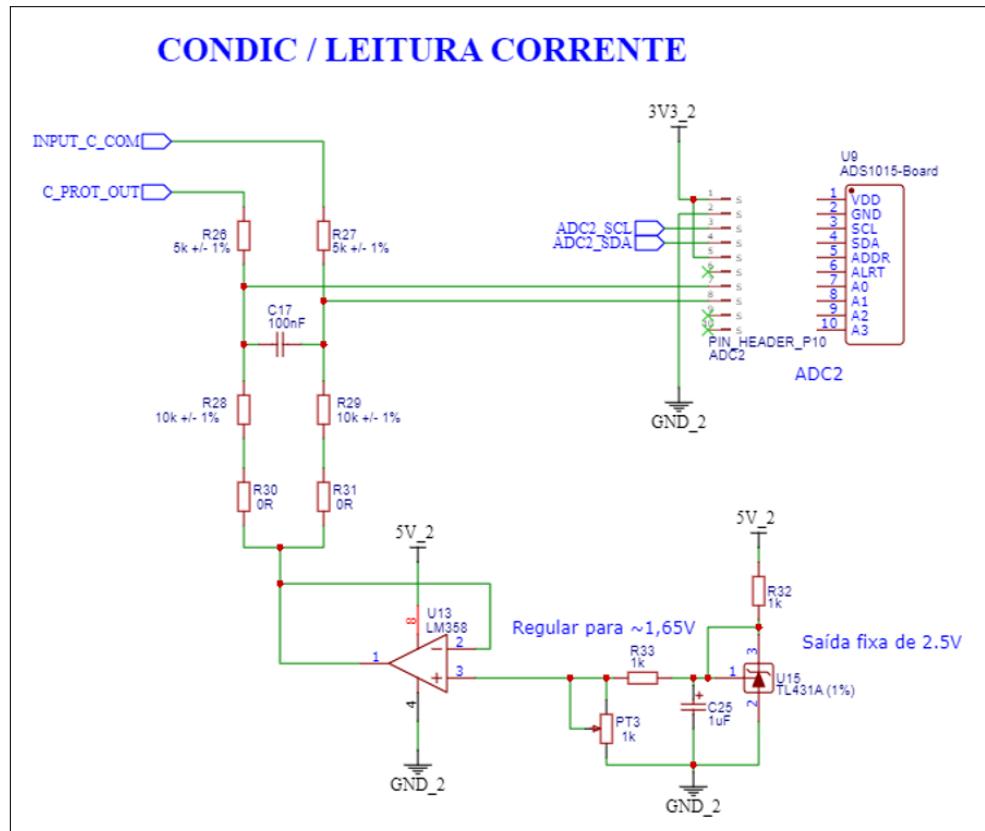
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2)$$

Este filtro age de forma a atenuar em $3dB$ (70,7%) sinais de frequências maiores que a de corte.

Para o cálculo deste filtro, precisa-se encontrar o R equivalente nos nós do capacitor. Para tanto, utiliza-se o teorema de Thevenin (considerando todas as fontes de corrente como circuito aberto e fontes de tensão como curto-circuito), como é possível verificar substituindo o capacitor por um ohmímetro na Figura 30.

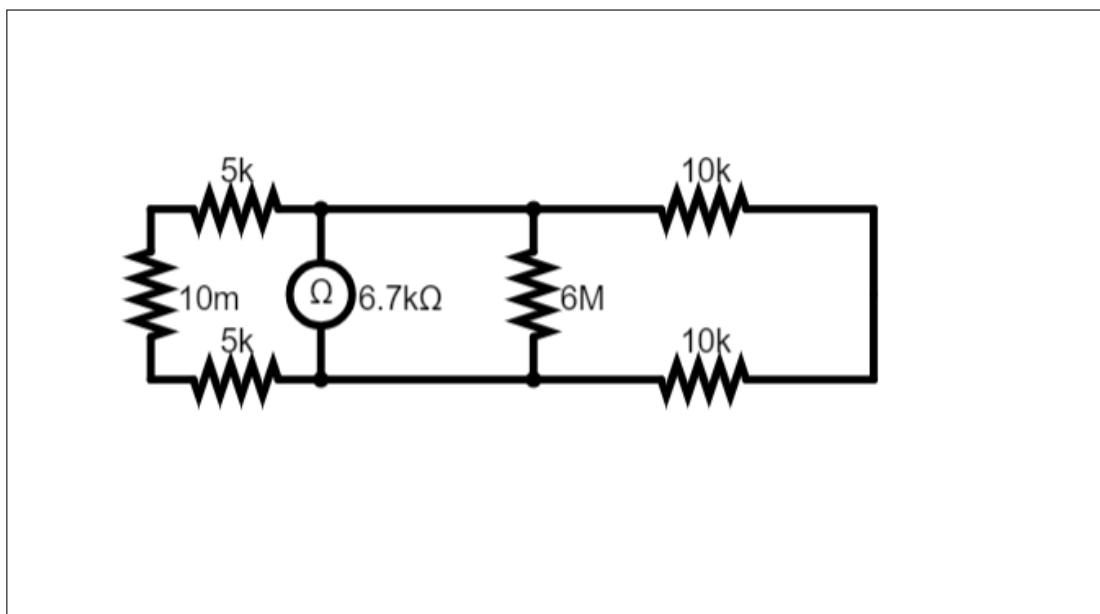
Utilizando a fórmula, para o caso da entrada de corrente e considerando dois resistores de $5 k\Omega$ (pela facilidade de se encontrar o componente), chega-se ao valor de um capacitor de aproximadamente $100 nF$ para uma frequência de corte de aproximadamente $237 Hz$. As simu-

Figura 29 – Circuito de condicionamento de sinais para corrente



Fonte: Autoria própria (2024).

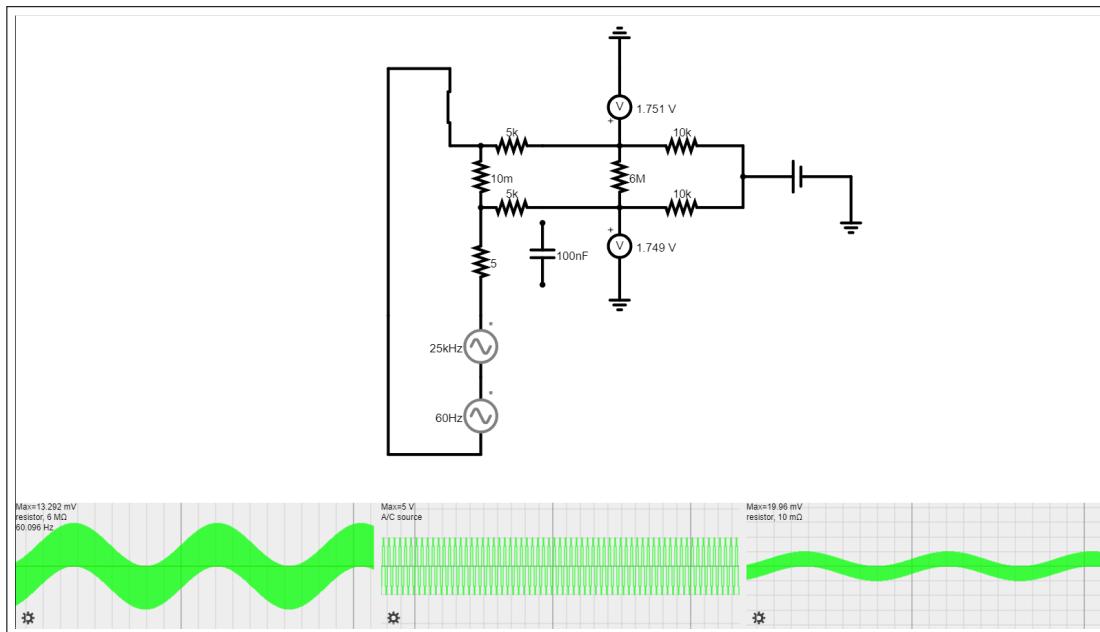
Figura 30 – Simulação da resistência de Thevenin



Fonte: Autoria própria (2024).

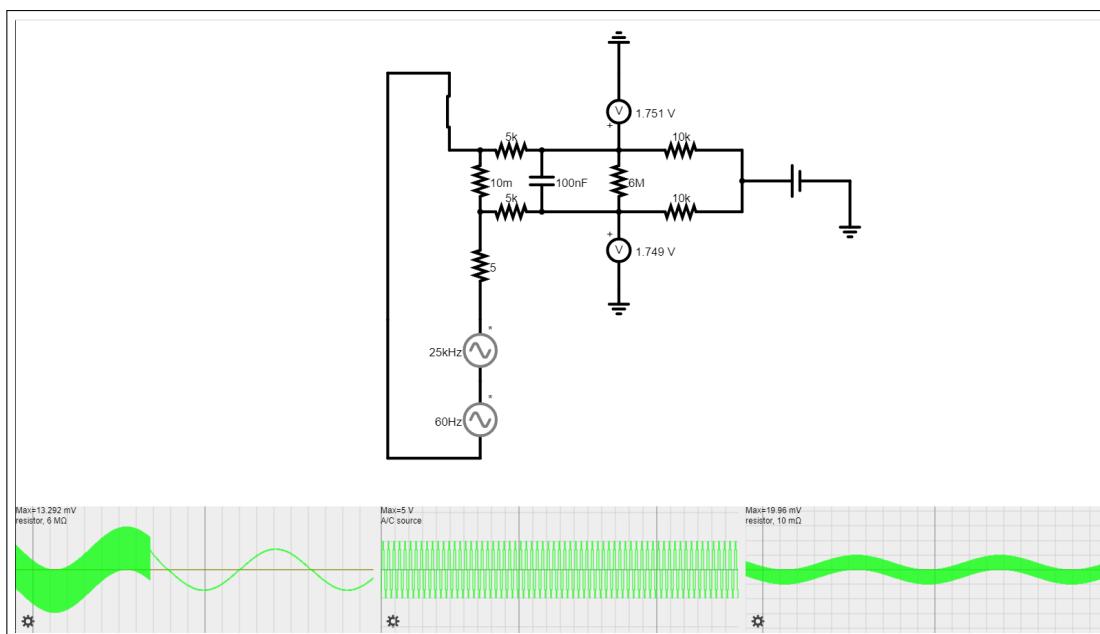
lações representadas nas Figuras 31 e 32. O sinal encontrado no resistor de $6 M\Omega$ representa a entrada do ADC.

Figura 31 – Simulação sem filtro passa-baixa para a corrente



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 32 – Simulação com filtro passa-baixa para a corrente



Fonte: Autoria própria (2024).

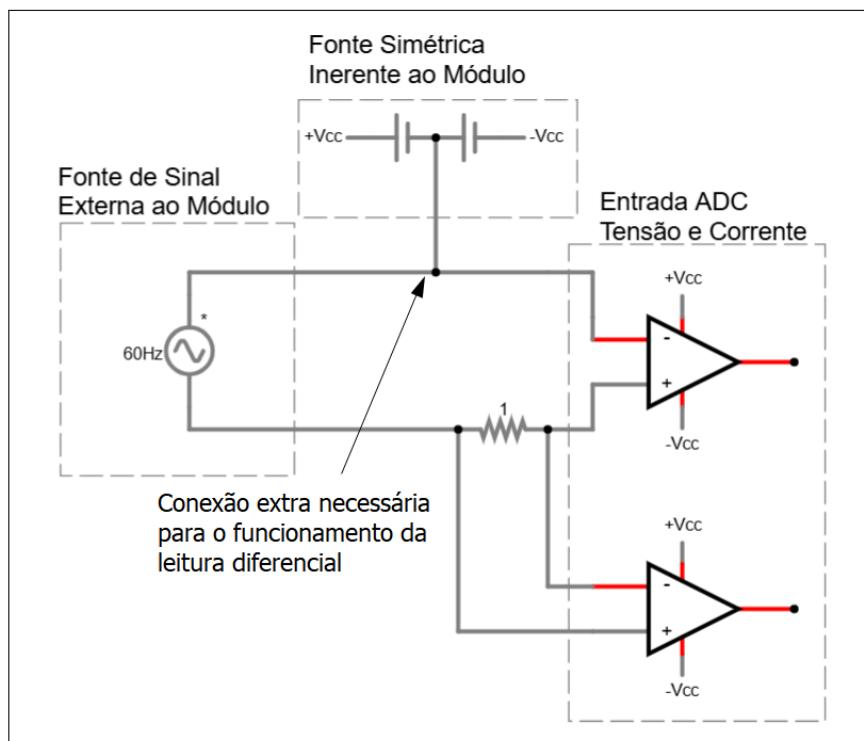
Para a entrada de tensão do circuito segue-se a mesma lógica e passos da entrada de corrente, chegando a um valor de aproximadamente 5 nF.

Após a leitura dos sinais e a conversão feita pelo ADC, o sinal digital de saída é processado por um microcontrolador para então ser entregue a uma webpage e assim tratado para visualização pelo usuário.

4.1.1.3 Isolamento

Para que a leitura diferencial ocorra de maneira adequada, é necessário que haja um caminho de retorno para os sinais medidos - uma vez que a medição ocorre aferindo a tensão de cada uma das entradas do ADC em relação a referência e diferenciando-as (CYBURT, 2020). Essa referência pode ser obtida de maneira direta, utilizando uma conexão separada com a função específica de se tornar o caminho para os sinais de tensão e corrente, representada na Figura 33. Ou pode ser obtida de maneira indireta, conectando internamente uma das ponteiras do dispositivo também ao *GND* (ou ponto comum) do ADC, fazendo com que não seja necessário o uso de um fio dedicado para esse fim, conforme a Figura 34.

Figura 33 – Circuito diferencial simplificado com conexão específica para referência

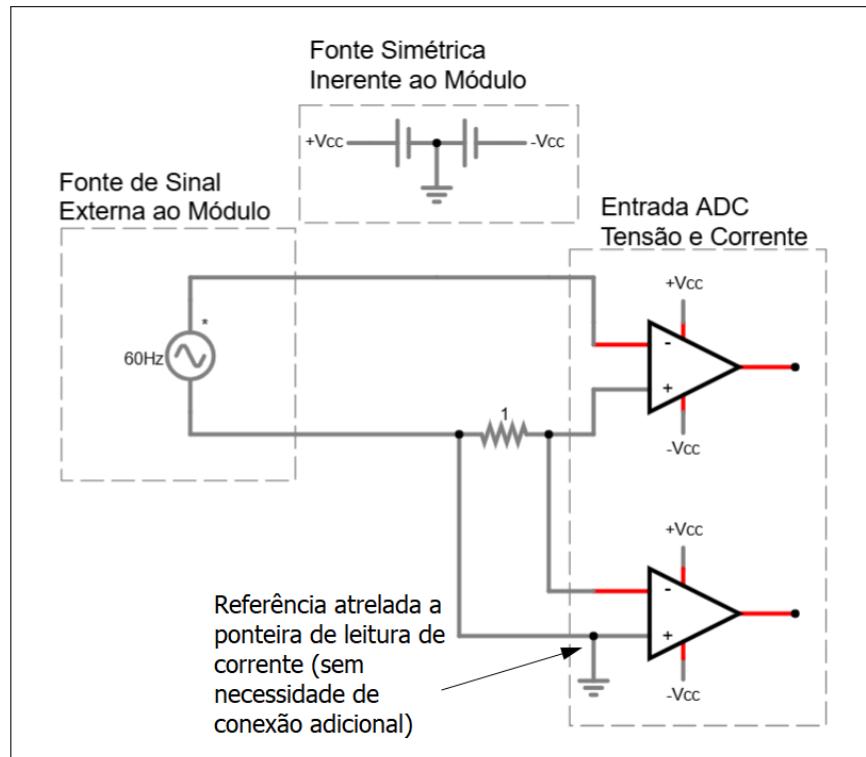


Fonte: Autoria própria (2024).

Ambas as propostas são funcionais e aplicáveis, porém, devido a especificidades de cada uma, foram descartadas para esse projeto. A leitura feita com a conexão auxiliar implica na necessidade de um uso não convencional e pouco realista do cotidiano do laboratório onde as matérias alvo desse trabalho serão ministradas. Já a topologia que não possui conexões adicionais tornaria a leitura de somente uma grandeza por vez (tensão ou corrente) impossibilitada, dependendo de qual ponto foi escolhido para estar atrelado a referência interna.

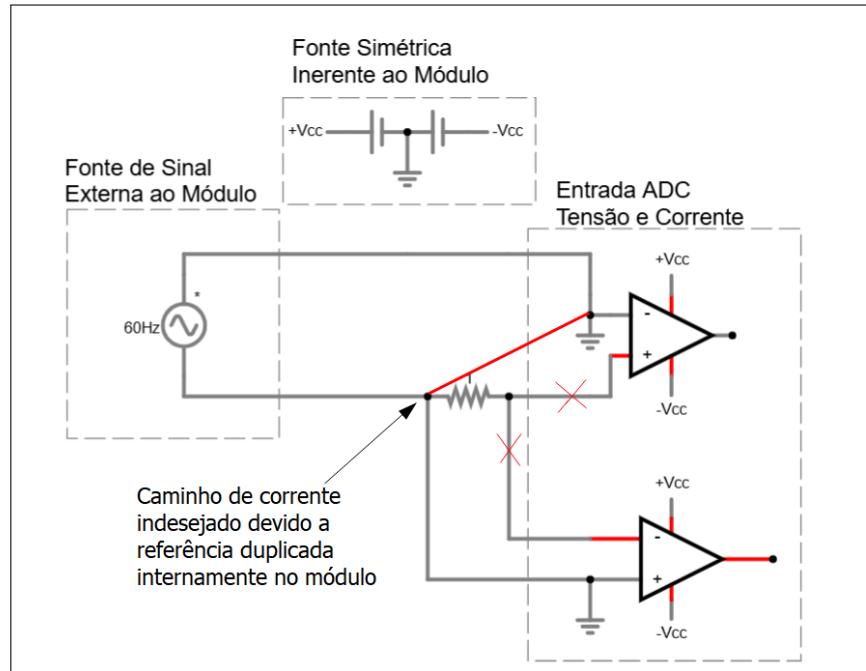
Uma vez que não é adequado referenciar o circuito em mais de um ponto, devido a possibilidade de curto-circuitos indesejados conforme a conexão das ponteiras feita pelo usuário, como exemplo a Figura 35. Propôs-se o isolamento de cada canal, utilizando fontes internas isoladas.

Figura 34 – Circuito diferencial simplificado sem conexões adicionais



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 35 – Circuito diferencial simplificado com referência em mais de uma ponteira

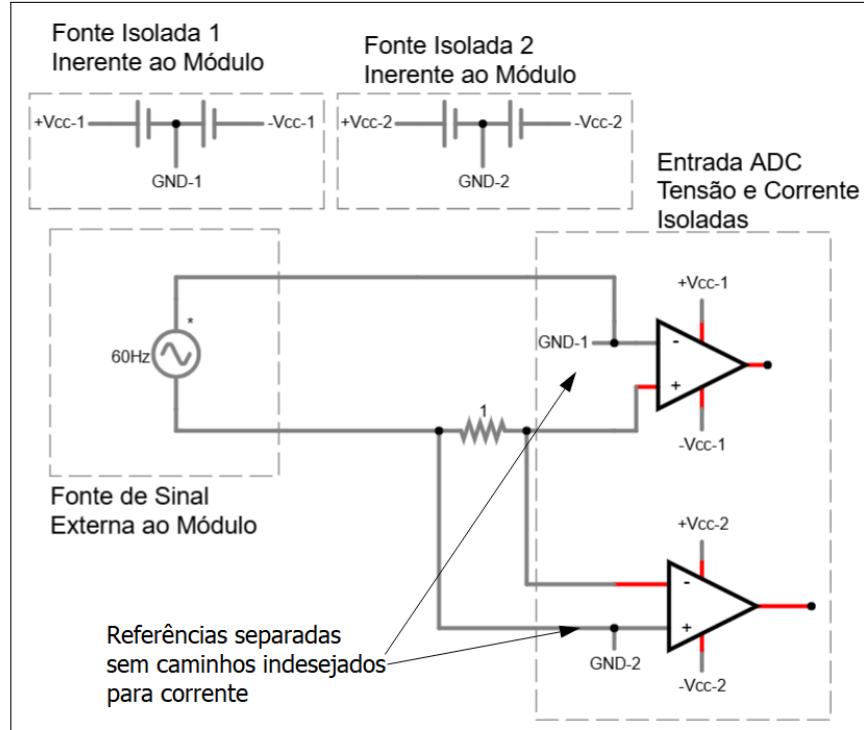


Fonte: Autoria própria (2024).

Dessa maneira, é possível ter a referência de tensão diretamente na ponteira de leitura para cada um dos canais, sem que haja a possibilidade de curto-círcito e, como consequência

indireta da topologia, ainda diminui interferências que as leituras poderiam causar entre si. Essa topologia pode ser melhor visualizada através da Figura 36. Conforme comentado na subseção 2.1.2.2, uma outra alternativa seria a utilização de amplificadores operacionais isolados, porém esses apresentam preço extremamente elevado para o escopo do trabalho, sendo essa alternativa descartada.

Figura 36 – Circuito diferencial simplificado isolado



Fonte: Autoria própria (2024).

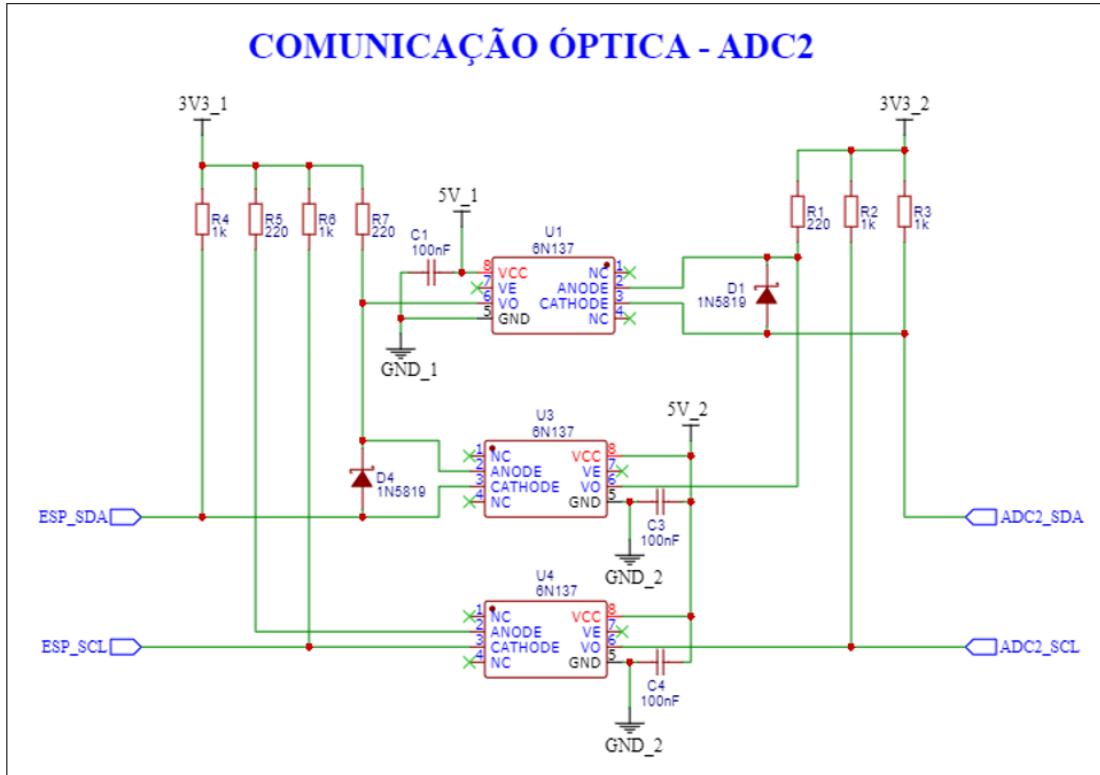
Para se ter uma comunicação confiável entre os dois ADCs conectados a fontes diferentes e o ESP32, é necessário o isolamento dos sinais utilizados para a comunicação. Para isso, foi utilizado um circuito isolado por *optocouplers*, como demonstrado na Figura 37.

O circuito transforma pulsos I^2C em sinais de luz e transfere estas informações para o outro circuito isolado, desacoplando estes. Para o correto funcionamento do circuito, devido a limitações técnicas dos *optocouplers* escolhidos, é necessária a inserção de uma linha de 5 V para a alimentação do CI, assim como o uso de uma linha de 3,3 V para a ativação dos LEDs internos deste chip e o potencial de *pull-up* para as linhas de comunicação I^2C .

4.1.1.4 Modularidade no Hardware

Um dos principais objetivos da proposta desenvolvida foi possibilitar a leitura simultânea de duas ou três fases diferentes. Para tanto, o dispositivo precisaria operar com quatro ou seis canais isolados entre si, devido às implicações supracitadas. Essa configuração elevaria o custo, o espaço físico e a complexidade de apenas um dispositivo, sendo que, em diversas etapas

Figura 37 – Circuito de comunicação isolado



Fonte: Autoria própria (2024).

das disciplinas de circuitos, apenas a leitura de uma das fases é utilizada – considerando-se o circuito trifásico equilibrado.

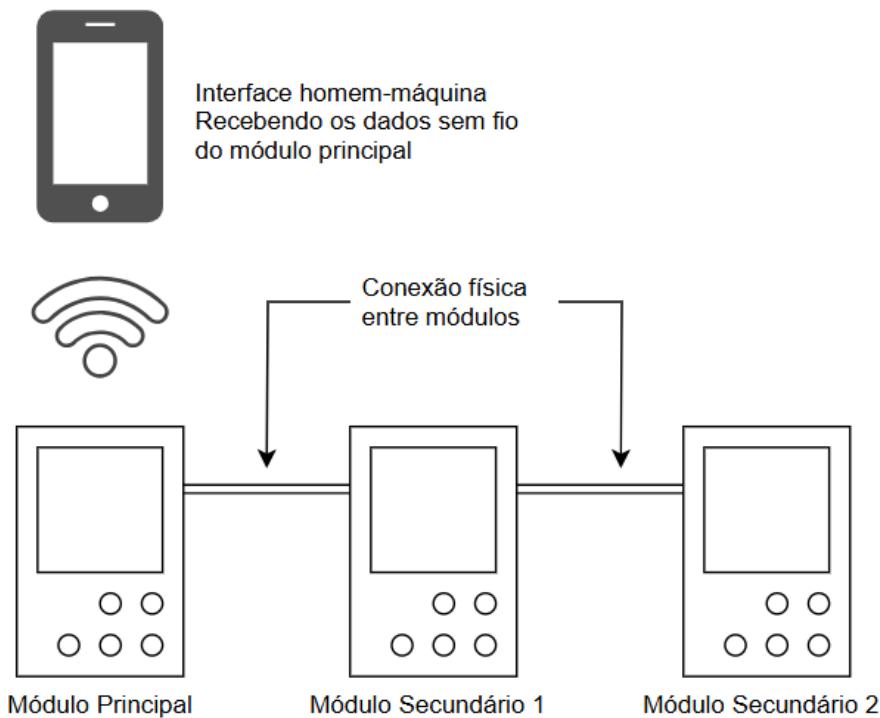
Optou-se, então, por tornar o dispositivo modular. Dessa forma, cada módulo é composto por um medidor de tensão e corrente isoladas, e, caso haja a necessidade de expansão, basta adicionar módulos extras e interconectá-los, de modo que comuniquem entre si e enviem os dados lidos.

Assim, um módulo principal coordena as leituras dos módulos secundários, recebe os dados por meio de algum protocolo de comunicação e envia os valores obtidos para a interface homem-máquina, conforme ilustrado no diagrama da Figura 38.

Inicialmente, considerou-se o uso do protocolo I^2C para a comunicação entre os módulos. No entanto, essa abordagem foi descartada devido à complexidade de criação de um protocolo ou dicionário que estabelecesse um modo comum de interação. Esse protocolo seria implementado fisicamente da mesma forma proposta para a comunicação isolada entre o ESP32 e o ADC (que não compartilham a mesma referência), utilizando optoacopladores, conforme ilustrado na Figura 37.

Diante dessas considerações, concluiu-se que a utilização do protocolo *ESP-NOW* – desenvolvido pela Espressif para facilitar a comunicação entre chips que possuem *Wi-Fi* – em conjunto com o protocolo de comunicação via *websockets*, já utilizado para a comunicação entre o dispositivo e a interface homem-máquina, seria mais adequada para este caso. Dessa forma,

Figura 38 – Diagrama de conexão modular entre dispositivos



Fonte: Autoria própria (2024).

os dados dos dispositivos secundários são transferidos de forma *wireless* para o dispositivo principal.

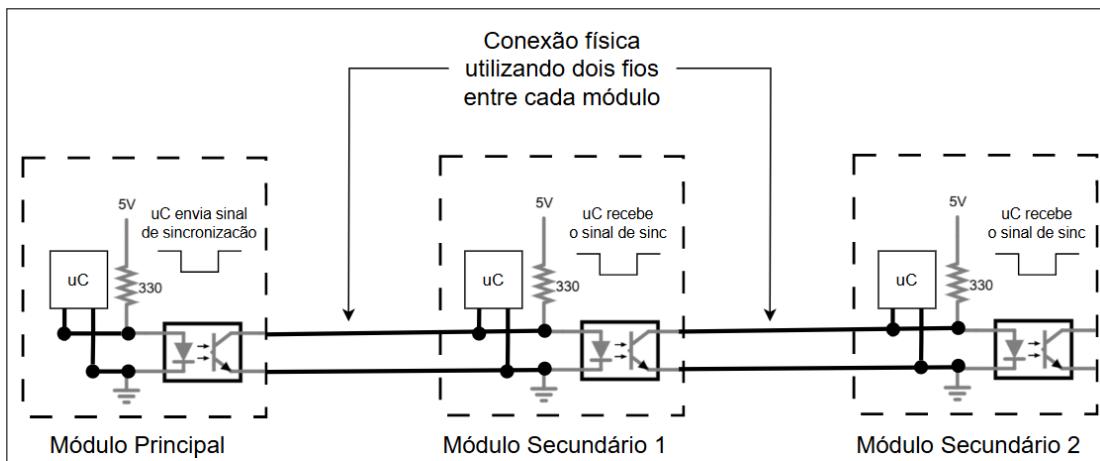
Como as leituras dos dispositivos são sensíveis a atrasos, devido à natureza das medições no tempo, é necessária uma conexão física entre os módulos para sincronizar as leituras. Assim, o dispositivo principal envia aos demais módulos um pulso indicando o início de uma nova série de dados, permitindo que todos realizem a amostragem dentro da mesma janela temporal. Dessa maneira, são necessários apenas dois fios conectando cada dispositivo, sendo estes a saída do sinal isolado, transmitido por meio de um optoacoplador, conforme ilustrado na Figura 39.

Este circuito adicional, no entanto, não foi implementado no presente trabalho devido a dificuldades encontradas durante o desenvolvimento, conforme descrito na subseção 4.1.3. Sugere-se, portanto, que futuras melhorias neste estudo considerem a aplicação desse circuito, dado seu potencial para expandir o sistema.

4.1.1.5 Microcontrolador

Algumas necessidades básicas devem ser atendidas pelo chip escolhido, como suporte para comunicação *wireless*, seja *Wi-Fi* ou *Bluetooth*, *clock speed* alta o suficiente para não

Figura 39 – Detalhe da conexão modular entre dispositivos utilizando dois fios para sincronização de leituras



Fonte: Autoria própria (2024).

interferir na aquisição de dados e também ter uma boa documentação para ser possível o desenvolvimento do código.

Portanto, o microcontrolador utilizado para este projeto é o ESP32, fabricado pela Espressif. A escolha deste foi feita por vários motivos:

- Performance: O ESP32 opera em *clock speeds* de até 240 MHz, oferecendo um robusto poder de processamento para o código e também para não interferir ou atrasar a aquisição dos sinais;
- Suporte: Este microcontrolador tem suporte tanto para *Wi-Fi* quanto para *Bluetooth*, trabalha com o protocolo *I²C*, que será utilizado para fazer a comunicação com o ADC e utiliza-se do Arduino como sua principal plataforma de desenvolvimento;
- Ambiente: Este módulo é extensamente utilizado em vários setores da tecnologia e tem uma vasta comunidade de usuários, o que garante um extenso leque de *resources* como bibliotecas, tutoriais, videos, forums, entre outros, para ajudar na confecção do *software* e *firmware*. Também apresenta suporte oferecido pela própria Espressif sobre as suas funcionalidades muito bem documentados;
- Modularidade: Esta parte do trabalho também é facilitada devido ao componente já possuir nativamente protocolos de comunicação da própria fabricante;
- Preço: Para todas as funcionalidades providas pelo ESP32, este apresenta um grande custo benefício, além de estar facilmente disponível no mercado.

4.1.1.6 Alimentação e regulação de tensão

Para a alimentação dos circuitos integrantes do protótipo, existem duas opções: baterias ou fontes. Como este será utilizado em bancada, foi escolhida a alimentação por fontes, pois estas não precisam ser trocadas frequentemente e é possível ligá-las à rede, além de algumas outras vantagens.

Neste projeto são utilizadas duas fontes isoladas galvanicamente. Uma para alimentar o circuito de leitura de tensão e outra para alimentar o circuito de leitura de corrente, reduzindo ainda mais possíveis ruídos e interferências entre circuitos. Também aumentando a confiabilidade do protótipo, pois como o objetivo é realizar leituras simultâneas de corrente e tensão, o isolamento entre eles é necessário para prevenir curto-circuitos.

Porém, a saída das fontes escolhidas é de 12 V, não atendendo as necessidades de alimentação dos Cls envolvidos e também do microcontrolador. Para isso, circuitos de regulação de tensão foram implementados, gerando duas saídas, como explícito na Figura 40. Estes circuitos são iguais tanto para a leitura de tensão e de corrente, visto que estes tem as mesmas necessidades.

A alimentação do ESP32 e também do circuito de comunicação isolada foi definida como 5 V por especificação de projeto, para manter um padrão e também suprir as necessidades de cada.

4.1.1.7 Avisos sonoros

Foi adicionado ao circuito um *buzzer* como forma de aviso sonoro para diversos fins. Foi utilizado um transistor ligado a entrada do microcontrolador para sua ativação, conforme pode-se ver na Figura 41. Sua implementação foi feita através do *firmware* como um alerta em relação a corrente de entrada lida pelo ADC. Caso o usuário aplique corrente maior do que a esperada na entrada, o *buzzer* dispara um aviso sonoro para informar o usuário da entrada incorreta.

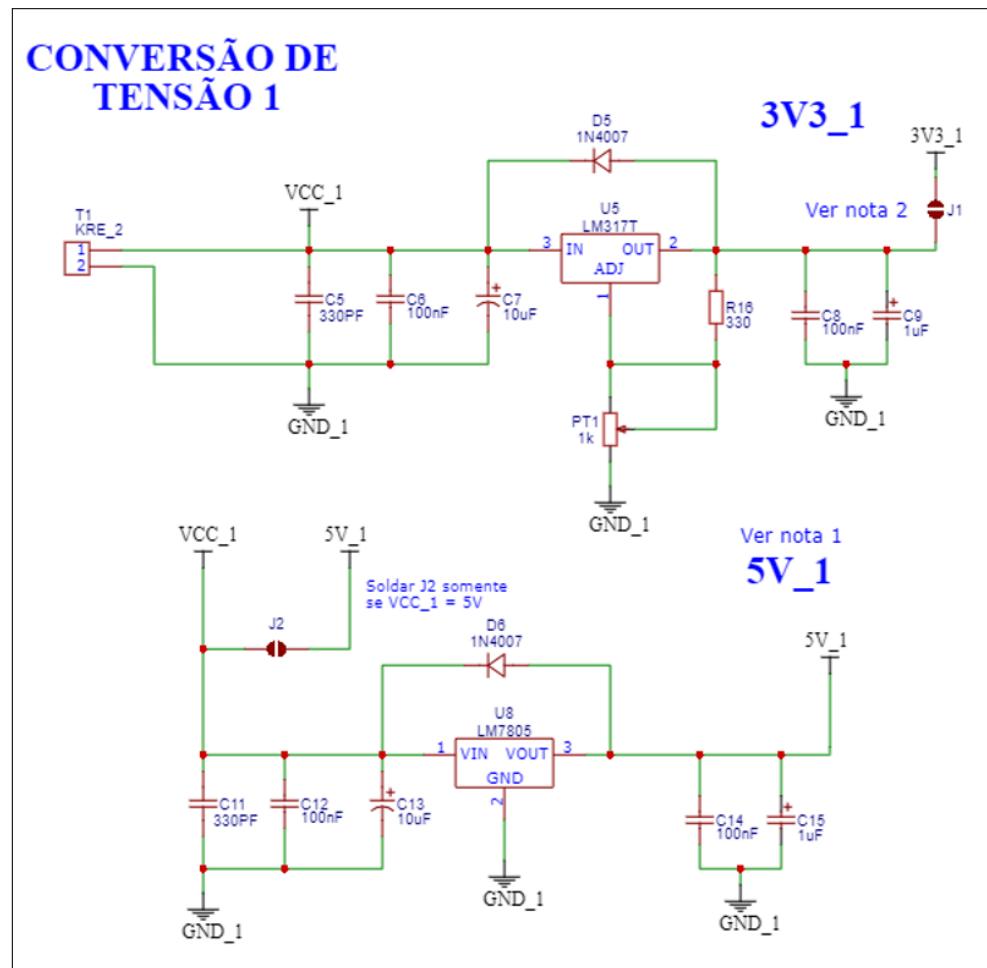
4.1.1.8 Disponibilidade do Circuito

O circuito pode ser encontrado na íntegra no Apêndice A ao final do trabalho, assim como de maneira virtual no mesmo anexo. Dada a característica colaborativa da plataforma em que foi desenvolvido, permite que qualquer usuário clone esse circuito e o modifique gratuitamente.

4.1.1.9 Resumo de *Hardware*

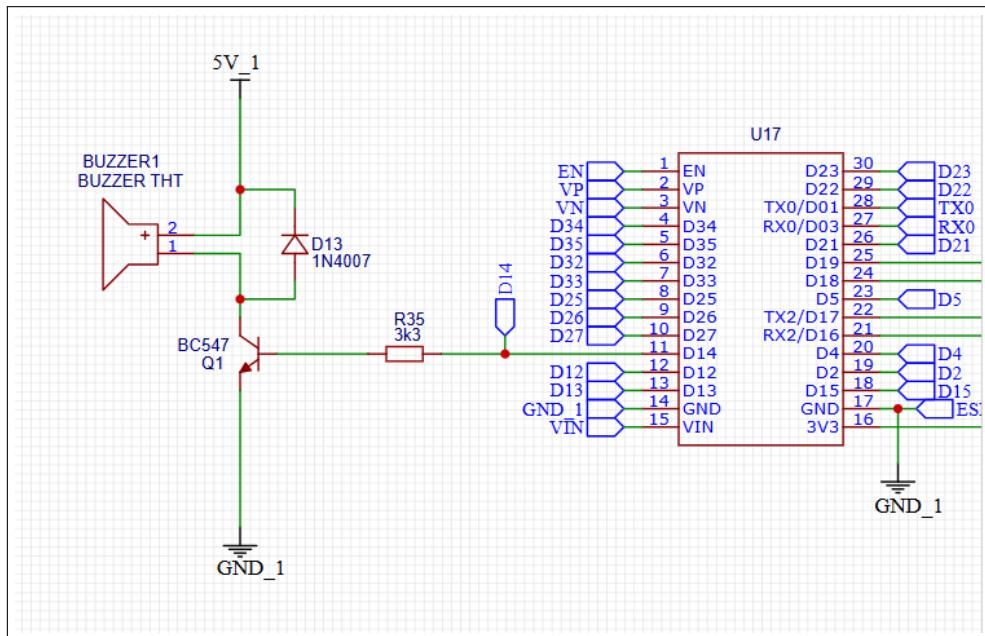
Por fim, um resumo de todas as partes constituintes e as decisões tomadas.

Figura 40 – Circuito de regulação de tensão



- **Proteção de Entrada:** Foi decidida a utilização de uma proteção de entrada simplificada, baseada em modelos comerciais, pois não foi possível encontrar bibliografias relevantes e também não se possui equipamento especializado para fazer testes de proteção com segurança, visto que estes podem ser perigosos. Composta por fusíveis e um clamp para a corrente, varistores e um PTC para a tensão (junto com uma proteção TVS interna ao ADC escolhido), esta proteção básica coloca o protótipo dentro da classificação CAT III;
- **Condicionamento e Aquisição de Sinais:** Para a tensão, limita-se o valor máximo do sinal a ser obtido e este é encaminhado diretamente à entrada do ADC para leitura. Para a corrente, utiliza-se um resistor shunt para a obtenção do sinal. Os dois sinais serão lidos diferencialmente pelo ADC.
- **ADC:** O ADC escolhido foi o ADS1015, do tipo delta-sigma. Este foi escolhido por, além de suas capacidades, suporte para comunicação em I^2C e uma boa documentação sobre seu *firmware*.

Figura 41 – Circuito utilizando transistor para o *buzzer*



Fonte: Autoria própria (2024).

- **Microcontrolador:** O MCU escolhido foi o ESP32, por ser um microcontrolador extremamente potente e possuir suporte para comunicações *wireless* e por I^2C . Além disso, sua documentação técnica e o suporte tanto da Espressif quanto da comunidade que utiliza tal microcontrolador são de grande valor.
 - **Alimentação:** O tipo de alimentação escolhido e implementado foi por fontes isoladas com reguladores internos para alimentar o circuito. Este método garante a maior segurança quanto à isolação das partes e também torna o protótipo independente de pilhas.

4.1.2 Software e Firmware

A programação do dispositivo é separada em duas etapas: *Firmware* e *Software*. O *Firmware* é responsável por garantir a funcionalidade da comunicação do microcontrolador com os módulos ADC, assim como manter a comunicação *wireless* e sincronizar a amostragem do sinal. Já o *Software*, é responsável por receber as entradas do usuário e mostrar, efetivamente, através de gráficos e valores numéricos, as leituras de tensão, corrente, frequência, potências, etc. Outra parte importante da programação trata-se da modularidade. Essa está presente tanto no *Firmware* quanto no *Software*. Trata-se da possibilidade de utilizar mais de um dispositivo em conjunto com um principal, permitindo a leitura de mais fases de maneira isolada.

4.1.2.1 Firmware

O *Firmware* é a parte crítica que roda diretamente no microcontrolador ESP32 e é responsável pela interface com os sensores, controle de comunicação *wireless* e envio dos dados coletados para o *Software* via WebSockets. Ele também gerencia a sincronização das leituras do ADC, garantindo que os dados de tensão e corrente sejam capturados e processados de forma precisa.

O desenvolvimento do *Firmware* foi baseado em bibliotecas otimizadas para o ESP32, como a *ESPAsyncWebServer* e a *WebSocketsServer*, que permitem uma comunicação eficiente com o dispositivo remoto (celular ou computador). Além disso, foi utilizada a biblioteca *ADS1015_WE* para interface com o ADC externo ADS1015, permitindo leituras de alta precisão de sinais analógicos.

A sincronização entre os sinais de tensão e corrente é feita por meio de interrupções, que detectam o momento em que os dados estão prontos para leitura. Isso garante que as amostragens estejam alinhadas e que os gráficos e cálculos de potência sejam precisos. Para garantir a modularidade do sistema, o *Firmware* também possui a capacidade de alterar a faixa de leitura da tensão e da corrente dinamicamente, de acordo com o comando enviado pelo usuário via WebSockets.

Uma parte importante do *Firmware* é a implementação da máquina de estados, mostrada na Figura 42, que gerencia a comunicação com o dispositivo auxiliar (interface homem-máquina). A implementação foi feita para ser expansível, permitindo a futura integração de múltiplos dispositivos sem a necessidade de grandes modificações no código.

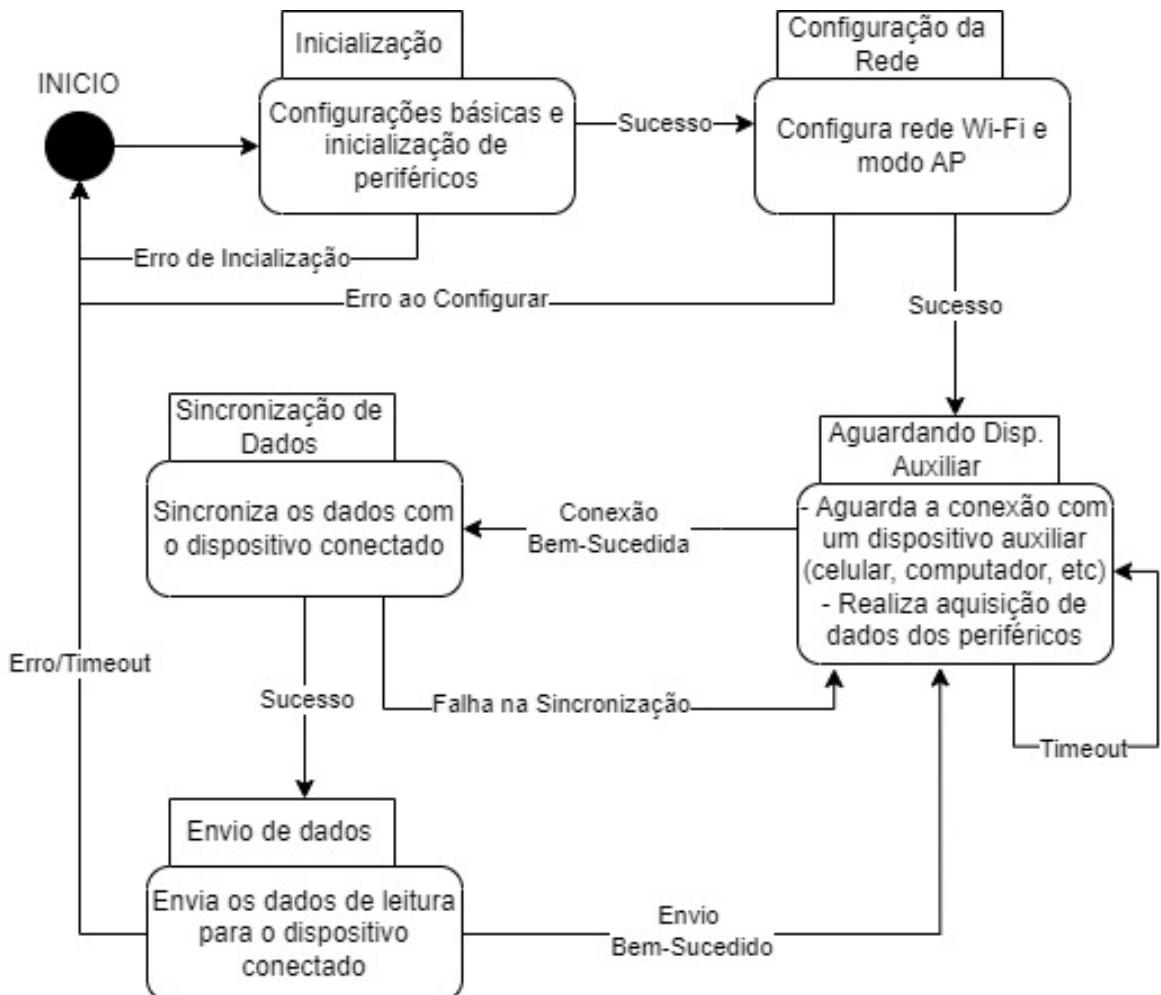
O processo de comunicação *wireless* utiliza o protocolo *Wi-Fi* integrado do ESP32 para criar um ponto de acesso, facilitando a interação com o dispositivo móvel. O *firmware* também é responsável por lidar com a detecção de conexões e desconexões dos clientes WebSocket, ajustando o comportamento do sistema conforme necessário.

Seguindo a lógica proposta, o microcontrolador, ao ser energizado, completa sua rotina de *setup* e permanece disponível para conexões. Após o estabelecimento da conexão, configura-se a relação principal entre o servidor, como *master*, e o dispositivo conectado, como *main client*. Ao acessar o IP do ESP32, ele serve à *webpage* o HTML e JavaScript necessários para sua apresentação e interação.

Quando a leitura é iniciada, o microcontrolador executa todas as etapas necessárias, incluindo o envio do pulso de *sync* (sincronização) e a criação de um delta de tempo para estabelecer um ponto de referência zero. Este último possibilita a sincronização das ondas, além do cálculo da frequência e do fator de potência. A aquisição dos dados em si também envolve uma série de processos específicos.

O ADC, acompanhado pelo circuito de condicionamento de sinais, pode operar em dois modos de leitura: *Data-Ready* e *Single-Shot*.

Figura 42 – Máquina de estados simplificada para apenas um dispositivo



Fonte: Autoria própria (2024).

No modo *Single-Shot*, o processador solicita as leituras ao ADC, que processa e envia os dados requisitados. Embora esse modo seja simples de implementar e bastante confiável, as limitações do chip escolhido tornam essa solução lenta para a aplicação em questão, alcançando uma taxa máxima de leitura de cerca de 500 SPS, insuficiente para a aquisição desejada da forma de onda.

Optou-se, então, pelo modo *Data-Ready*, que é mais complexo. Porém, nesse modo, após cada leitura, o ADC sinaliza ao microcontrolador levantando uma *flag* (por exemplo, elevando um pino específico para *high*) indicando que os dados estão prontos, aguardando a ação do processador. Quando o processador requisita os dados, eles são removidos do *cache* do ADC, reiniciando o ciclo de leitura. Com esse método, foi possível atingir uma taxa de 3300 SPS, permitindo uma aquisição mais precisa da forma de onda.

Os valores adquiridos pelo ADC são então processados pelo ESP32 para converterem-se em valores reais. Esse processamento começa com a seleção de uma faixa de leitura (*range*) via o *Programmable-gain Amplifier* (PGA).

Uma vez processados, os dados puros são armazenados em uma *struct*, conforme a estrutura da Tabela 4, serializados em formato JSON e enviados à *webpage* para visualização. Caso não haja novas entradas do cliente, esse processo se repete indefinidamente.

Tabela 4 – Chart data

Tipo	Nome da Variável	Descrição
int8_t	chart_id	Identificação do gráfico (usada somente para modularidade)
int8_t	voltage_gain	Ganho de tensão a ser informado para o WebServer
int8_t	current_type	Ganho/faixa de corrente a ser informada para o WebServer (mA, A, uA)
int16_t	voltage_value[]	Array de valores das tensões lidas
int16_t	current_value[]	Array de valores das correntes lidas
int64_t	voltage_time[]	Array de valores dos tempos em que cada tensão foi lida
int64_t	current_time[]	Array de valores dos tempos em que cada corrente foi lida

Fonte: Autoria própria (2024).

4.1.2.2 Software

Toda a lógica de conversão dos valores de tensão e corrente em bits do ADC para os valores reais é feita através de javascript em uma webpage. Dessa maneira, poupa-se informação transmitida pelo módulo, e utiliza-se um processamento mais robusto (do celular ou computador conectado) para os cálculos de potência.

Esta webpage foi desenvolvida em HTML5 com integração de JavaScript e uso do protocolo WebSocket. Esse protocolo permite uma conexão bidirecional entre o servidor do micro-controlador e o dispositivo móvel. A interface processa os dados e os apresenta ao usuário por meio de gráficos e indicadores numéricos. São exibidos valores de tensão RMS, corrente RMS, frequência, potências (aparente, reativa e ativa) e Fator de Potência.

4.1.2.2.1 Tensão e Corrente

Para diferentes configurações de escala de tensão, o código utiliza multiplicadores pré-definidos para converter os valores lidos para a tensão real. A Tabela 5 descreve os multiplicadores e a escala máxima correspondente:

Os valores foram obtidos analisando o circuito, de maneira a sempre manter a tensão na leitura abaixo dos 3.3V de tensão suportados pelo ADC. Estes devem ser ajustados conforme a necessidade de calibração do dispositivo montado.

Tabela 5 – Tabela de multiplicadores de tensão

Multiplicador	Tensão Máxima na Escala (V)	Ganho	Tensão Máxima (V)
0.2	409.6	1	4.096
0.1	204.8	2	2.048
0.05	102.4	4	1.024
0.025	51.2	8	0.512
0.0125	25.6	16	0.256

Fonte: Autoria própria (2024).

De maneira similar, o mesmo ocorre com a corrente. Porém, devido a aspectos construtivos do módulo, essa sempre está com o PGA na escala $x16$, alterando apenas os multiplicadores conforme a Tabela 6. Os ajustes para cada escala tratam-se dos valores de calibração que devem ser alterados conforme a necessidade após ter o dispositivo físico montado.

Tabela 6 – Tabela de multiplicadores de corrente

Escala	Multiplicador
A	$0.01875 \times \text{ajuste_A}$
mA	$0.0001856 \times \text{ajuste_mA}$
uA	$0.000001875 \times \text{ajuste_uA}$

Fonte: Autoria própria (2024).

Os valores dos multiplicadores de corrente foram obtidos analisando o comportamento do circuito e fazendo as devidas conversões de tensão para corrente conforme o valor dos resistores utilizados em cada caso, veja Tabela 7:

Tabela 7 – Tabela de multiplicadores de corrente

Range	Resistor shunt	Corrente (A)	Mult. do divisor resistivo	Tensão lida (V)	Mult. inicial (0,125mV/bit)	Mult. final (razão do resistor)
uA	100	0,001	1,5	0,1000	0,0001875	0,000001875
mA	1,01	0,2	1,5	0,2020	0,0001875	0,000185644
A	0,01	10	1,5	0,1000	0,0001875	0,018750

Fonte: Autoria própria (2024).

4.1.2.2.2 Apresentação Visual

Os gráficos são gerados por uma biblioteca do JavaScript chamada Graph.js. Esta biblioteca possibilita a integração de vários gráficos, para a amostragem e apresentação tanto da tensão quanto da corrente simultaneamente, e também a utilização de um *trigger* por programação, para ser possível a visualização da onda estabilizada. Este trigger funciona de forma a

detectar a passagem da onda por um ponto escolhido e então sincronizar o gráfico de acordo, tornando aquele o ponto 0 visualizado e então estabilizando a onda.

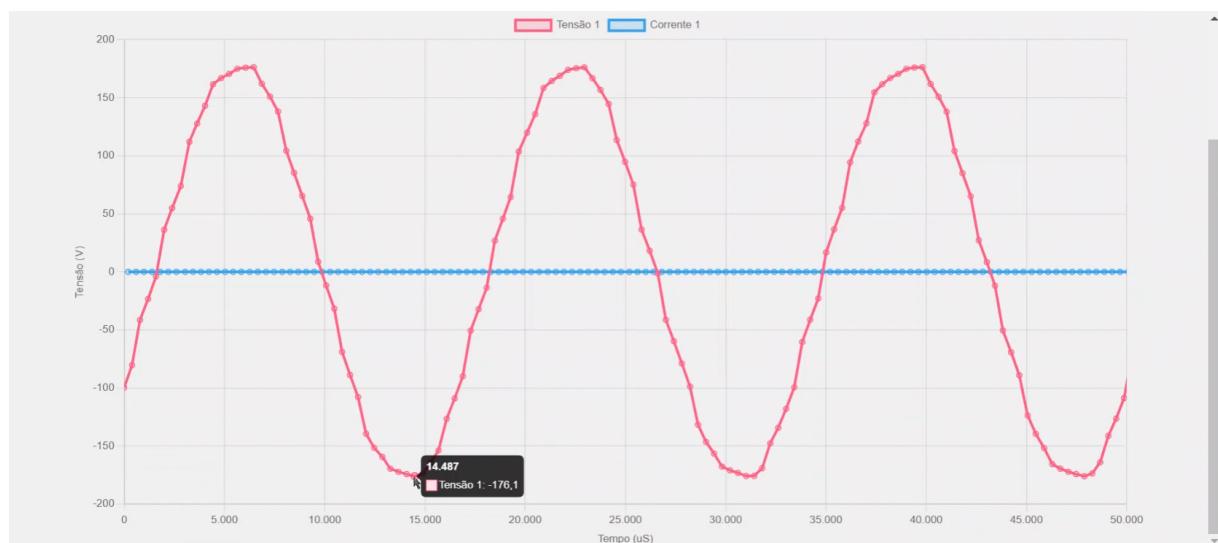
A parte estrutural da página foi desenvolvida utilizando HTML. Exemplos das telas durante a leitura podem ser vistos na Figura 43 e Figura 44.

Figura 43 – Detalhe do cabeçalho de informações da página da Web gerada pelo dispositivo



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 44 – Detalhe do gráfico da página da Web gerada pelo dispositivo

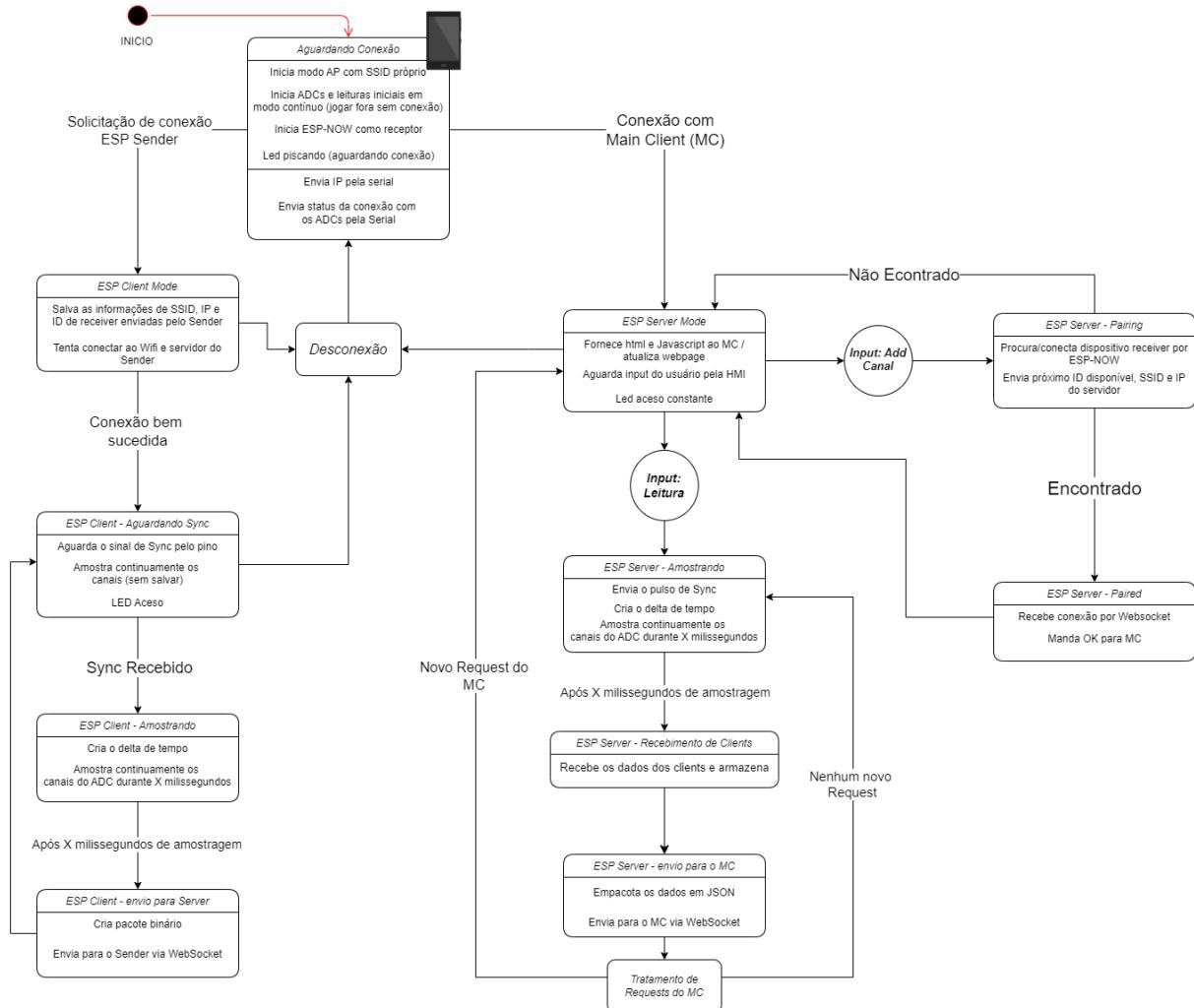


Fonte: Autoria própria (2024).

4.1.2.3 Modularidade no Software

A comunicação foi testada utilizando-se dois módulos *ESP32* e dados pré-programados de leitura, permitindo que fosse possível estabelecer o conceito da comunicação e elaborar a máquina de estados que define como a comunicação precisa ser tratada.

Figura 45 – Máquina de Estados Completa



Fonte: Autoria própria (2024).

É possível observar pela Figura 45 que sua implementação torna o código e o desenvolvimento desse trabalho extremamente complexos.

Após o processo da máquina de estados padrão, apresentada na Figura 42 - com a modularidade futuramente implementada - o funcionamento da máquina de estados completa se daria da seguinte forma:

1. Caso o cliente deseje adicionar um canal de leitura, o microcontrolador utiliza o protocolo *ESP-NOW* para procurar e parear com um dispositivo adicional disponível.

2. Assim, após o emparelhamento bem-sucedido, estabelece-se uma relação de *client* com o dispositivo adicional, fornecendo-lhe todas as informações da rede necessárias para que ele accesse a mesma *webpage* e *Websocket*.
3. Nesse momento, o uso do protocolo *ESP-NOW* é finalizado, e toda a comunicação subsequente é realizada diretamente via *Websocket*. Isso reduz a carga de processamento no microcontrolador e otimiza o tempo de comunicação e a transmissão de dados, pois o tamanho dos pacotes aumenta de 255 bytes para até 5 kilobytes.
4. Ao iniciar uma nova leitura via *input* do cliente, um sinal de *sync* é enviado do servidor *master* para o módulo do canal adicional, estabelecendo assim uma referência temporal para sincronizar as leituras. A adição de canais é limitada a dois, permitindo a leitura trifásica.

4.1.3 Dificuldades encontradas e trabalhos futuros

Devido a dificuldades durante o desenvolvimento do projeto, não foi possível implementar por completo a função de modularidade entre os dispositivos. Dessa maneira, não é possível observar mais de um módulo ao mesmo tempo com o protótipo desenvolvido.

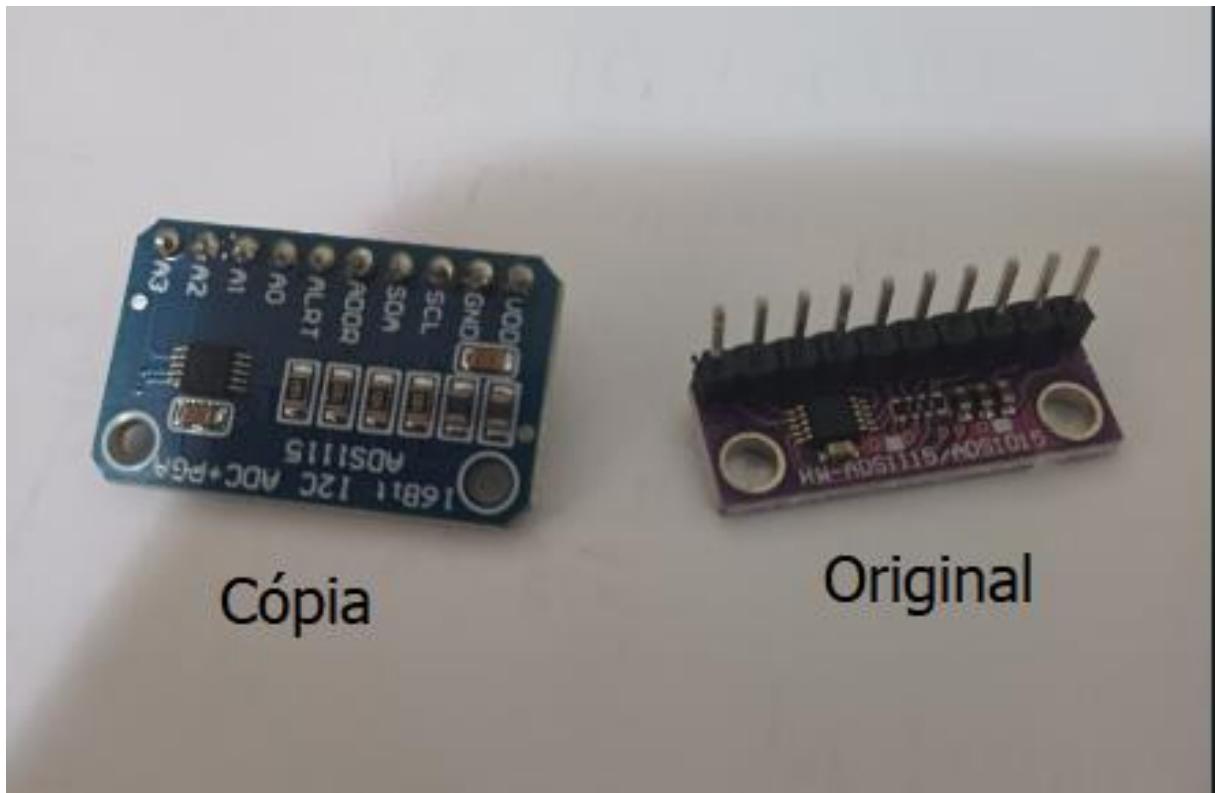
4.1.3.1 ADC falsificado

Um grande empecilho encontrado foi a não conformidade do ADC adquirido para a confecção do protótipo. Esse foi comprado de forma online em uma loja com baixa reputação e, como consequência, possuía sua velocidade de leitura fixada a menos que 500 SPS. Devido a complexidade de desenvolvimento do *firmware*, muito foi testado até se chegar a conclusão de que o CI tratava-se de uma falsificação que não atendia o explicitado no datasheet do ADS1015. Esse foi posteriormente substituído por um de melhor procedência, alcançando os 3300 SPS esperados sem maiores dificuldades. Ao leitor, recomenda-se evitar o módulo indicado como cópia na Figura 46, procurando sempre pelo original.

4.1.3.2 Limitação do protocolo *ESP-NOW*

De início, foi considerada a utilização do protocolo *ESP-NOW* para o envio de dados entre dispositivos. Visto que trata-se de um protocolo criado pela própria fabricante de microcontrolador utilizado, e possui vasta documentação de uso disponível. Uma limitação desse protocolo, porém, é o tamanho máximo de 255 bytes por pacote de dados. Um par de pontos de tensão e corrente ocupa cerca de 160 bits, considerando a *struct* apresentada na Tabela 4. Com essa limitação, é possível transmitir no máximo 12 pontos de uma forma de onda, o que é insuficiente, considerando que uma onda completa requer aproximadamente 55 pontos a uma taxa

Figura 46 – Comparação entre ADS1015 cópia e original



Fonte: Autoria própria (2024).

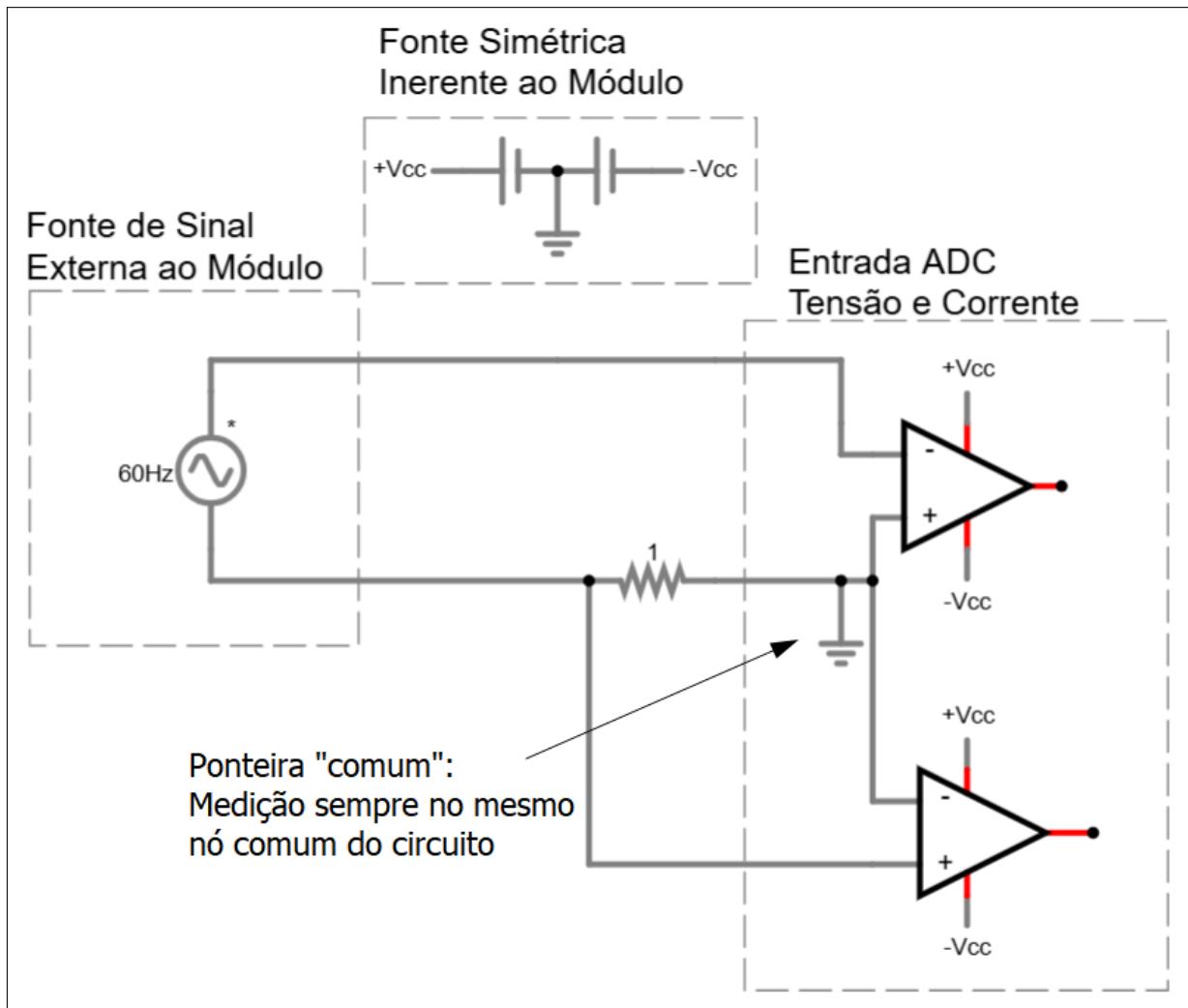
de 3300 SPS e que, para uma análise adequada de uma rede trifásica, é necessário amostrar ao menos 3 ciclos de onda (VICIANA *et al.*, 2023). Como forma de contornar esse problema, seria necessária a implementação da comunicação entre módulos utilizando *websockets*. O que tornou o desenvolvimento dessa etapa mais complexo do que o esperado.

4.1.3.3 Isolamento entre canais

Conforme discutido na subseção 4.1.1.3, o isolamento entre os canais de tensão e corrente foi necessário para o correto funcionamento do circuito. E pesquisas e testes para validação de propostas funcionais tomaram mais tempo do que o esperado. Tal problema poderia ser contornado limitando alguns requisitos do projeto. Caso o dispositivo fosse projetado para ler apenas tensão e corrente alternadas, por exemplo, seria possível utilizar um transformador de corrente na respectiva entrada do ADC, inherentemente isolando este canal do restante do circuito. Ou caso não fosse necessária a medição entre diferentes pontos do circuito - utilizando um ponto comum de medição, como mostrado na Figura 47. Seria possível manter ambos os canais na mesma referência, levando em consideração apenas o ruído transmitido de um canal para o outro. Contudo as condições dos ensaios realizados para ensino dos conceitos de cir-

cuitos nos laboratórios requerem medidas CA ou CC isoladas. Portanto, optou-se por manter a complexidade deste projeto.

Figura 47 – Circuito de leitura simplificado utilizando ponto comum de referência



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2 Materiais

Esta seção está dedicada à lista de materiais utilizados para a confecção de um protótipo, identificada pela Tabela 8. Os preços indicados são validos somente para a data de confecção desta monografia, pois estão cotados de acordo com o valor pago para a confecção deste, sendo os componentes originados de várias lojas diferentes, online e físicas, na China e no Brasil e também em datas diferentes.

Nota-se também que para efeito de testes e de montagem do protótipo testado, não foi considerada a proteção de entrada por dois fatores: primeiramente esta é extremamente cara

e difícil de encontrar (em questão aos fusíveis). Outro motivo é a segurança dos autores, pois testes de proteção são perigosos necessitam aparelhos especiais.

Tabela 8 – Lista de Materiais e Custos

Material	Quantidade	Preço por Unidade (R\$)	Valor Total (R\$)
ESP32	1	60,00	60,00
ADC ADS1015	2	35,00	70,00
Buzzer THT	1	3,50	3,50
Capacitor 100 nF	15	0,25	3,75
Capacitor 330 pF	4	0,15	0,60
Capacitor 10 µF	4	0,20	0,80
Capacitor 1 µF	6	0,20	1,20
Diodo Schottky 1N5819	4	0,25	1,00
Diodo 1N4007	10	0,15	1,50
Trimpot 1 kΩ	4	3,60	14,40
Transistor BC547	1	0,25	0,25
Resistor 220 Ω	6	0,10	0,60
Resistor 1 kΩ	13	0,10	1,30
Resistor 330 Ω	2	0,10	0,20
Resistor 0 Ω	4	N/A	0,00
Resistor 3k3 Ω	1	0,10	0,10
Resistor 1% 2 MΩ	4	0,08	0,32
Resistor 1% 10 kΩ	4	0,10	0,40
Resistor 1% 100 Ω	4	0,20	0,80
Resistor 1% 1 Ω	4	0,20	0,80
Resistor SMD 1% 10 mΩ	1	0,30	0,30
Varistor S05K385	2	3,00	6,00
Fusível HRC 440 mA	1	45,50	45,50
Fusível HRC 11 A	1	49,50	49,50
Borne KRE2	3	1,30	3,90
Borne KRE3	2	2,00	4,00
Chave Alavanca 2 posições	1	4,20	4,20
LM317T	2	2,30	4,60
LM358	2	1,10	2,20
LM7805	2	1,60	3,20
6N137	6	3,20	19,20
Barra de Pinos Fêmea 40x1	2	3,10	6,20
Fonte Isolada	2	12,50	25,00
TOTAL			335,32

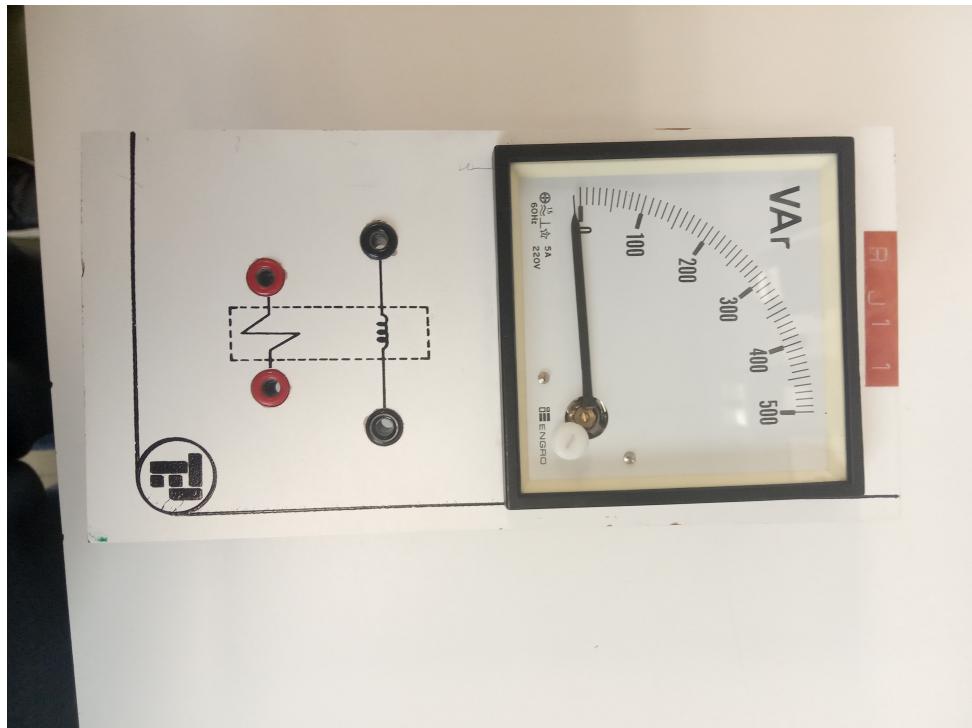
Fonte: Autoria própria (2024).

4.3 Casing

Para a confecção do invólucro, ou *casing* do protótipo, foi utilizado uma plataforma também gratuita de modelagem, chamada *Onshape*.

Foram tiradas as medidas de um módulo de bancada de madeira, que suporta os equipamentos em bancadas dos laboratórios em questão, como demonstrado na Figura 48. Assim foram respeitadas as medidas dos módulos atuais e o tamanho e disposição das entradas/sai-das da PCB.

Figura 48 – Módulo de Bancada

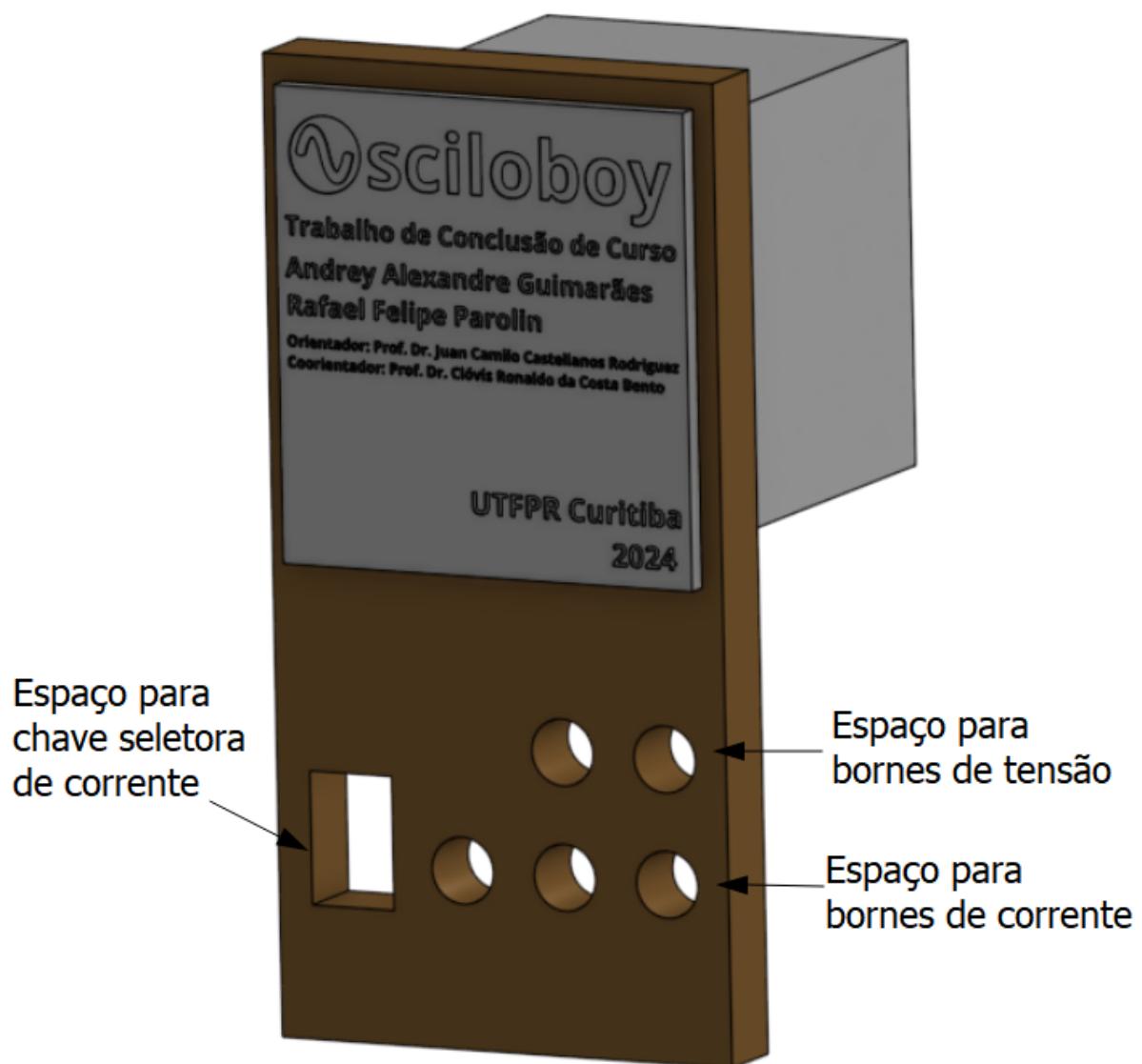


Fonte: Autoria própria (2024).

O modelo foi pensado para ser o mais simples possível de ser impresso em 3D e modificado. Possui espaço para a placa e periféricos necessários. Devido a dificuldades no desenvolvimento do trabalho, o encapsulamento não foi fabricado. Uma visão geral do modelo pode ser visto na Figura 49, juntamente de uma representação simplificada do suporte de madeira citado anteriormente. O detalhe dos suportes internos pode ser visto na Figura 50.

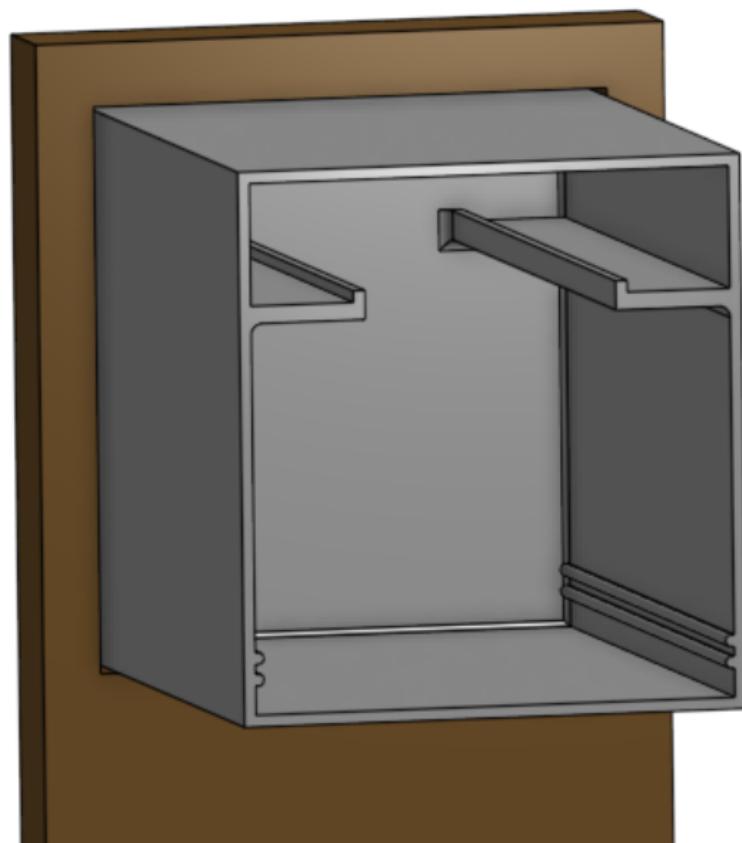
Assim como os demais elementos desse projeto, pode ser encontrado no Apêndice A ao final do trabalho.

Figura 49 – Modelo virtual do encapsulamento



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 50 – Detalhes de suportes para PCB e periféricos



Fonte: Autoria própria (2024).

5 TESTES E RESULTADOS

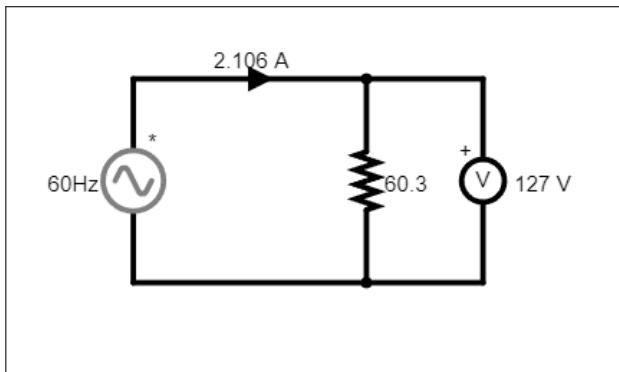
Os testes foram feitos para prova de conceito e demonstração do funcionamento do protótipo, comparando as leituras CA e CC por este com as obtidas por um multímetro e por um osciloscópio.

5.1 Teste da Medição da Rede Elétrica

O primeiro teste consta a leitura da tensão e corrente de um circuito representado pela Figura 51, sendo o sinal a saída de uma tomada de 127 V do laboratório. O *setup* básico se encontra na Figura 52. Para este teste foi utilizado um reostato pois este possui a capacidade de suportar correntes altas. A resistência deste foi fixa em $60,3\ \Omega$.

Utilizando a lei de ohm $v = r \cdot i$, espera-se uma leitura de corrente de 2,11 A.

Figura 51 – Diagrama do circuito do teste da rede elétrica.



Fonte: Autoria própria (2024).

Os resultados das medidas obtidos se encontram na Tabela 9 e as formas de onda nas Figuras 53 e 54, obtidos pelo osciloscópio e o protótipo respectivamente.

Além disso, também é possível observar os dados de frequência da rede, as potências ativa, reativa, aparente e o fator de potência, obtidos pelo protótipo.

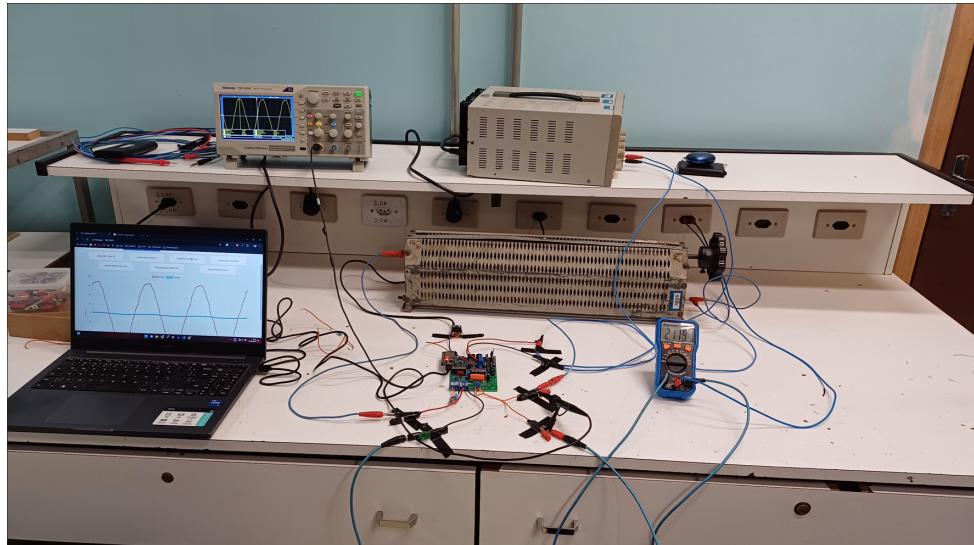
Comparando os sinais obtidos, percebe-se que o protótipo propõe uma qualidade de leitura excepcional para este range. A Tabela 9 contém os resultados e também o erro do protótipo considerando os valores do osciloscópio (erro 1) e do multímetro (erro 2) como referência.

Tabela 9 – Resultados do teste de leitura da rede.

Leitura	Osciloscópio	Multímetro	Protótipo	Erro 1	Erro 2
Rede (V)	130 V	128,7 V	128,1 V	1,46%	0,47%
Rede (A)	-	2,129 A	2,130 A	-	0,047%

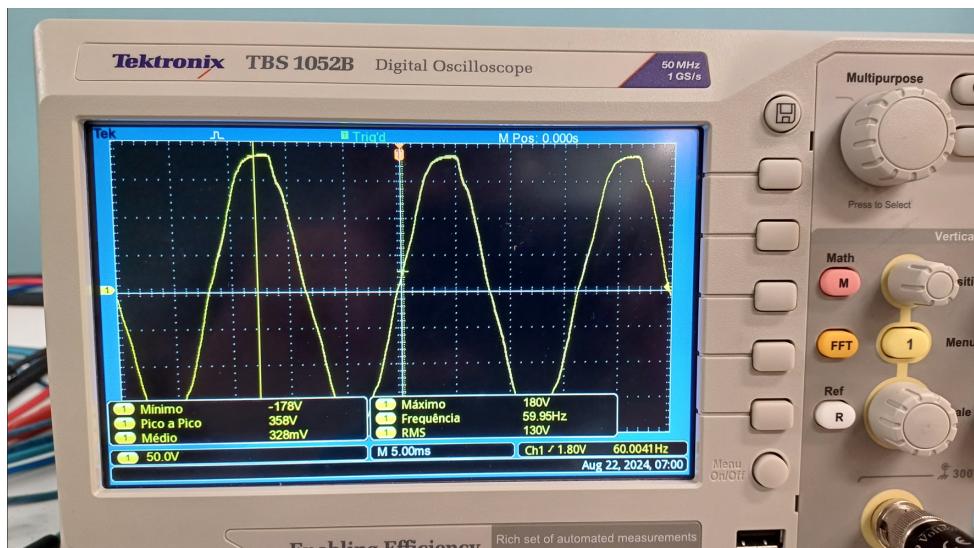
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 52 – Setup básico para testes completo.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 53 – Leitura da tensão do circuito do teste de leitura de rede - Osciloscópio.

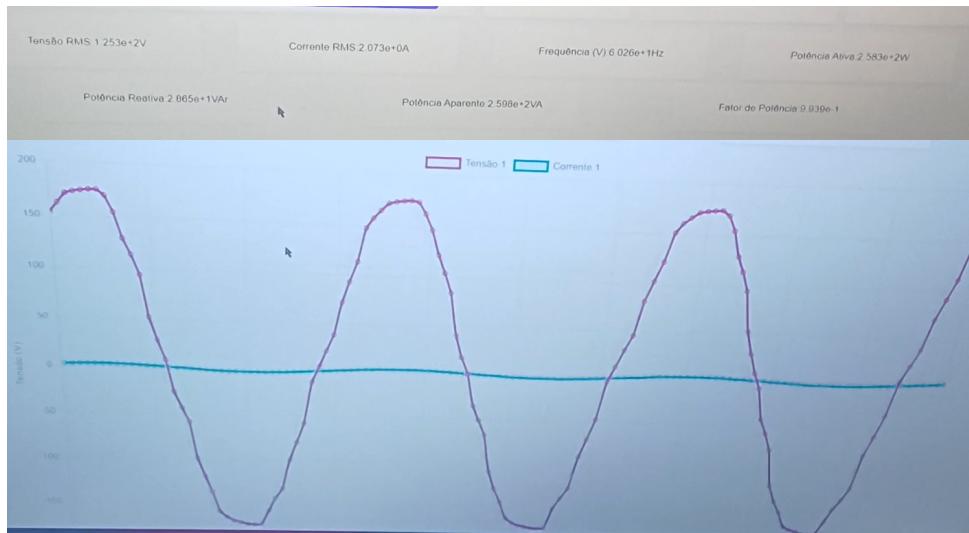


Fonte: Autoria própria (2024).

5.2 Teste 200 mVp

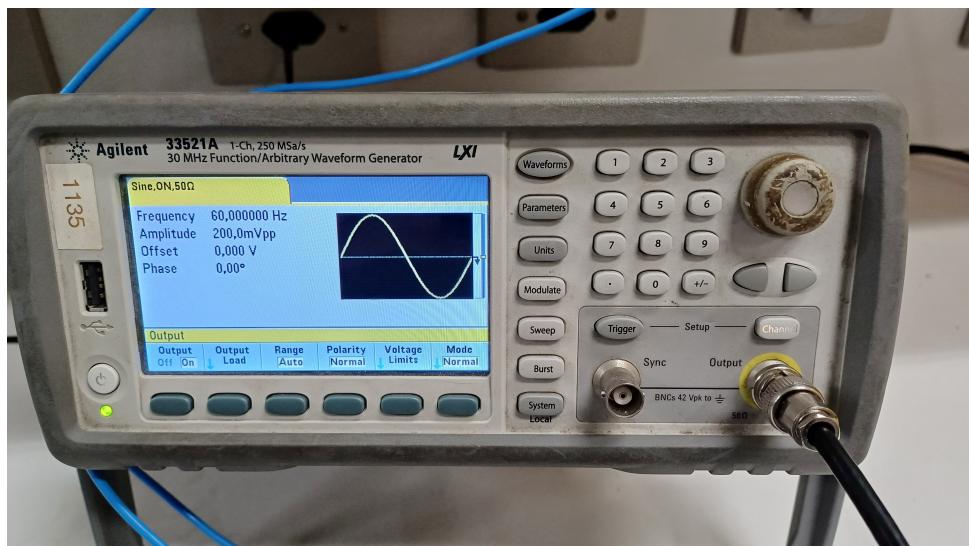
O segundo teste propõe a verificação de outro range de leitura do protótipo. Para isto, um sinal de 200 mV pico foi gerado por um gerador de funções, conforme a Figura 55. Nota-se que na tela do gerador de funções se encontra a nomenclatura "Vpp", ou tensão de pico a pico, porém esta está equivocada, como demonstrado nos resultados das medições tanto do osciloscópio quanto do protótipo.

Figura 54 – Leitura completa do circuito do teste de leitura de rede - Protótipo



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 55 – Gerador de funções - Sinal 200 mVp.



Fonte: Autoria própria (2024).

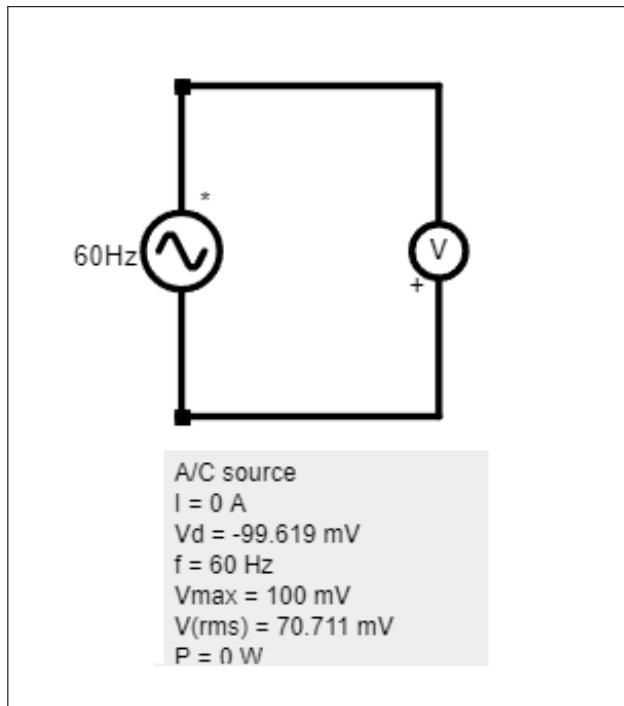
Utilizando-se novamente o osciloscópio e um multímetro, obtém-se os valores de leituras indicados na Tabela 10. As Figuras 57 e Figura 58 representam também um comparativo das ondas obtidas.

Tabela 10 – Resultados do teste de 200 mVp.

Leitura	Osciloscópio	Multímetro	Protótipo	Erro 1	Erro 2
200 mVp	143 mVRMS / 244 mVp	137 mVRMS	188 mVRMS / 263 mVp	31,47% e 7,78%	37,23%

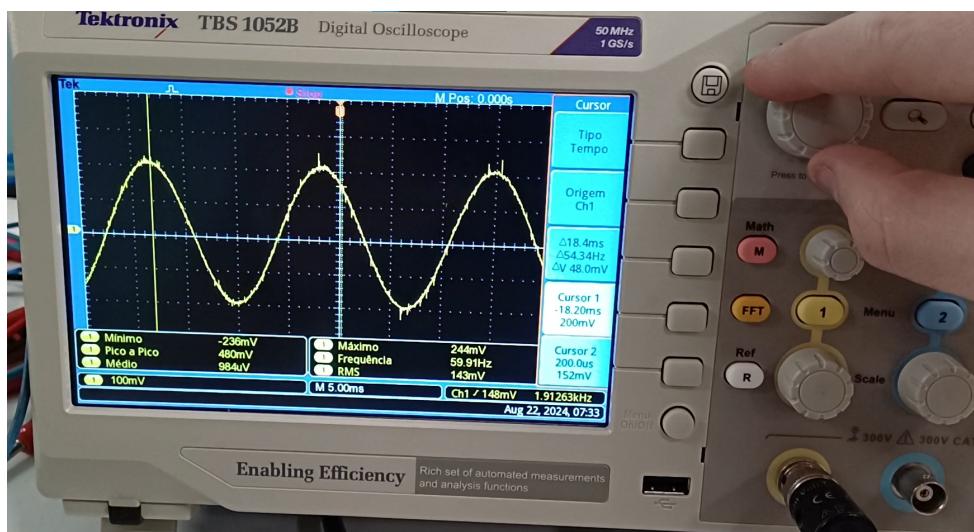
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 56 – Diagrama do circuito do teste de 200 mVp



Fonte: Autoria própria (2024).

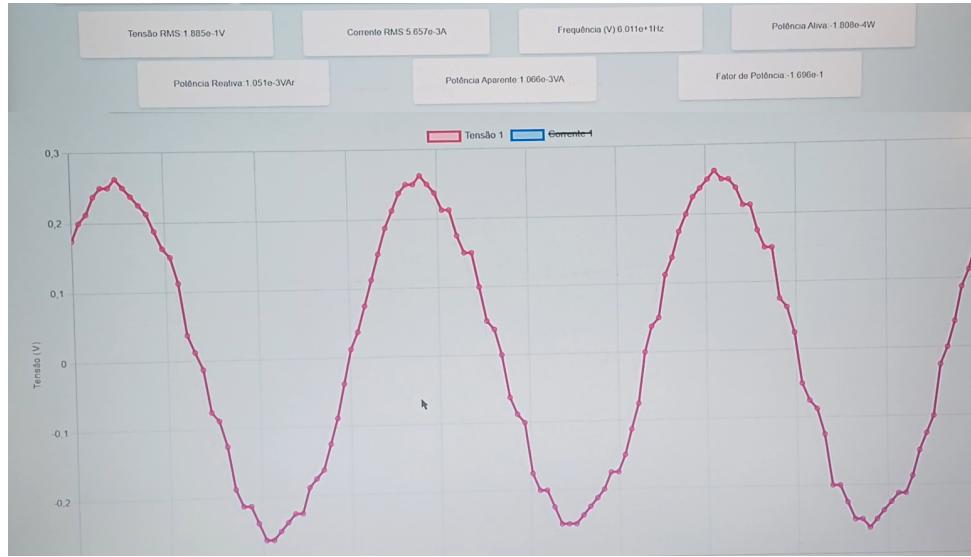
Figura 57 – Leitura da onda de 200 mVp - Osciloscópio



Fonte: Autoria própria (2024).

Comparando os sinais obtidos, a diferença entre todos os diferentes instrumentos é notável neste range de leitura. O protótipo apresenta um erro fora do proposto pelas especificações. Este range pode ser melhor calibrado por software e seu erro curado a ponto de respeitar tais especificações. Nota-se também que existem valores de corrente e potências, porém o canal de tais não está conectado, sendo estes então descartáveis.

Figura 58 – Leitura da onda de 200 mVp - Protótipo

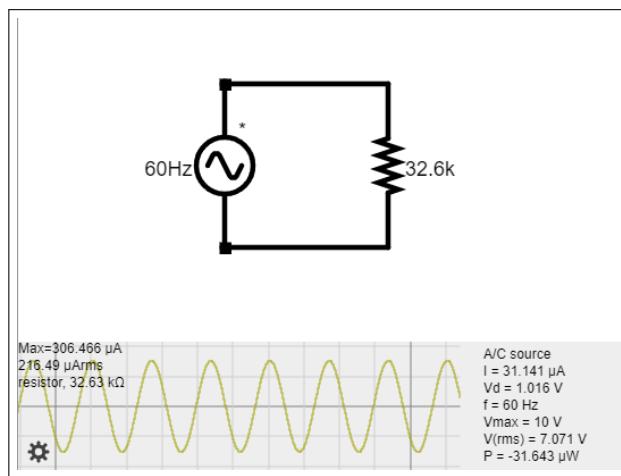


Fonte: Autoria própria (2024).

5.3 Teste uA

Para o range de leitura de corrente de micro amperes, foi utilizado um resistor comum de $30\text{ k}\Omega$, sendo o valor real do resistor utilizado $32,63\text{ k}\Omega$. Além disto, utilizou-se o gerador de função novamente para gerar uma tensão pequena de 10 Vp ou 7.07 Vrms . Com estes dados, utilizando novamente a lei de Ohm, se espera uma leitura de corrente RMS de $0,000217\text{ A}$ ou $217\text{ }\mu\text{A}$.

Figura 59 – Diagrama do circuito do teste de μA



Fonte: Autoria própria (2024).

As leituras obtidas pelo multímetro e pelo protótipo são demonstradas na Tabela 11 e as formas de onda na Figura 60.

Figura 60 – Leitura da corrente de $217 \mu\text{A}$ - Protótipo.



Fonte: Autoria própria (2024).

Olhando para os valores obtidos, percebe-se que tanto o multímetro quanto o protótipo exibem leituras precisas, confirmando assim a capacidade deste de ler sinais relativamente pequenos em ordem de magnitude.

Tabela 11 – Resultados do teste de μA .

Leitura	Multímetro	Protótipo	Erro
$217 \mu\text{A}$	$214.9 \mu\text{A}$	$209.5 \mu\text{A}$	2,51%

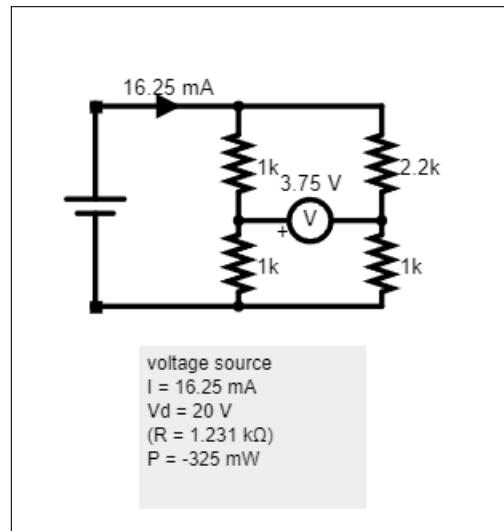
Fonte: Autoria própria (2024).

5.4 Teste Wheatstone

Para provar a capacidade tanto de leitura DC quanto de leitura de tensão e corrente em pontos diferentes do circuito, foi utilizado um circuito de Wheatstone. Foram feitas as medições de acordo com o diagrama representado pela Figura 61 e sua montagem na Figura 62. Como indicado no diagrama do circuito, são esperadas leituras de 3,75 V e 16,25 mA.

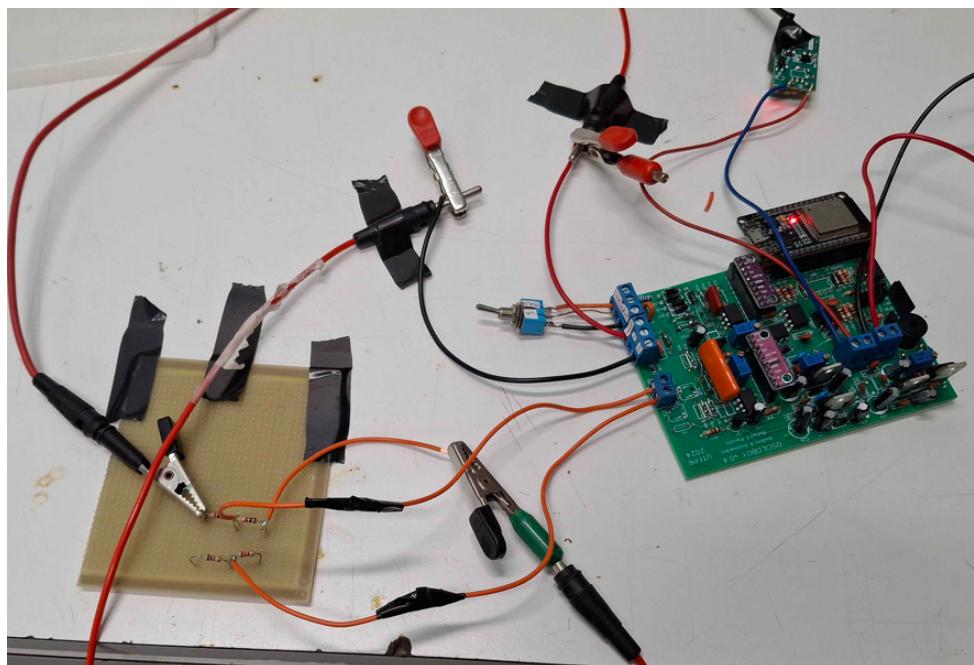
A resistência equivalente deste circuito, quando medida, resultou em $1,21 \text{ k}\Omega$. As medidas obtidas estão representadas na Tabela 12 e as formas de onda obtidas pelo osciloscópio e pelo protótipo nas Figuras 63 e 64, respectivamente.

Figura 61 – Diagrama circuito Wheatstone



Fonte: Autoria própria (2024).

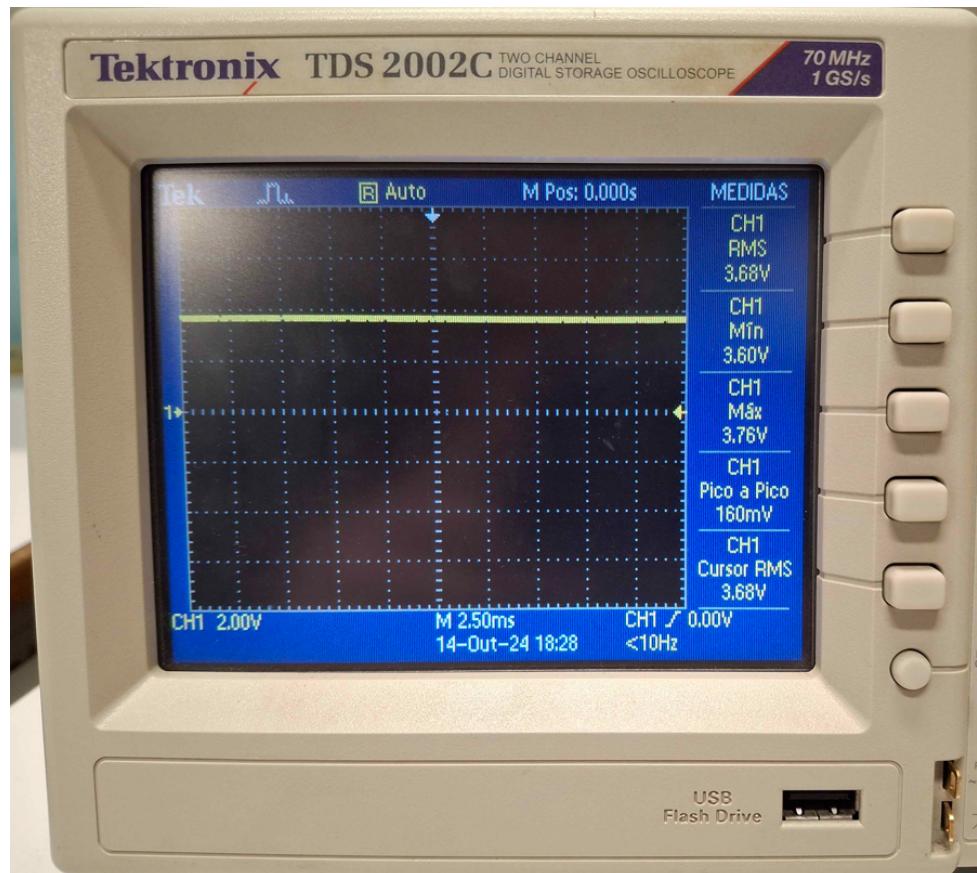
Figura 62 – Circuito wheatstone



Fonte: Autoria própria (2024).

Comparando os resultados obtidos, é possível observar que as leituras de sinais de corrente contínua feitas pelo protótipo são de boa qualidade. Além disso, observa-se que este realmente possui a capacidade de leitura em pontos diferentes do circuito sem interferências ou erros.

Figura 63 – Leitura de tensão do circuito Wheatstone - Osciloscópio



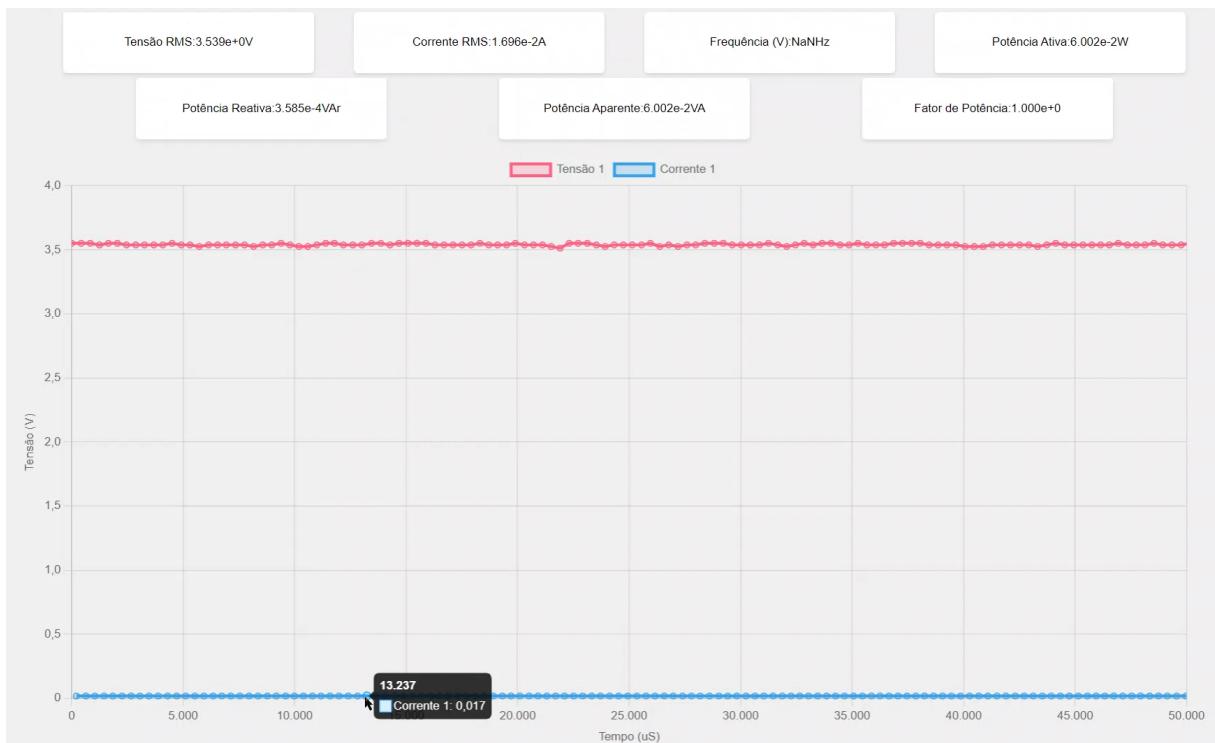
Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 12 – Resultados do teste do circuito Wheatstone.

Leitura	Osciloscópio	Multímetro	Protótipo	Erro 1	Erro 2
3,75 V	3,68 V	3,67 V	3,54 V	3,8%	3,54%
16,25 mA	-	16,51 mA	16,96 mA	-	2.72%

Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 64 – Leitura do circuito Wheatstone - Protótipo



Fonte: Autoria própria (2024).

6 CONCLUSÃO

A finalidade principal deste trabalho foi desenvolver um multimedidor com comunicação *wireless* de baixo custo, capaz de medir tensão e corrente simultaneamente. De maneira sucinta, pode-se concluir que a produção do protótipo e a prova de conceito sobre a sua funcionalidade trouxeram resultados promissores para subsequentes pesquisas.

As especificações do ADC e do microcontrolador são as de maior importância para o desenvolvimento de um protótipo com esta finalidade. Isto se deve às necessidades a serem atendidas ou o propósito do instrumento de medição a ser elaborado, como precisão e ranges de leitura, quais tipos de leitura serão feitas, a interface homem-máquina, velocidade de transmissão de dados, entre várias outras. Uma consideração de suma importância também é a compatibilidade entre estes componentes.

Para alcançar o objetivo de leitura paralela de tensão e corrente, foi necessário o desenvolvimento de um circuito isolado internamente, garantindo a integridade dos sinais e dos componentes do circuito. Isto se apresentou como um grande desafio quando se trata de baixo custo e a replicabilidade do protótipo desenvolvido, pois soluções já existentes são em grande maioria custosas e difíceis de se encontrar em mercados não especializados.

Este trabalho demonstra o desenvolvimento de um *firmware* que é necessário para o funcionamento do equipamento como um todo. Este integra todo o resultado da pesquisa e possibilita a comunicação entre o ADC e a plataforma de tratamento de dados. Esta pode ser acessada por dispositivos externos como smartphones ou computadores, assim como deixa estruturada uma futura modularização, tornando este uma das partes mais críticas do projeto, assim como desafiadora.

É interessante pontuar que as leituras true RMS de multímetros comerciais não necessariamente conseguiram fazer a leitura corretamente quando se tem um circuito que gera sinais com componentes DC devido ao acoplamento AC utilizado por estes multímetros para realizar sua leitura. O protótipo neste trabalho desenvolvido não possui acoplamento AC e considera a onda pura para o cálculo, resultando em um valor mais condizente com a realidade.

Para fazer esta medida com um multímetro true RMS seria necessário fazer uma medida AC, uma DC e calcular o resultado final com a equação $RMS = \sqrt{C_{Arms}^2 + C_C^2}$. Multímetros que dispõe tal utilidade são custosos monetariamente, o que é uma vantagem para o desenvolvimento do protótipo neste trabalho proposto.

Considerando as especificações adotadas para o protótipo, as tabelas 13 e 14 demonstram os resultados obtidos, considerando todos os aspectos da pesquisa.

De acordo com as especificações de aspectos construtivos, foi adicionado um borne a mais para a corrente visto a necessidade de se trocar a entrada desta para leituras de A, mA e μ A. A utilização de fontes internas isoladas foi atendida e o tipo de interface homem-máquina também foi atendido, se dando por smartphone ou computador.

Tabela 13 – Precisões solicitadas e resultados

Parâmetro	Precisão Solicitada	Precisão Atingida	Status
Tensão (V)	< 2%	entre 0,47% e 1,46%	Dentro de Especificação
Tensão (mV)	< 2%	entre 31,47% e 37,23%	Fora de Especificação
Corrente (A)	< 5%	0,047%	Dentro de Especificação
Corrente (mA)	< 5%	2,72%	Dentro de Especificação
Corrente (μ A)	< 5%	2,51%	Dentro de Especificação

Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 14 – Implementação de funções de acordo com especificações

Função	Status
Leitura Simultânea de Tensão e Corrente True RMS	Implementado
Exibição de Formas de Onda de Tensão e Corrente	Implementado
Cálculo de Potências Ativa, Reativa e Aparente	Implementado
Cálculo do Fator de Potência	Implementado
Modularização e Leitura de Multiplas Fases	Não Implementado

Fonte: Autoria própria (2024).

Nota-se que o dispositivo também oferece a leitura da frequência do sinal a ser medido. Além disto, de acordo com o teste utilizando-se o circuito de *Wheatstone*, a leitura simultânea de sinais de corrente e tensão em partes diferentes do circuito sem interferências é provada.

Quanto aos resultados dos testes, nota-se que as especificações foram em sua grande maioria atendidas, exceto o range de mV, devido a uma má calibração de seus parâmetros. Este pode ser calibrado posteriormente por meio do firmware integrado ao dispositivo para o aperfeiçoamento da aquisição destes sinais e então sua leitura.

A funcionalidade de modularização não foi implementada nesta etapa devido à sua complexidade de implementação, por limitações de protocolos de comunicação *wireless* atrelados à plataforma e o hardware escolhidos e também por limitações de tempo.

Com isso, propõe-se para trabalhos futuros a implementação da modularidade do sistema e com isso a expansão e otimização do software e firmware.

Finalmente, evidenciam-se alguns dos diferenciais do protótipo projetado:

- True RMS;
- Leitura diferencial isolada para redução de ruídos, o que previne problemas;
- Apresenta forma de ondas de tensão e corrente simultaneamente, junto de potência (W, VAr, VA, FP) e frequência;
- Possibilidade de múltiplos dispositivos conectados;
- Plataforma aberta para futuro desenvolvimento;
- Custo adequado à finalidade.

REFERÊNCIAS

- ABATE, F. *et al.* A low cost smart power meter for IoT. **Measurement**, v. 136, p. 59–66, mar. 2019. ISSN 0263-2241. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118312144>.
- BRAGA, N. C. **Como Funciona o Comparador de Tensão (ART1511)**. 2017. Disponível em: <https://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/12973-como-funciona-o-comparador-de-tensao-art1511.html>.
- CARTER, B.; MANCINI, R. **Op Amps for Everyone**. 2nd edition. ed. Dallas: Newnes, 2003. ISBN 978-0750677011.
- COMPONENTS101. **Difference between Microprocessor and Micro-controller**. 2019. Disponível em: <https://components101.com/articles/difference-between-microprocessor-and-microcontroller>.
- CYBURT, B. **Single-ended and differential voltage measurement: choosing which method to apply (Part 2)**. 2020. Disponível em: [https://www\(processonline.com.au/content/instrumentation/article/single-ended-and-differential-voltage-measurement-choosing-which-method-to-apply-part-2-7315550](https://www(processonline.com.au/content/instrumentation/article/single-ended-and-differential-voltage-measurement-choosing-which-method-to-apply-part-2-7315550).
- DEVICES, A. **AD202 datasheet**. [S.I.], 2001. Disponível em: <https://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/041/AD202-pdf.php>.
- EDISONTC. **Digital Multimeters, Universe of Instrumentation**. 2016. Disponível em: <http://www.edisontc.org/ui/home/course/unit-i/multimeters/>.
- EEVBLOG. **Multimeter Input Protection Tutorial**. 2012. Disponível em: <https://www.eevblog.com/forum/blog/eevblog-373-multimeter-input-protection-tutorial/>.
- ESPRESSIF. **ESP32 Datasheet**. [S.I.], 2023. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf.
- FLUKE. **Manual Fluke 27**. [S.I.], 1998. Disponível em: https://www.testmart.com/webdata/mfr_pdfs/FLU/27_smeng0100.pdf.
- FLUKE. **Manual do usuário Fluke 434**. [S.I.], 2014. Disponível em: https://www.manualsbase.com/pt/manual/431880/stereo_system/fluke/434/.
- FLUKE. **Electrical Calibration Equipment | Fluke Calibration**. 2023. Disponível em: <https://eu.flukecal.com/products/electrical-calibration-0>.
- FLUKE. **Fluke 28 II Ex Intrinsically Safe True RMS Digital Multimeter**. 2023. Disponível em: <https://www.fluke.com/en/product/intrinsically-safe/fluke-28-ii-ex>.
- INFO lygte. **Multimeter design**. 2023. Disponível em: <https://lygte-info.dk/info/DMMDesign%20UK.html>.
- INFO lygte. **Multimeter protection and safety**. 2023. Disponível em: <https://lygte-info.dk/info/DMMDesignProtection%20UK.html>.
- INSTRUMENTS, T. **Design Considerations for System-Level ESD Circuit Protection**. 2012. Disponível em: https://www.ti.com/lit/an/slyt492/slyt492.pdf?ts=1684694830547&ref_url=https%20%2F%2Fwww.ti.com%2Fproduct%2Fslyt492

253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fsolution%252Fdigital-multimeter-dmm%253Fvariantid%253D20220%2526subsystemid%253D33457.

INSTRUMENTS, T. High-Precision Reference Design for Buffering a DAC Signal. 2017. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ug/tiduct8/tiduct8.pdf?ts=1685988821918&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fsolution%252Fdigital-multimeter-dmm%253Fvariantid%253D20220%2526subsystemid%253D33430.

INSTRUMENTS, T. Digital multimeter (DMM) design resources | TI.com. 2022. Disponível em: <https://www.ti.com/solution/digital-multimeter-dmm?variantid=20220>.

KEYSIGHT. Oscilloscope Parts and Function - Buying Guide. 2024. Disponível em: <https://www.keysight.com/used/us/en/knowledge/guides/used-oscilloscope-buying-guide/oscilloscope-parts-and-function>.

KUPHALDT, T. R. Lessons in Electric Circuits. 4. ed. [s.n.], 2021. IV. (Lessons In Electric Circuits, IV). Original-date: November, 2007. Disponível em: <https://www.circuitbread.com/textbooks/lessons-in-electric-circuits-volume-iv-digital>.

LINCK, C. Fundamentos de Metrologia. 2. ed. Porto Alegre: SAGAH, 2017. v. 1. Original-date: 2017. ISBN 978-85-9502-023-8. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595020238/>.

MAXIM. ICL8069 Datasheet. [S.I.], 2005. Disponível em: <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/ds/ICL8069.pdf>.

MINIPA. MINIPA ET-1100 INSTRUCTION MANUAL. [S.I.], 2013. Disponível em: <https://www.manualslib.com/manual/1085992/Minipa-Et-1100.html>.

MJLORTON. Fluke 28 II EX (Pre-production model) - A look inside / mini review. 2012. Disponível em: <https://www.mjorton.com/forum/index.php?topic=150.0>.

ONSEMICONDUCTOR. TVS/Zener Theory and Design Considerations. 2005. Disponível em: http://www.reallyreallyrandom.com/zener/media/Zener_Theory_and_Design.pdf.

ONSEMICONDUCTOR. Unidirectional Versus Bidirectional Protection. 2009. Disponível em: <https://www.mouser.com/pdfdocs/AND8424-D.PDF>.

O'REILLY, C. E.-K. P. Modern DACs and DAC Buffers Improve System Performance, Simplify Design | Analog Devices. 2012. Disponível em: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/buffering-the-output-of-high-speed-dacs.html>.

SILVEY, S. Understanding the CAT Rating System. 2022. Disponível em: <https://www.ecmweb.com/test-measurement/article/21247639/understanding-the-cat-rating-system>.

STAFF, E. Basics of Alarms and Trips - Instrumentation Tools. 2015. Disponível em: <https://instrumentationtools.com/basics-of-alarms-and-trips/>.

SYSTEMS, A. M. ACS712 datasheet. [S.I.], 2022. Disponível em: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/570845/AllegroMicroSystems/ACS712/1>.

TEEL, J. How to Select the Microcontroller for Your New Product. 2019. Disponível em: <https://predictabledesigns.com/how-to-select-the-microcontroller-for-your-new-product/>.

TEK. DMM7510 7.5 Digit Graphical Sampling Multimeter. 2012. Disponível em: <https://www.tek.com/en/products/keithley/digital-multimeter/dmm7510>.

VICIANA, E. *et al.* All-in-one three-phase smart meter and power quality analyzer with extended IoT capabilities. **Measurement**, v. 206, p. 112309, jan. 2023. ISSN 02632241. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224122015056>.

ZIEGLER, S. *et al.* Current Sensing Techniques: A Review. **IEEE Sensors Journal**, v. 9, n. 4, p. 354–376, abr. 2009. ISSN 1530-437X. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4797906/>.

APÊNDICE A – Acesso ao Circuito, Código e Modelo 3D

Figura 65 – Circuito - EasyEda



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 66 – Repositório do Código - GitHub



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 67 – Modelo 3D do encapsulamento - OnShape



Fonte: Autoria própria (2024).