



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANDREY ALEXANDRE GUIMARÃES

RAFAEL FELIPE PAROLIN

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

CURITIBA

2024

**ANDREY ALEXANDRE GUIMARÃES
RAFAEL FELIPE PAROLIN**

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

Development of a low cost modular multimeter oscilloscope with wireless communication for laboratories at the Federal Technological University of 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.

Orientador: Prof. Dr. Juan Camilo Castellanos Rodriguez

Coorientador: Prof. Dr. Clóvis 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**

**DESENVOLVIMENTO DE UM OSCILOSCÓPIO MULTIMEDIDOR MODULAR
COM COMUNICAÇÃO SEM FIO DE BAIXO CUSTO PARA 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

Data de aprovação: 14/Junho/2024

Juan Camilo Castellanos Rodriguez
Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Nastasha Salame da Silva
Dr^a
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Clóvis Ronaldo da Costa Bento
Dr.
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 WiFi, 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, possibilitando, assim, 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, **porém, devido a dificuldades com o desenvolvimento e complexidade, não foi possível implementar a modularidade.** 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; wifi; laboratório; baixo-custo; ondas.

ABSTRACT

This 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 WiFi 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 develop and validate the prototype within the proposed voltage and current scales; however, due to difficulties with development and complexity, it was not possible to implement modularity. Thus, future development is necessary to enable the reading of more than one phase using replicas of the device.

Keywords: multimeter; wireless; lab; low-cost; waves.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de blocos do multimedidor trifásico oZm3	16
Figura 2 – Exemplo de um Diagrama de Blocos de um Multímetro de Bancada	16
Figura 3 – Fluke 28-II	17
Figura 4 – Gráfico de corrente de consumo de um dispositivo, feito pelo DMM7510 7.5 Digit Graphical Sampling Multimeter	17
Figura 5 – Dispositivo MMW03	18
Figura 6 – Exemplo de uso TVS Unidirecional	18
Figura 7 – Exemplo de uso TVS Bidirecional	19
Figura 8 – Ilustração da Classificação CAT	19
Figura 9 – Fluke 28-II PCB	21
Figura 10 – Switches de um Fluke 28-II	21
Figura 11 – AD202 um exemplo de amplificador isolador	22
Figura 12 – Bobina Rogowski aberta	23
Figura 13 – Diagrama de blocos de um ADC	24
Figura 14 – Diagrama de blocos de um ADC Flash	25
Figura 15 – Diagrama de blocos de um ADC SAR	26
Figura 16 – Plot sobre o tempo da saída de um ADC SAR	26
Figura 17 – Circuito de um comparador utilizando dois resistores como referência de tensão	28
Figura 18 – Família STM32 separada por função	30
Figura 19 – Interface WEB usada no 3Ph-ozm	31
Figura 20 – Módulo ESP32-WROOM-32D frente e verso	32
Figura 21 – Diagrama de Blocos de um Multímetro Portátil	32
Figura 22 – Diagrama de Blocos de um Multímetro de Bancada	33
Figura 23 – Diagrama de Blocos da Lógica de Funcionamento	37
Figura 24 – Entrada de Tensão e Corrente	38
Figura 25 – Condicionamento de sinais por divisor resistivo para leitura <i>Single-Ended</i>	39
Figura 26 – Condicionamento de sinais por divisor resistivo para leitura <i>Single- Ended</i>, menor range	41
Figura 27 – Condicionamento de sinais por divisor resistivo para leitura diferencial	41

Figura 28 – Circuito de condicionamento de sinais para tensão	42
Figura 29 – Circuito de condicionamento de sinais para corrente	43
Figura 30 – Simulação da resistência de Thevenin	44
Figura 31 – Simulação sem filtro passa-baixa para a corrente	44
Figura 32 – Simulação com filtro passa-baixa para a corrente	45
Figura 33 – Circuito de comunicação isolado	46
Figura 34 – Circuito de regulação de tensão	48
Figura 35 – Máquina de estados simplificada para apenas um dispositivo	49
Figura 36 – Detalhe do cabeçalho de informações da página da Web gerada pelo dispositivo	52
Figura 37 – Detalhe do gráfico da página da Web gerada pelo dispositivo	53
Figura 38 – Máquina de Estados Completa	54
Figura 39 – Módulo de Bancada	56
Figura 40 – Modelo virtual do encapsulamento	57
Figura 41 – Detalhes de suportes para PCB e periféricos	58
Figura 42 – <i>Setup</i> básico para testes.	59
Figura 43 – <i>Setup</i> básico para testes completo.	59
Figura 44 – Resistência do reostato.	60
Figura 45 – Leitura da rede - Osciloscópio.	60
Figura 46 – Leitura da tensão da rede - Multímetro.	61
Figura 47 – Leitura da corrente do circuito - Multímetro.	61
Figura 48 – Leitura da rede e circuito pelo protótipo - Ondas	61
Figura 49 – Leitura da rede e circuito pelo protótipo - Valores	62
Figura 50 – Gerador de funções - Sinal 200 mVpp.	62
Figura 51 – Leitura da onda de 200 mVpp - Osciloscópio	63
Figura 52 – Leitura da onda de 200 mVpp - Multímetro (valor RMS)	63
Figura 53 – Leitura da onda de 200 mVpp do protótipo - Onda	64
Figura 54 – Leitura da onda de 200 mVpp do protótipo - Valor	64
Figura 55 – Leitura da corrente de 217 μA - Multímetro.	65
Figura 56 – Leitura da corrente de 210 μA do protótipo - Onda.	66
Figura 57 – Leitura da corrente de 210 μA do protótipo - Valor.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 3 – Resolução e precisão necessárias para o dispositivo	35
Tabela 4 – Chart data	50
Tabela 5 – Tabela de multiplicadores de tensão	51
Tabela 6 – Tabela de multiplicadores de corrente	51
Tabela 7 – Tabela de multiplicadores de corrente	52
Tabela 8 – Lista de Materiais e Custos	55
Tabela 9 – Resultados.	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviaturas

amp-op Amplificador Operacional

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*

MUX Multiplexador

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*

WW *Wire Wound*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	TEMA	11
1.1.1	Delimitações do tema	11
1.2	PROBLEMA E PREMISSAS	12
1.3	OBJETIVOS	12
1.3.1	Objetivo Geral	12
1.3.2	Objetivos Específicos	13
1.4	JUSTIFICATIVA	13
1.5	METODOLOGIA DE PESQUISA	14
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Proteção de Entrada	17
2.1.1	ESD	18
2.1.2	Proteção Específica para Equipamentos de Medição de Sinais Elétricos	19
2.1.2.1	Proteção de Entrada para Circuitos de Corrente	20
2.1.2.2	Proteção de Entrada para Circuitos de Tensão	20
2.2	Condicionamento de Sinal e <i>Pathing</i>	21
2.3	Aquisição de Sinal	21
2.3.1	Resistor Shunt	22
2.3.2	Bobina Rogowski	23
2.3.3	Circuito Integrado de Medição (<i>hall effect</i>)	23
2.4	Conversor Analógico Digital	24
2.4.1	Flash ADC	25
2.4.2	SAR ADC	25
2.5	Referência de Tensão	26
2.6	Aviso de Entrada Incorreta (<i>Input Warning</i>)	27
2.6.1	Comparador para detecção de falhas	27
2.6.2	Tipos de aviso	27
2.6.3	Casos de extrema gravidade	28
2.7	MCU e Interface de Comunicação	29
2.7.1	Microcontroladores	29

2.7.1.1	<u>Microcontroladores Considerados</u>	29
2.7.2	Apresentação dos dados e Comunicação	31
2.7.3	Soluções completas	31
2.8	<i>Power Management</i>	32
2.9	Calibração	33
3	ESPECIFICAÇÕES E PREMISSAS ADOTADAS	35
3.1	Especificações	35
3.2	Premissas Adotadas	35
3.2.1	Hardware	36
3.2.2	Software e Firmware	36
4	MATERIAIS E METODOLOGIA	37
4.1	Metodologia	37
4.1.1	Círculo	37
4.1.2	Software e Firmware	47
4.1.2.1	<u>Disponibilidade do Círculo</u>	47
4.1.2.2	Firmware	48
4.1.2.3	Software	50
4.1.2.3.1	<i>Tensão e Corrente</i>	51
4.1.2.3.2	<i>Apresentação Visual</i>	52
4.1.2.4	Modularidade	52
4.2	Materiais	54
4.3	<i>Casing</i>	55
5	TESTES E RESULTADOS	59
6	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS	68
	GLOSSÁRIO	70

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 **Eletricidade e Magnetismo e Circuitos Elétricos**
A. Os laboratórios de tais disciplinas e algumas outras serão o ponto focal da utilização dos dispositivos neste trabalho desenvolvidos.

1.1.1 Delimitações do tema

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

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 através de um circuito acessório que os interconecta e, também, por software.

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.

1.2 PROBLEMA E PREMISSAS

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná - campus Curitiba, possui dois laboratórios de ensino para as disciplinas de **Eletrociadade e Magnetismo, Circuitos Elétricos 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, ~~em parte~~, 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 ~~em grande parte~~ por sua complexidade de reparos: tanto por necessitarem peças antigas para reposição, quanto por possuírem diversas peças mecânicas em seu interior que dificultam o processo de reparo, demandando muito tempo e realização de testes, como calibração posterior; além de não possuírem 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 adequem 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 sem fio 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-círcito e sobretensão. Tal equipamento também se comunicará com um smartphone por protocolo wireless para apresentar as formas de onda e dados obtidos das medições para ser utilizado nos laboratórios das disciplinas de Eletricidade e Magnetismo, Circuitos Elétricos A e B da UTFPR – câmpus Curitiba.

Para o desenvolvimento do multimedidor, são necessários os seguintes processos:

- 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;
- Desenvolver de um protótipo do multimedidor modular;
- 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, poderia facilitar o dia a dia dos usuários dos laboratórios de aulas práticas e tornar o ensino mais dinâmico e adequado à prática almejada, estendendo a experiência de ensino das disciplinas através do tratamento de dados de maneira mais específica e observação simultânea das formas de onda.

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.

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. Aplicar questionários sobre quais medições seriam mais importantes e quais proteções deveriam ser consideradas para os mesmos.

Será necessário desenvolver um sistema elétrico, mecânico (carcaça), software e 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.

Também sobre o equipamento, há de se pesquisar métodos de amostragem utilizados em produtos comerciais e aprofundar os conhecimentos sobre microcontroladores, componentes e plataformas de desenvolvimento escolhidos.

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 sem fio. Considerando essa proposta, foram analisadas duas opções para servir como base: um multimedidor e um multímetro. 

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, com resolução na ordem de 1V nos modelos mais baratos e 0,1V nos modelos mais caros, sendo os mesmos valores 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 pode chegar a 0,1 mV, enquanto a resolução da corrente é da ordem de 1 μ A (MINIPA, 2013). 

Considerando que o dispositivo deve ser utilizado como uma ferramenta didática em sala de aula, é essencial que a resolução seja adequada para o bom aproveitamento das disciplinas. Além disso, a apresentação das formas de onda também é relevante. Assim, optou-se por uma abordagem que combina características de ambos os dispositivos, utilizando os diagramas de blocos para identificar as funcionalidades e suas relações com o dispositivo a ser produzido.

Para o multimedidor, foi utilizado o diagrama de blocos do *oZm3* (Figura 1), um produto *open source* (projeto aberto) já introduzido no mercado, sendo uma versão trifásica de outro, também *open source* chamado (*openZmeter*). Ambos possuem interface de apresentação dos dados via uma página do navegador de um celular ou computador.

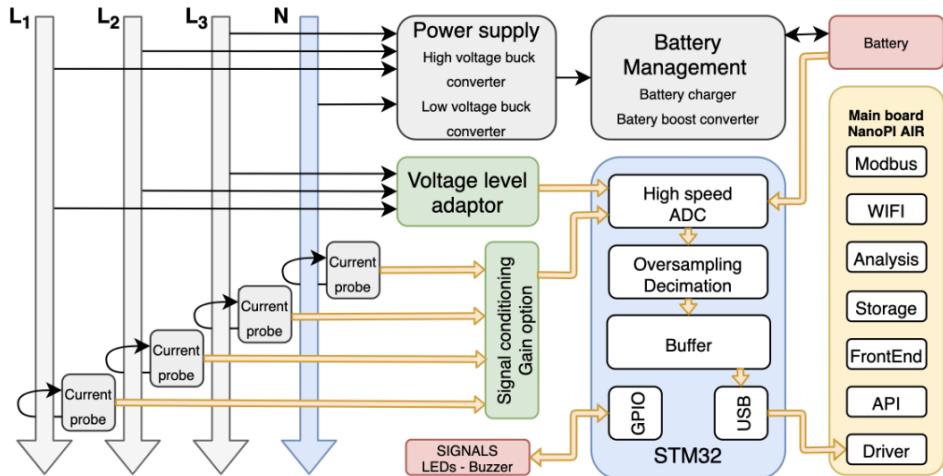
Para o multímetro, foi utilizado um diagrama de blocos (Figura 2) disponível no site da *Texas Instruments*, que explica o funcionamento de um produto completo.

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

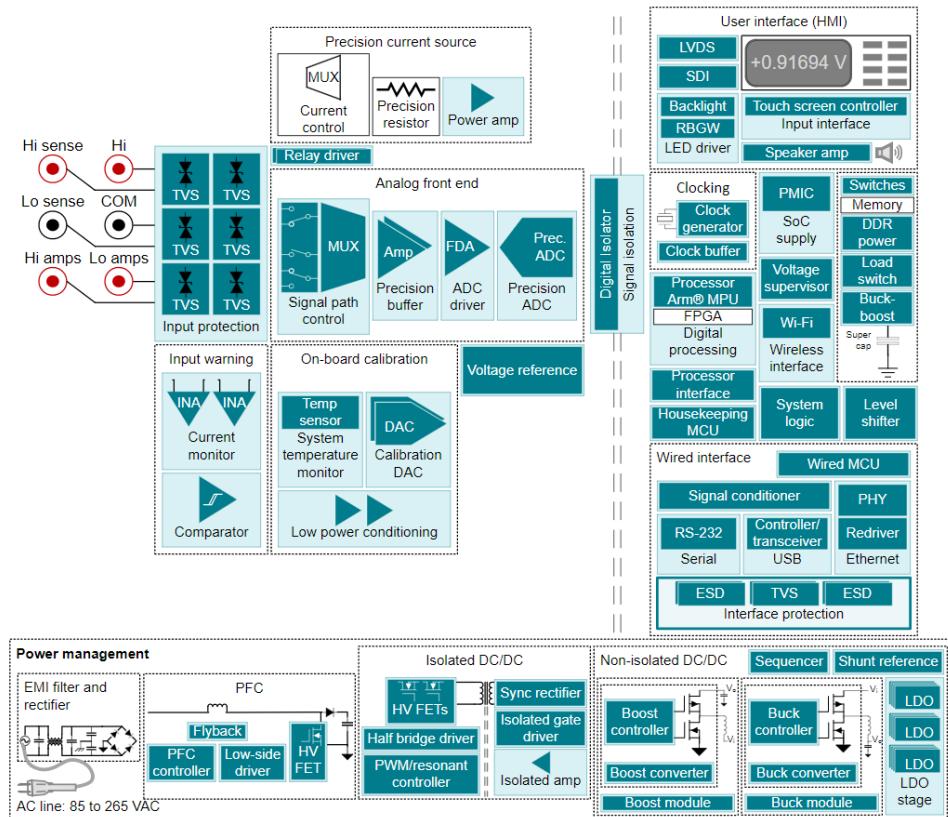
Sobre multímetros digitais, também existem aqueles que são de bancada ou *bench-top*. Tais dispositivos são de uso mais específico, prezando a precisão de leitura, resolução e

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).

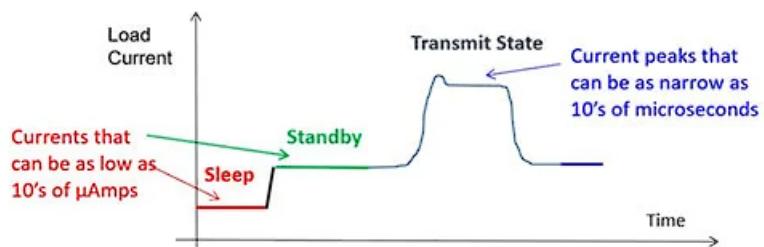
também contendo algumas *features* a mais. Como exemplo, o DMM7510 7.5 Digit Graphical Sampling Multimeter da Tektronix é um dispositivo que porta todas as funções já explícitas e também várias outras de uso extremamente específico, como *profiling* de corrente de consumo de energia em dispositivos IoT (*Internet of Things*), como mostrado na Figura 4.

Figura 3 – Fluke 28-II



Fonte: (FLUKE, 2023).

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



Fonte: tektDMM.

No caso de multimedidores, que são somente de uso específico industrial, alguns fornecedores e dispositivos se sobressaem, como a WEG. O dispositivo da Figura 5, ~~por exemplo~~, é um multimedidor da família MMW, fornecido pela mesma, ~~que faz 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.

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 ~~a~~ 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. No-

Figura 5 – Dispositivo MMW03



Fonte: WEG.

teriormente, 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

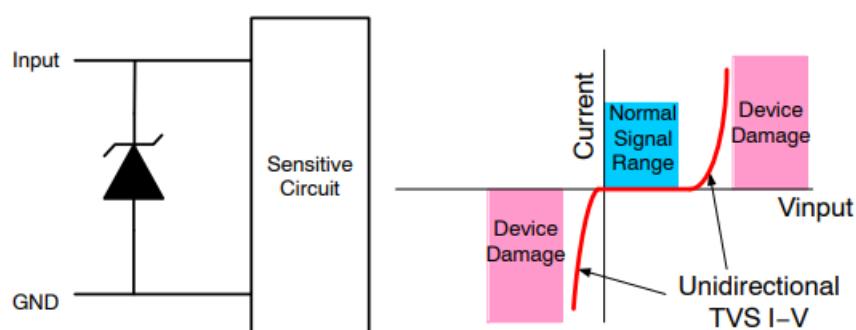
Esse tipo de proteção é necessária para circuitos que fazem interface com o meio físico e normalmente é exercida por um circuito básico de componentes TVS (*Transient Voltage Suppressor*). Os dispositivos semicondutores mais simples (e também regularmente) utilizados para exercer esta função são diodos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

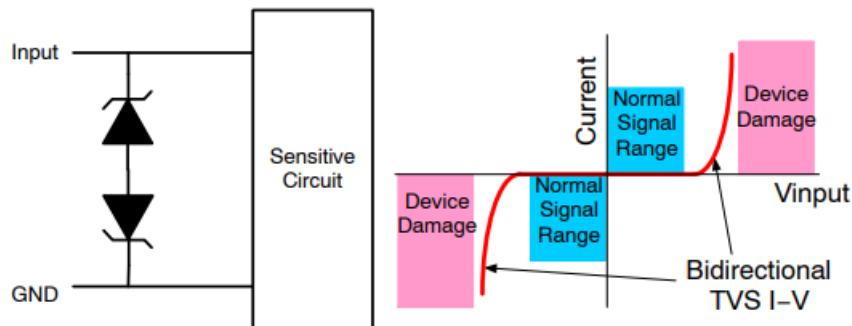
AND8424/D



Fonte: (ONSEMICONDUCTOR, 2009).

Figura 7 – Exemplo de uso TVS Bidirecional

AND8424/D



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, 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, $0R01\ \Omega$, entre o ground 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 ground, 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 $1\ \Omega$ com o shunt do range de A ($0R01\ \Omega$), para ser feita a medição em uma resistência aproximada de $1\ \Omega$.

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

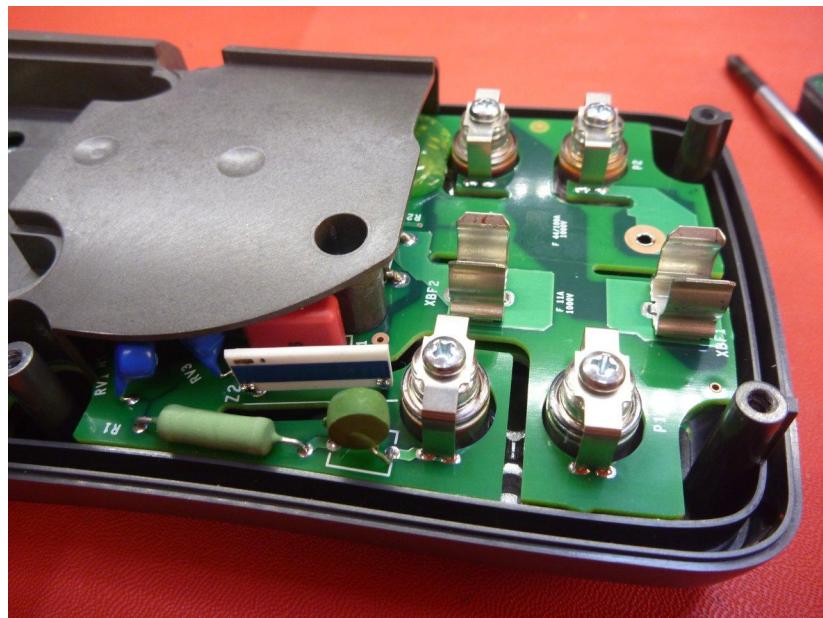
2.1.2.2 Proteção de Entrada para Circuitos de Tensão

O circuito de proteção para a entrada de tensão é simples, sendo este composto de **um resistor WW (Wire Wound)** em série com um termistor PTC (*Positive Temperature Coefficient*) em série com um resistor de $10\ M\Omega$, no qual será feita a medida (FLUKE, 1998).

Conectado em paralelo ao resistor de $10\ M\Omega$ com o ground input, há uma série de varistores MOV (*Metal Oxide Varistor*) de rápida atuação como proteção para transientes de sobre-tensão, **até que o termistor consiga esquentar**. Pode ser utilizado somente um varistor, mas uma série destes aumenta a distância de fuga de corrente, reduzindo a chance de arcos voltaicos e também dissipando energia entre vários componentes, melhorando a proteção (EEVBLOG, 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 de Sinal e *Pathing*

O condicionamento de sinal se resume ao controle da entrada apropriada a ser avaliada pelo ADC, que geralmente é feita por um MUX (Multiplexador), por switches mecânicos, como exemplificado na Figura 10, ou em alguns casos, por uma combinação dos dois (INFO, 2023a).

Figura 10 – Switches de um Fluke 28-II



Fonte: (MJLORTON, 2012).

2.3 Aquisição de Sinal



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.

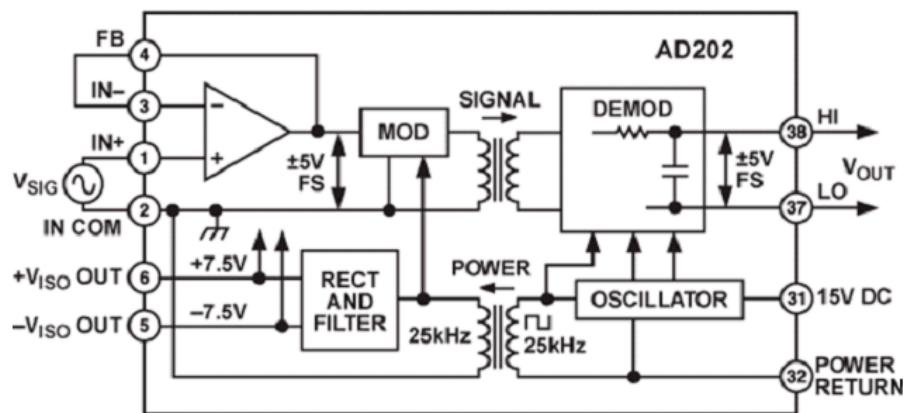
Essa pode ser realizada de diferentes maneiras, dependendo do caso. Em alguns cenários, utiliza-se sondas específicas para cada aplicação, as quais permitem capturar e registrar os parâmetros elétricos de forma precisa. Por outro lado, em certos casos, a aquisição ocorre internamente dentro do circuito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

2.3.1 Resistor Shunt

Neste tipo de medição, um resistor de valor extremamente **baixo** ($< 0,1 \Omega$) 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 — amplificadores 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.

2.3.2 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.

Figura 12 – Bobina Rogowski aberta



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

É um método amplamente utilizado para medições de **altas correntes** 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).

2.3.3 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. **Uma tensão proporcional a esse campo é fornecida pelo CI como saída e pode ser medida por um ADC, recuperando-se o valor da corrente original.**

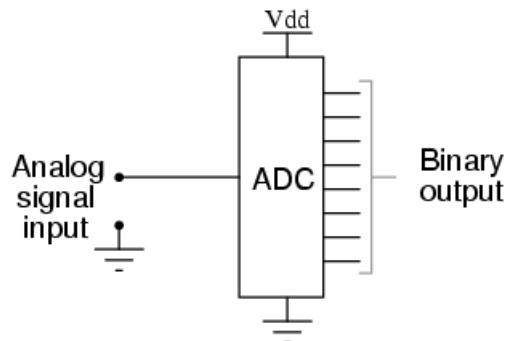
O uso dessa tecnologia traz custo baixo em relação ao uso de TC's ou bobinas Rogowski, fácil implementação no sistema, isolamento diretamente no chip. Tal medição, porém, possui uma resolução na ordem de 100 mV/A (considerando um CI que suporte acima de 10 A) e um ruído intrínseco de 11 mV. Como é o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

2.4 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.

Figura 13 – Diagrama de blocos de um ADC



Fonte: (KUPHALDT, 2021).

Existem vários tipos de ADCs, sendo alguns deles:

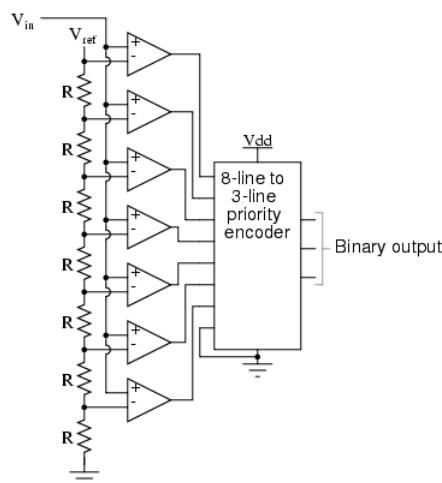
- *Flash ADC*;
- *Digital Ramp ADC*;
- *Successive Approximation ADC*;
- *Tracking ADC*;
- *Slope (integrating) ADC*;
- *Delta-Sigma ($\Delta \Sigma$) ADC*;
- entre outros...

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.

2.4.1 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. A saída destes comparadores são conectadas à 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 *output* de qualquer ADC moderno.

Figura 14 – Diagrama de blocos de um ADC Flash



Fonte: (KUPHALDT, 2021).

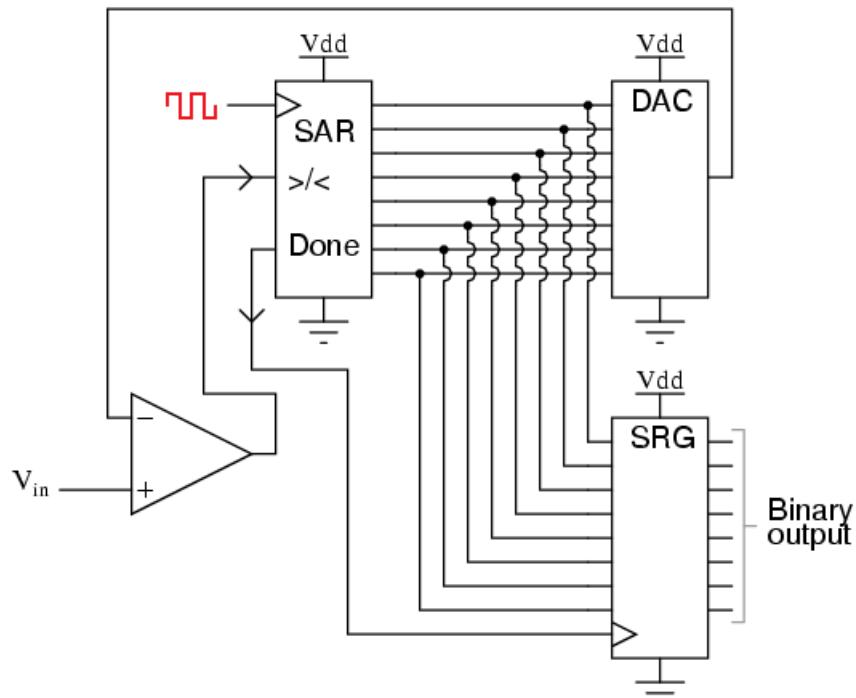
2.4.2 SAR ADC

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.

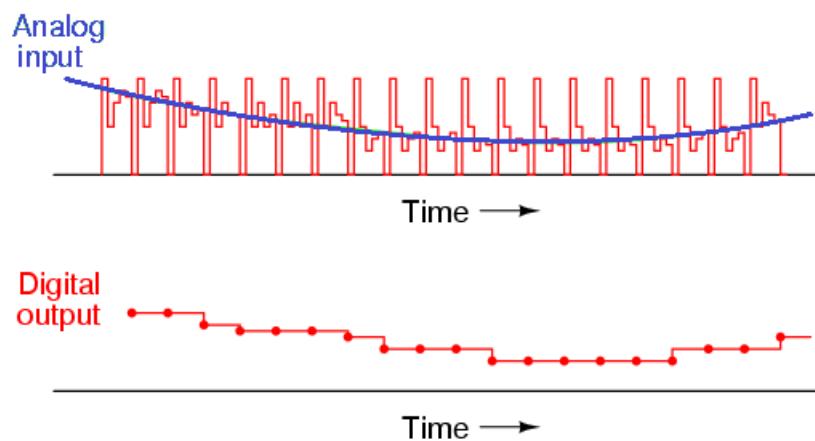
O circuito e resultado de leitura do ADC em questão, em termos simples, pode ser representado pelas figuras 15 e 16.

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 Referência de Tensão



A referência de tensão do ADC, utilizada para a leitura do sinal analógico, pode estar incluída no chip, que é uma solução mais barata e de menor precisão para equipamentos que não exigem tal afinidade, ou ser externa ao chip, que provém uma melhor precisão e, consequentemente, uma melhor leitura. Tal referência externa, hodiernamente, é feita por um CI (Circuito Integrado).

Integrado) especializado, como por exemplo o ICL8069 (MAXIM, 2005), ~~visto sendo utilizado no estado da arte.~~

2.6 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 confiabilidade dos dados de medição. Pode ser uma condição fora dos limites esperados, como valores de tensão ou corrente que ultrapassam os limites especificados pelo instrumento de medição (STAFF, 2015).

Em medições de tensão e corrente em um único canal, um aviso de entrada incorreta pode ocorrer quando os valores medidos excedem os limites estabelecidos pelo instrumento. Por exemplo, se a tensão medida estiver além da faixa de operação máxima, o aviso é acionado para indicar que a medição está fora dos limites aceitáveis.

Em medições com vários canais, o *input warning* pode ser diferenciado dependendo da configuração do sistema de aquisição de dados. Pode haver avisos específicos para cada canal, indicando problemas individuais, como tensão excessiva ou corrente anormalmente alta. Alternativamente, pode haver um aviso global indicando um problema geral em qualquer um dos canais.

2.6.1 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 estão acima do limite suportado. O circuito pode ser visto na Figura 17 e consiste apenas em um amp-op.

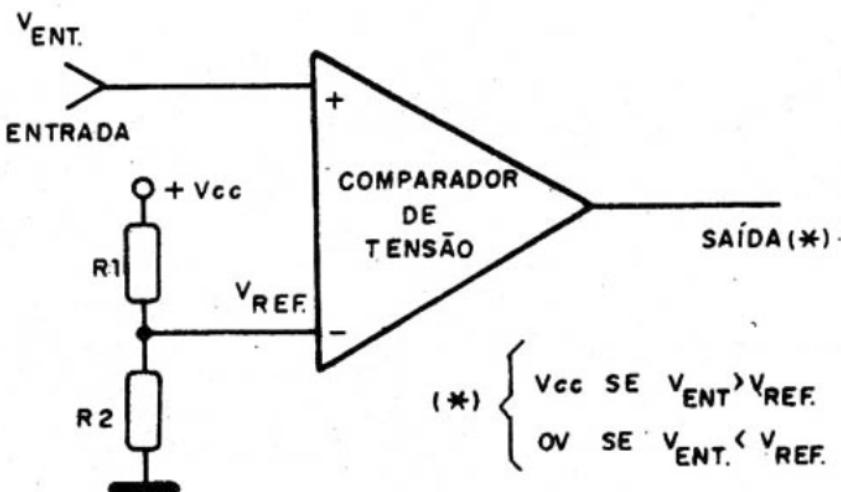
Dessa maneira, uma vez definida a tensão de referência, pode-se utilizar-se da saída para disparar algum tipo de aviso.

2.6.2 Tipos de aviso

Os avisos podem ser luminosos, sonoros, ou até mesmo gerar vibrações ou movimentações mecânica mais rigorosas a fim de afastar ou notificar o usuário do dispositivo (STAFF, 2015).

Para tanto, em casos mais brandos — onde há o uso da escala incorreta do medidor — pode-se utilizar uma luz de aviso. Dado que esse uso não danifica o dispositivo, apenas impossibilita a leitura correta do dado. Em casos mais sérios, onde há a possibilidade de causar

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



Fonte: (BRAGA, 2017).

dano ao aparelho de medição ou até mesmo ao usuário, se faz necessário um aviso mais severo, como, por exemplo, uma sirene **alta**.

2.6.3 Casos de extrema gravidade

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 2.3.1. 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.

2.7 MCU e Interface de Comunicação



2.7.1 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 WiFi 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).

2.7.1.1 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:

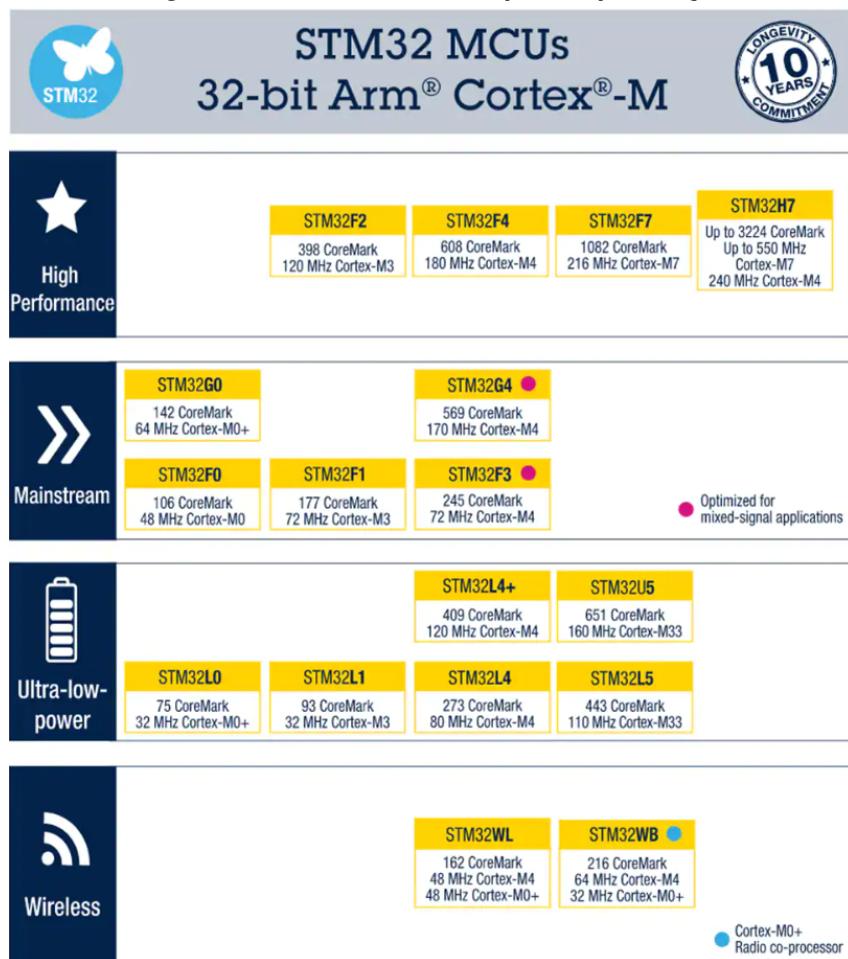
- Popularidade — um item popularmente conhecido pode ser encontrado com maior facilidade em lojas locais;
- Facilidade de programação — como um dos objetivos primordiais do projeto é a replicabilidade e a disponibilização por meios *open source*, a simplicidade na programação deve ser levada em conta;
- 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 Wifi, I²C, UART ou demais protocolos de comunicação já embarcados auxiliariam no processo de transmissão e tratamento dos dados obtidos.

Seguindo 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, uma vez que 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.

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 Wifi e/ou Bluetooth.

2.7.2 Apresentação dos dados e Comunicação

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

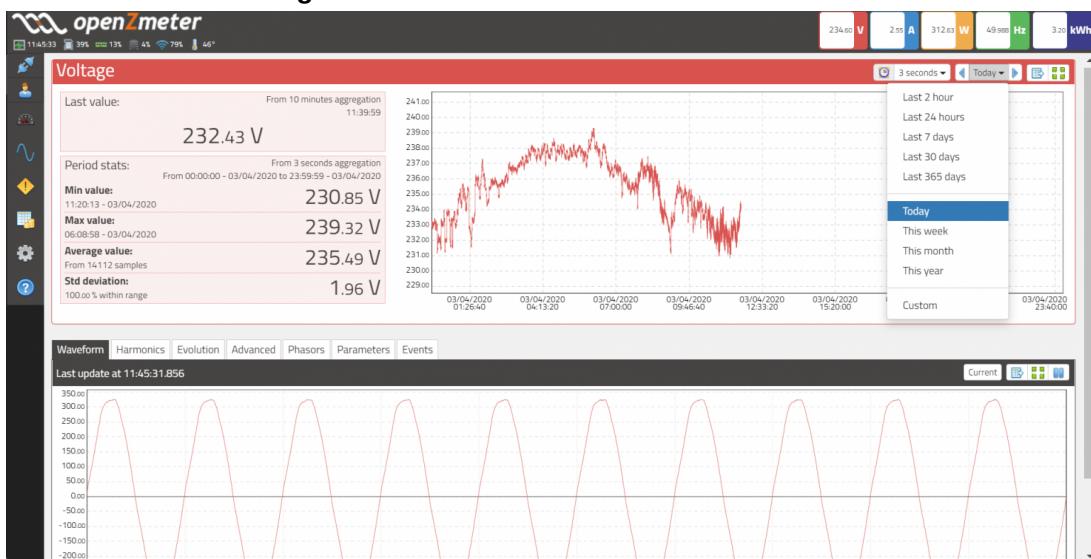
A mais simples delas trata-se de um display que apresenta os valores da leitura ao usuário. Este pode utilizar a tecnologia de LCD ou semelhantes para mostrar apenas números, como também pode mostrar as formas de onda em telas que possuam uma resolução maior.

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 sem fio — que serão 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 (Internet das Coisas) como LoRa, Sigfox e NB-IoT. Também é possível utilizar tecnologias mais populares, como é o caso do Viciana *et al.* (2023) que utiliza WiFi 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/.

2.7.3 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 DAC's. O principal diferencial desse módulo, porém, é a sua capacidade de trabalhar com WiFi 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

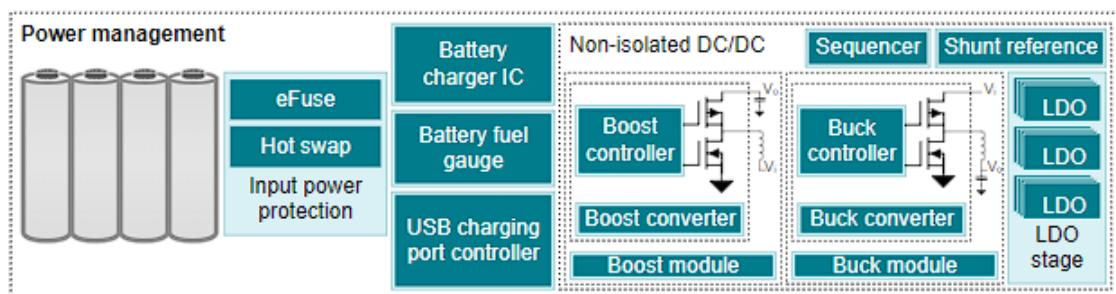


Fonte: DigiKey.

2.8 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.

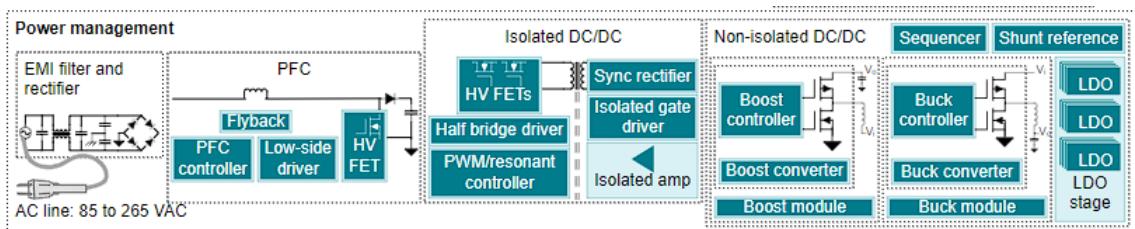
Figura 21 – Diagrama de Blocos de um Multímetro Portátil



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.

Figura 22 – Diagrama de Blocos de um Multímetro de Bancada



Fonte: (INSTRUMENTS, 2022).

2.9 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 μ V 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 **Eletricidade e Magnetismo**, **Circuitos A** e **Circuitos 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%

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 *WiFi*.

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* (*Printed Circuit Board*) 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.

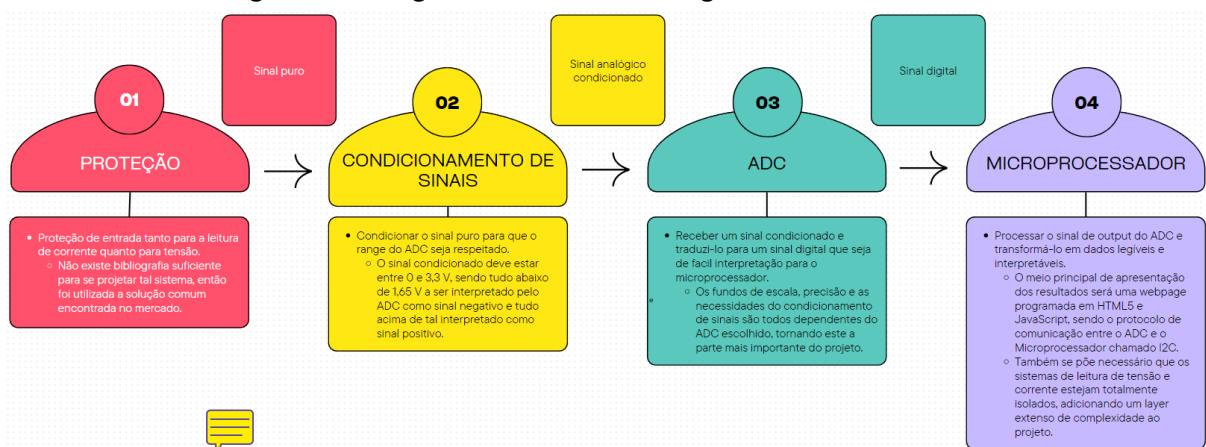
4.1 Metodologia

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. Este foi feito para guiar a lógica de design e também para explicar sucintamente o que cada parte do sistema comprehende.

Figura 23 – Diagrama de Blocos da Lógica de Funcionamento



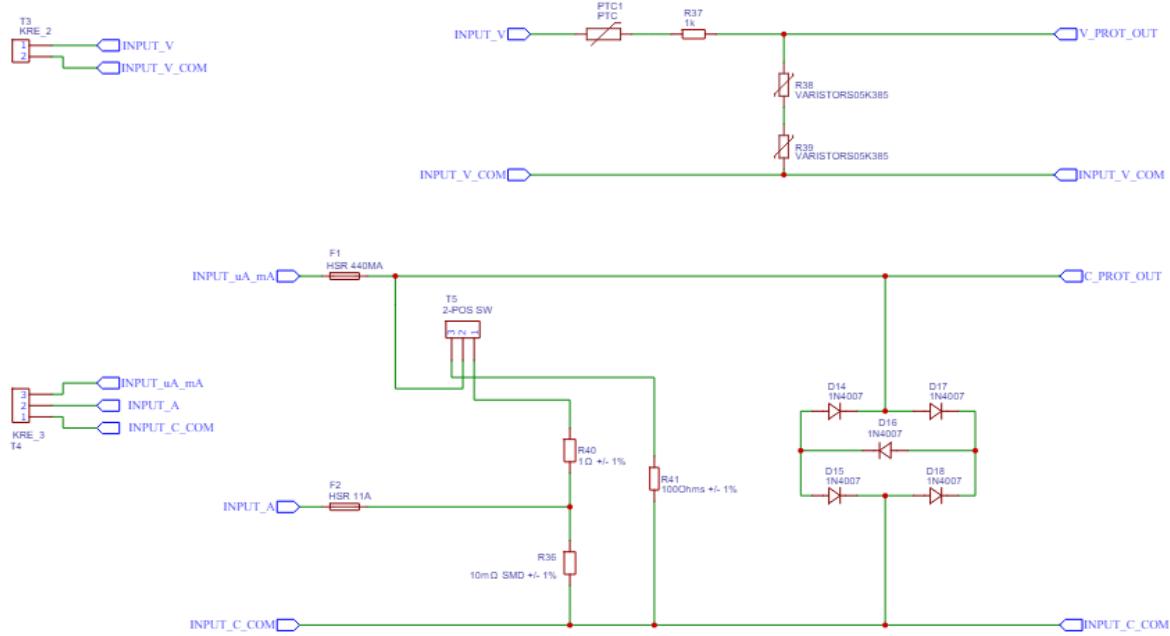
Fonte: Autoria própria (2024).

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, 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 entre a entrada e o ground do circuito enquanto o resistor está sendo ativado.

Para a proteção de corrente, primeiramente se é colocado fusíveis HRC, que são fusíveis especiais para a extinção de qualquer possível arco voltaico decorrente da queima do filamento

interno deste, prevenindo assim qualquer continuidade após a atuação deste. A ponte de diodos logo em seguida dos resistores shunt atua como um clamp de tensão para limitar esta caso ultrapasse de valores desejados e também como um caminho para a corrente, caso esta não seja o suficiente para queimar os fusíveis, mas sim para queimar o circuito. Estes componentes e sua montagem se encontram discretizados na Figura 24

**Figura 24 – Entrada de Tensão e Corrente
OSCILOBOY PROTECTION**



Fonte: Autoria própria (2024).

Nesta figura também, pode-se observar as entradas do circuito, sendo a entrada de tensão diretamente ligada à próxima parte do circuito, sendo esta o condicionamento de sinais de tensão e a entrada de corrente composta por resistores, que servem como shunt para a leitura de 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 $1\text{ }\Omega$ compõe a leitura da entrada de mA e o resistor de $100\text{ }\Omega$ para a leitura de μA . Para alternar entre as entradas de mA/ μA e A, foi colocado um **switch**, discretizando-as.

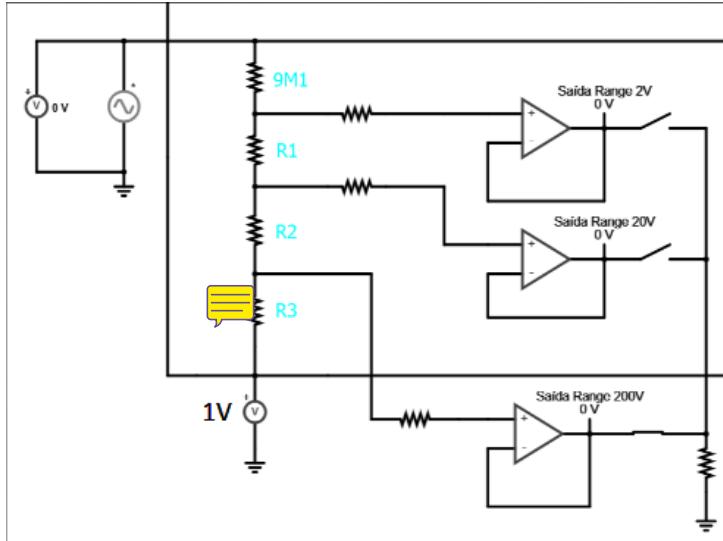
Para se obter um sinal que o ADC consiga interpretar e também seja seguro para não queimá-lo, é de suma importância que este seja condicionado para tal, entrando na proxima parte do circuito, os condicionadores de tensão.

Existem duas possibilidades para a leitura de um sinal que ADCs conseguem fazer: leitura "Diferencial" e leitura "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 *ground*. Para fazer tal leitura com dife-

rentes *ranges*, o que é de grande importância para se alcançar uma precisão boa, 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 (com precisão de 2%) e 10 A, 200 mA, 20 mA e 2000 μ A (com precisão de 5%). 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. O cálculo para tais resistores se resume na resolução do seguinte sistema:

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

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, tornando desnecessário a construção de uma referência no circuito, tornando-o menos complexo, além de ser 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, ou SPS, o que prejudicaria a leitura até de frequência 60 Hz, finalmente 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 SPS de 3300, possibilitando assim uma reconstrução mais fiel da onda a ser lida, possuindo, como o ADS1115, uma referência interna de tensão e 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 tais parâmetros, nota-se que o condicionamento de sinal é inadequado, necessitando de mais componentes e circuitos auxiliares para exercer sua função adequadamente. Limitando-se a tensão de entrada a um range entre -1 e 1 V e adicionando um offset de tensão de 1 V para possibilitar a leitura de tensões negativas, se é imposto então que sinais entre 0 e 1 V serão interpretados como negativos e sinais entre 1 e 2 V a serem interpretados como positivos.

Para a leitura *Single-Ended*, após o divisor resistivo e seu primeiro buffer, põe-se necessário, primeiramente, fazer uma inversão do sinal de output do amp-op, pois este inverte o sinal  de entrada na saída, colocando em cascata um amp op. Para estes componentes conseguirem também suportar tensões negativas em sua entrada, é de grande importância que a sua alimentação seja simétrica. Isto acarreta na necessidade da utilização de mais um circuito auxiliar que possibilite a entrega desta tensão negativa, chamado *Negative Charge Pump*.

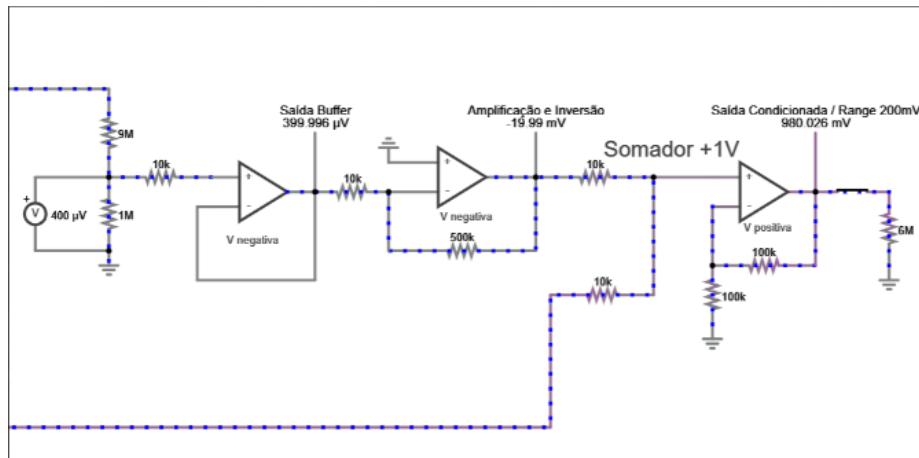
Segundo, se é necessário também que a tensão de offset proposta seja de extrema precisão para introduzir o mínimo de erro possível ao sinal de leitura. Existem CIs que exercem esta função com a precisão necessária, porém estes são extremamente caros.

Finalmente, para o menor range de tensão, seria necessária a aplicação de mais um amp-op em cascata para a amplificação do sinal, pois este ficaria fora do range do bit menos significativo do ADC, tornando o circuito de condicionamento de sinais algo como mostrado na Figura 26.

 Cada amp-op possui um *drift* de saída, o que introduz ainda mais erro à leitura do ADC, além de como se é necessária uma amplificação de sinal final, quaisquer ruídos introduzidos serão também amplificados. Com todos estes problemas compostos, tomou-se a decisão de fazer a leitura por modo diferencial, que é a outra opção de leitura nativa ao ADC escolhido.

 Este tipo de leitura, ao invés de comparar a tensão entre um ponto do circuito e o *ground*, 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 refe-

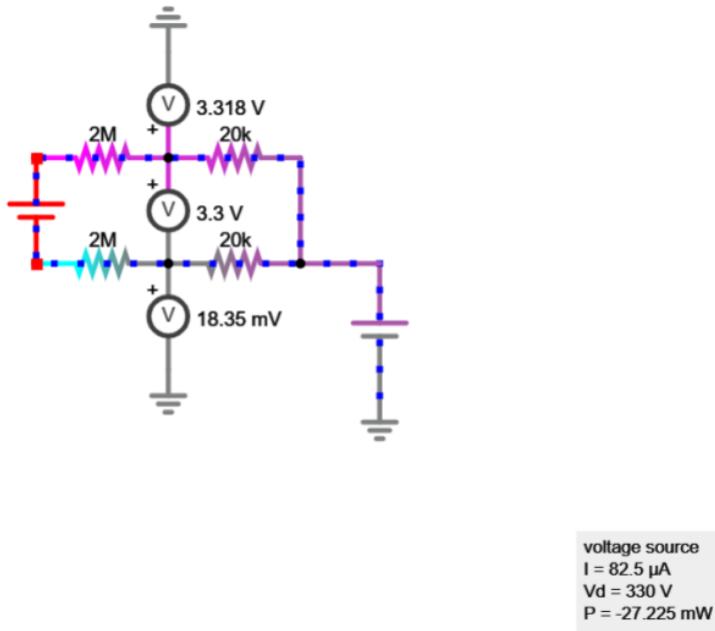
Figura 26 – Condicionamento de sinais por divisor resistivo para leitura Single-Ended, menor range



Fonte: Autoria própria (2024).

rência, 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).

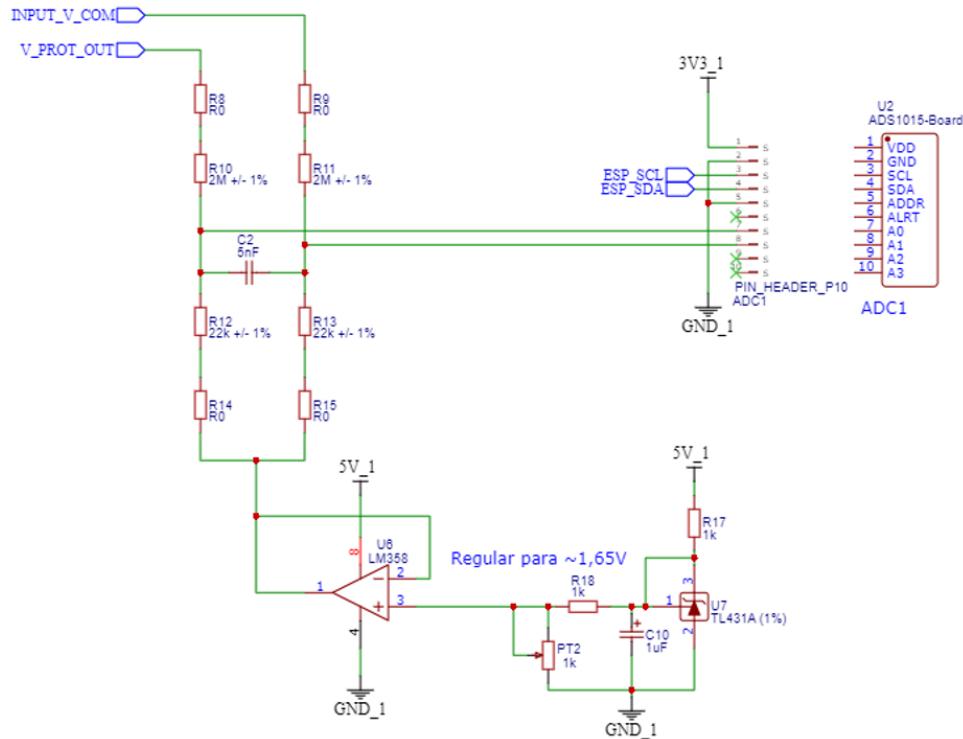
Para o dimensionamento dos resistores desta topologia, considerando a necessidade da atenuação da tensão em aproximadamente 100 vezes, pois um sinal de 330 V (o pico máximo suportado pelo sistema) deve ser condicionado a no máximo 3,3 V. Considerando o divisor resistivo, para tal, também se necessita uma relação de aproximadamente 100 vezes entre os resistores. Para se ter uma corrente mínima de entrada, foi escolhido um resistor de $2\text{M}\Omega$, tornando assim o segundo valor $20\text{k}\Omega$.

Para o offset de tensão, como os erros introduzidos são minimizados pela própria topologia, utiliza-se uma referência 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 mais facilmente a utilização do range inteiro de leitura do ADC, tornando assim o offset $3,3/2$, 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

CONDIC / LEITURA TENSÃO

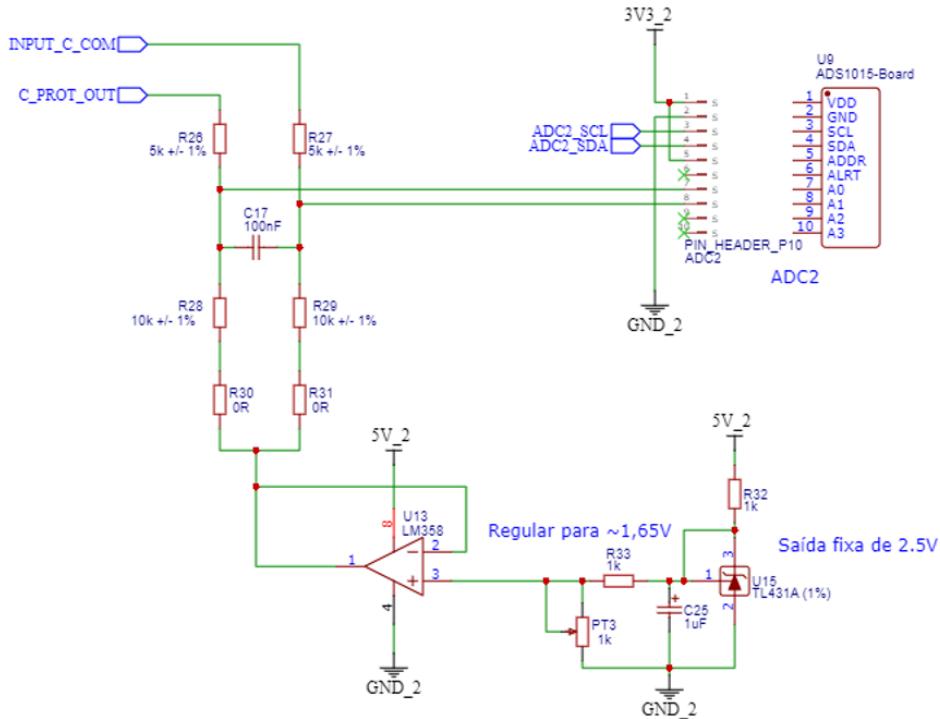


Fonte: Autoria própria (2024).

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:

Figura 29 – Circuito de condicionamento de sinais para corrente

CONDIC / LEITURA CORRENTE



Fonte: Autoria própria (2024).

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

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

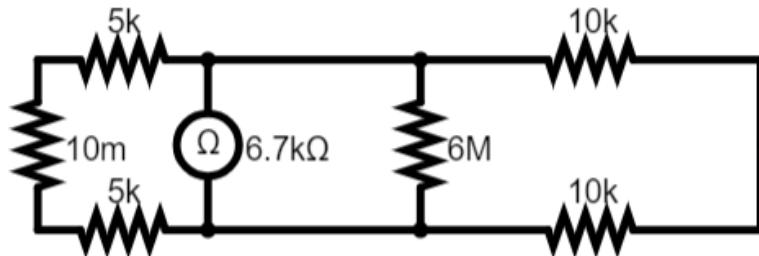
Para o cálculo deste filtro, precisa-se encontrar o R equivalente nos nós do capacitor. Para tanto, utiliza-se o teorema de Thevenin (considerando todas as fontes de corrente como circuito aberto e fontes de tensão como curto), como é possível verificar substituindo o capacitor por um ohmímetro na Figura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

Utilizando a fórmula, para o caso da entrada de corrente e considerando dois resistores de 5 kΩ (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 simulações representadas nas figuras 31 e 32. O sinal encontrado no resistor de 6 MΩ representa a entrada do ADC.

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

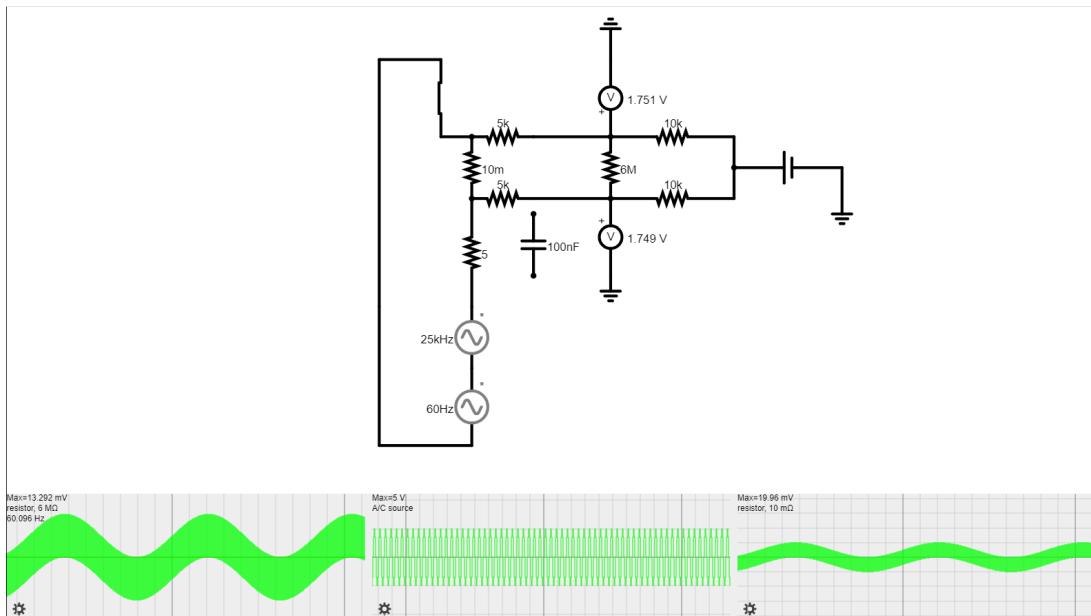
Após a leitura dos sinais e a conversão feita pelo ADC, o sinal digital de saída é processado por um microcontrolador para então ser entregue a uma webpage e assim tratado para visualização pelo usuário. Algumas necessidades básicas devem ser atendidas pelo chip es-

Figura 30 – Simulação da resistência de Thevenin



Fonte: Autoria própria (2024).

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

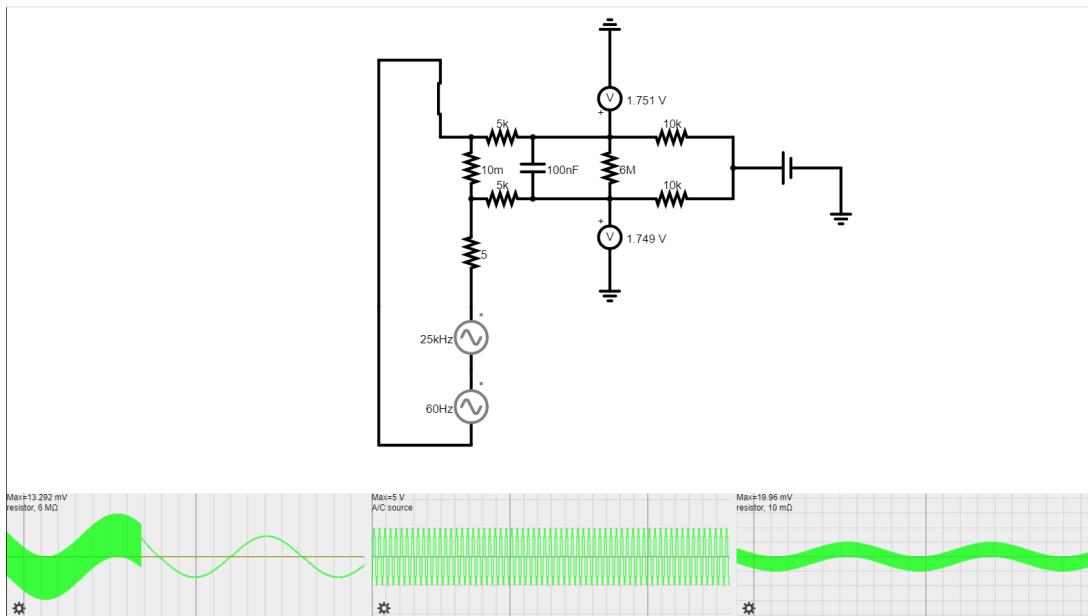


Fonte: Autoria própria (2024).

colhido, como suporte para comunicação *wireless*, seja *WiFi* ou *Bluetooth*, *clock speed* alta o suficiente para não interferir na aquisição de dados e também ter uma boa documentação para ser possível o desenvolvimento do código.

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

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



Fonte: Autoria própria (2024).

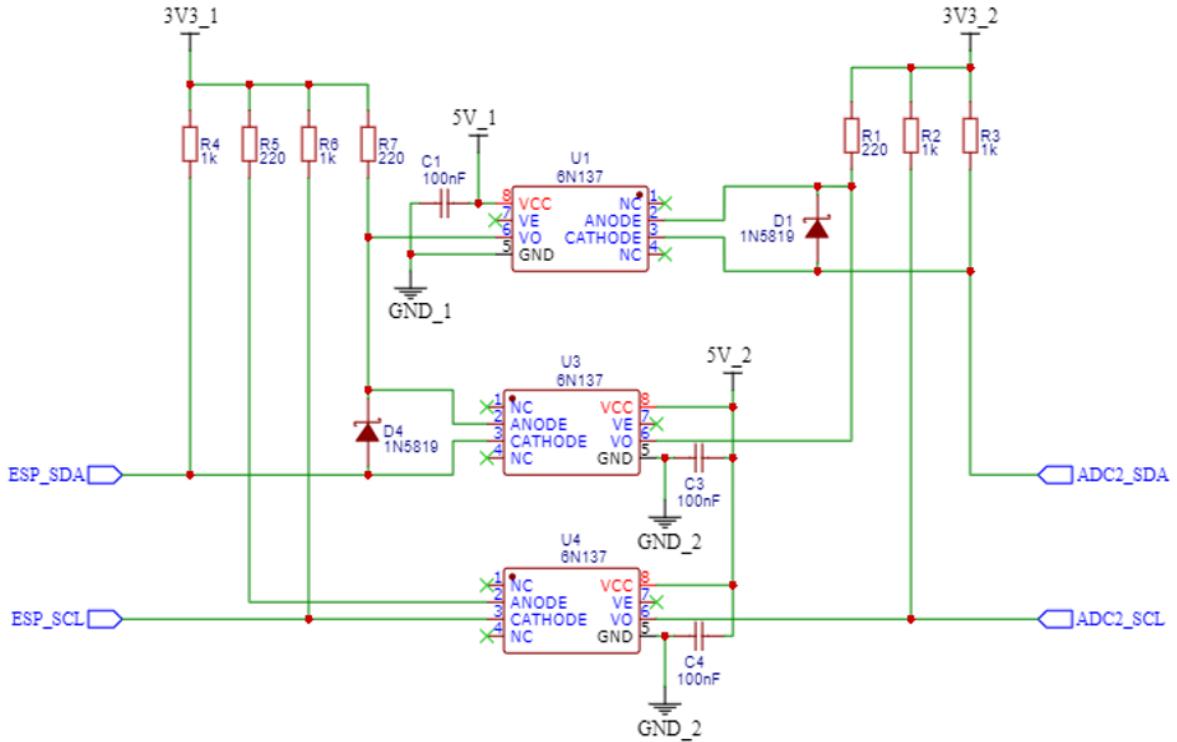
- Performance: O ESP32 opera em *clock speeds* de até 240 MHz, oferecendo um robusto poder de processamento para o código e também para não interferir ou atrasar a aquisição dos sinais;
- Suporte: Este microcontrolador tem suporte tanto para *WiFi* quanto para *Bluetooth*, trabalha com o protocolo *I²C*, 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 importante 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.

Para ter uma comunicação **confiável entre os dois ADCs conectados a fontes diferentes e o ESP32**, é necessário o isolamento entre estes, evitando-se ruídos indesejados. Para isso, foi utilizado um circuito de comunicação isolada por *optocouplers*, como demonstrado na Figura 33.

O circuito transforma pulsos *I²C* em sinais de luz e transfere estas informações para o outro circuito isolado, desacoplando estes. Para o correto funcionamento do circuito, devido a

Figura 33 – Circuito de comunicação isolado

COMUNICAÇÃO ÓPTICA - ADC2



Fonte: Autoria própria (2024).

limitações técnicas dos *optocouplers* escolhidos, é necessária a inserção de uma linha de 5 V para a alimentação do CI, bem como o uso de uma linha de 3,3 V para a ativação dos LEDs internos deste chip, bem como o potencial de *pull-up* para as linhas de comunicação I^2C .

Como objetivo do trabalho, também é colocado como principal a modularidade do circuito, para se obter leituras de duas ou três fases diferentes. Inicialmente, foi considerado o uso do protocolo I^2C também para a comunicação entre estes módulos. Porém, esta idéia foi descartada devido à complexidade de criação de um protocolo, ou dicionário, para estabelecer um modo comum de interação.

Também, para o demérito da utilização de tal topologia, são necessários muitos fios de interligação entre os módulos, sendo estes:

- 5 V;
- 3,3 V;
- SDA;
- SCL e
- *ground*.

Por estes dois grandes motivos e também por existirem alternativas mais simples, chegou-se a conclusão de que a utilização do protocolo *ESP-NOW*, desenvolvido pela própria Espressif, para facilitar a comunicação entre chips desta que possuem *WiFi*. Desta maneira, serão necessários somente 2 fios entre módulos, para o envio de um sinal de sincronização. Todo o restante da comunicação inicial é feito através deste protocolo.

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, mas 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 curtos.

Porém, o **output** 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 34. 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 **convencionada** por especificação de projeto, para **se** manter um padrão e também suprir as necessidades de cada.

4.1.2 Software e Firmware

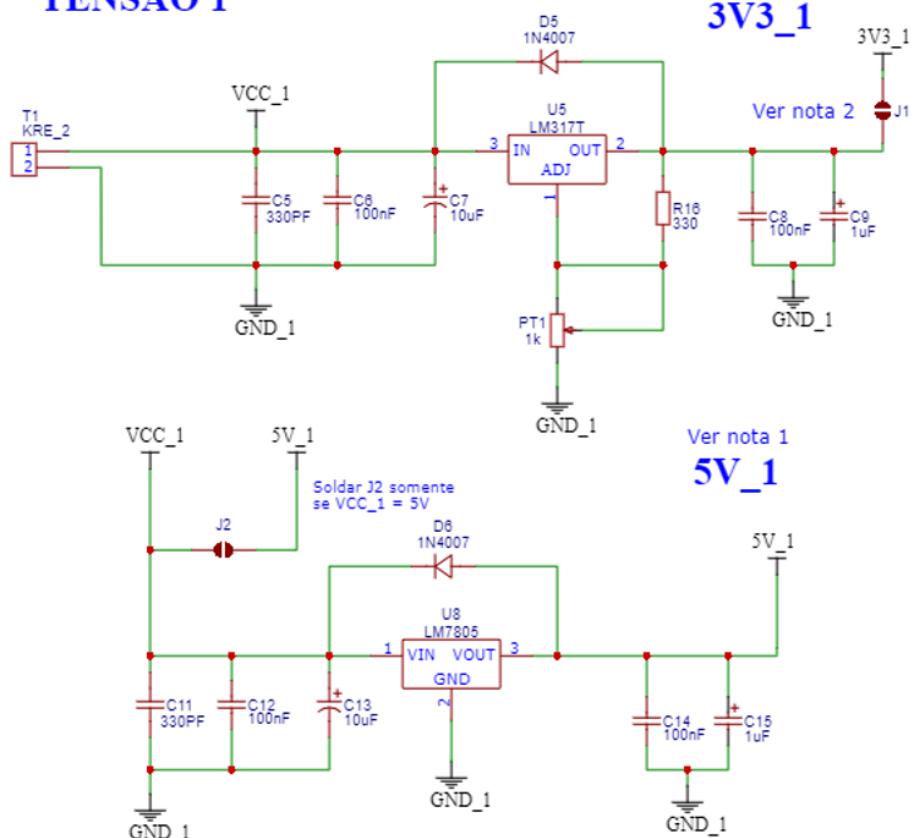
A programação do dispositivo é separada em duas etapas: *Firmware* e *Software*. O *Firmware* é responsável por garantir a funcionalidade da comunicação do microcontrolador com os módulos ADC, bem como manter a comunicação sem fio e sincronizar a amostragem do sinal. Já o *Software*, é responsável por 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 Disponibilidade do Circuito

O circuito pode ser encontrado na íntegra no **[ANEXO X]** ao final do trabalho, bem 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.

Figura 34 – Circuito de regulação de tensão

CONVERSÃO DE TENSÃO 1



Fonte: Autoria própria (2024).

4.1.2.2 Firmware

O *Firmware* é a parte crítica que roda diretamente no microcontrolador ESP32 e é responsável pela interface com os sensores, controle de comunicação sem fio 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.

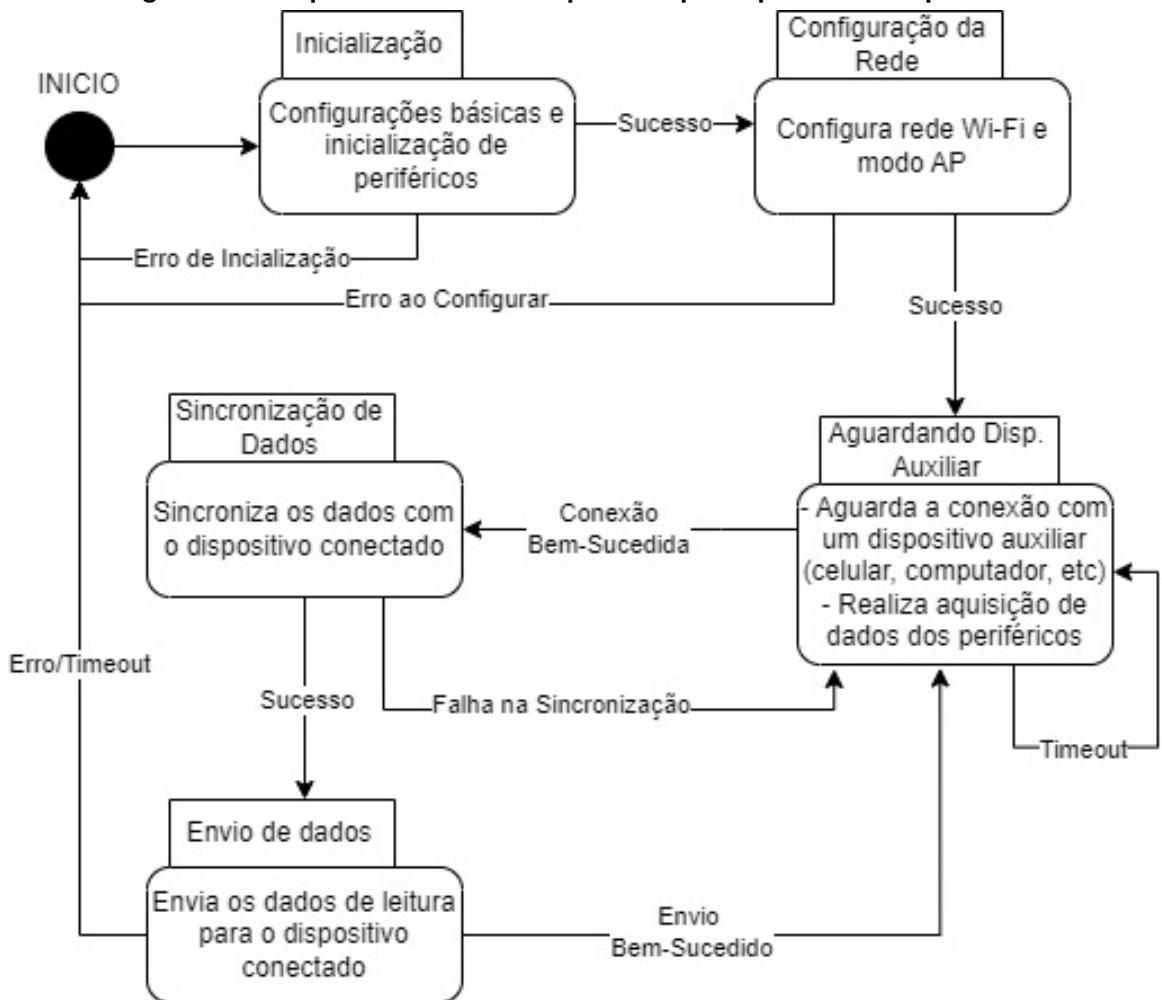
O desenvolvimento do *Firmware* foi baseado em bibliotecas otimizadas para o ESP32, como a *ESPAsyncWebServer* e a *WebSocketsServer*, que permitem uma comunicação eficiente com o dispositivo remoto (celular ou computador). Além disso, foi utilizada a biblioteca *ADS1015_WE* para interface com o ADC 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 **Figura 35**, que gerencia a comunicação com o dispositivo auxiliar. A implementação foi feita para ser expansível, permitindo a futura integração de múltiplos dispositivos sem a necessidade de grandes modificações no código.

Figura 35 – Máquina de estados simplificada para apenas um dispositivo



Fonte: Autoria própria (2024).

O processo de comunicação sem fio utiliza o protocolo *WiFi* 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), a criação de um delta de tempo para estabelecer um ponto de referência zero, o que 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, opera em dois modos de leitura: *Data-Ready* e *Single-Shot*.

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 de implementar. Nesse modo, após cada leitura, o ADC sinaliza ao microcontrolador levantando uma *flag* (por exemplo, elevando um pino específico para 1) 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

4.1.2.3 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, programada em HTML 5 para fazer a inserção de JavaScript e então utilizar WebSocket, um protocolo de comunicação que fornece uma via de duas mãos para a conexão entre os servidores do microcontrolador, para cuidar da comunicação entre o ESP32 e o aparelho móvel, fará o tratamento dos dados e os apresentará para o usuário, em forma de gráficos e visualizadores numéricos representando a Tensão RMS, corrente RMS, frequência, Potências: aparente, reativa e ativa, e Fator de Potência.

4.1.2.3.1 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:

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

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.

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	$0.000001875 \times \text{ajuste_uA}$

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

4.1.2.3.2 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 36 e Figura 37.

Figura 36 – Detalhe do cabeçalho de informações da página da Web gerada pelo dispositivo

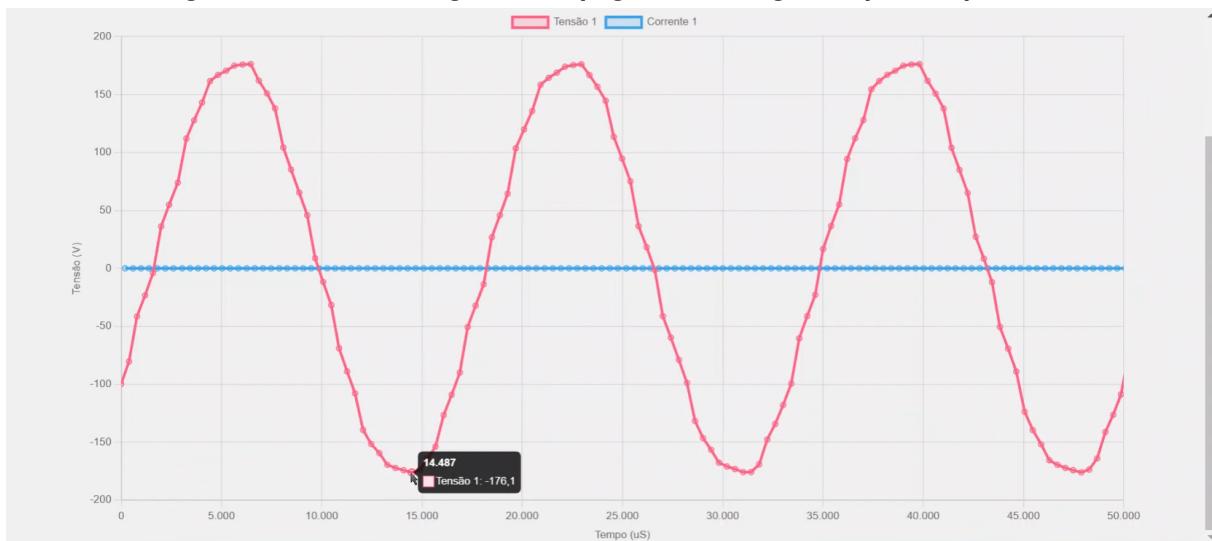


Fonte: Autoria própria (2024).

4.1.2.4 Modularidade

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. O conceito da comunicação, porém, foi testado

Figura 37 – Detalhe do gráfico da página da Web gerada pelo dispositivo



Fonte: Autoria própria (2024).

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.

É possível observar pela Figura 38 que sua implementação tornaria o código e o desenvolvimento desse trabalho extremamente complexos. **Dessa forma, incentiva-se a continuação dessa proposta em trabalhos futuros.**

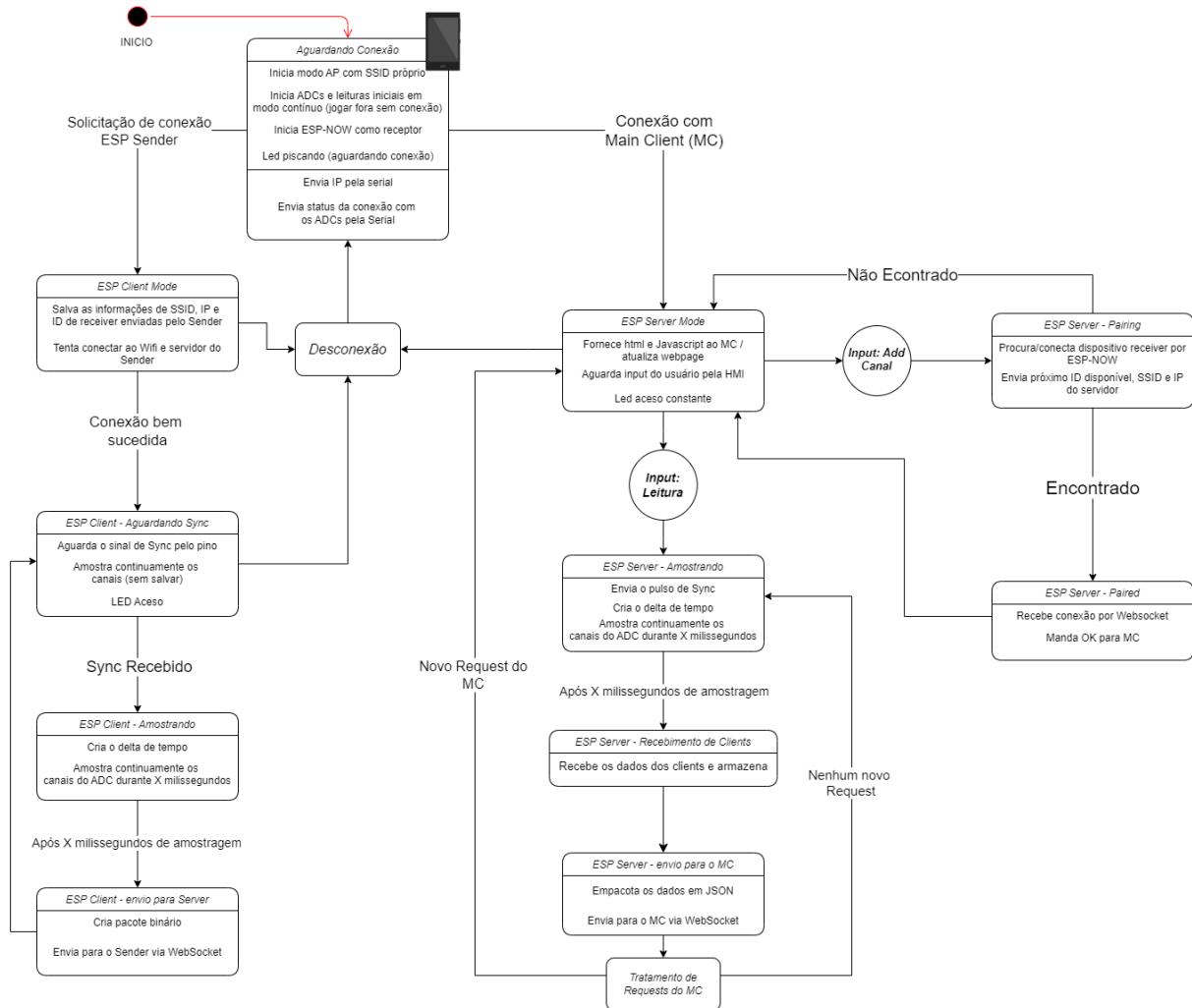
Após o processo da máquina de estados padrão, apresentada na Figura 35 - com a modularidade futuramente implementada - o funcionamento da máquina de estados completa se daria da seguinte forma:

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.

Uma limitação do protocolo *ESP-NOW* é o tamanho máximo de 255 bytes por pacote de dados. Um par de pontos de tensão e corrente ocupa cerca de 160 bits. 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 de 3300 SPS e que, para uma análise adequada de uma rede trifásica, é necessário amostrar ao menos 3 ciclos de onda.

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 acesse a mesma *webpage* e *Websocket*. **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.

Figura 38 – Máquina de Estados Completa



Fonte: Autoria própria (2024).

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.

4.2 Materiais

Esta seção está dedicada à lista de materiais utilizados para a confecção de um protótipo. Os preços indicados são validos somente para a data de confecção desta monografia, pois estão cotados de acordo com o que se foi 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 se foi considerada a protecção 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

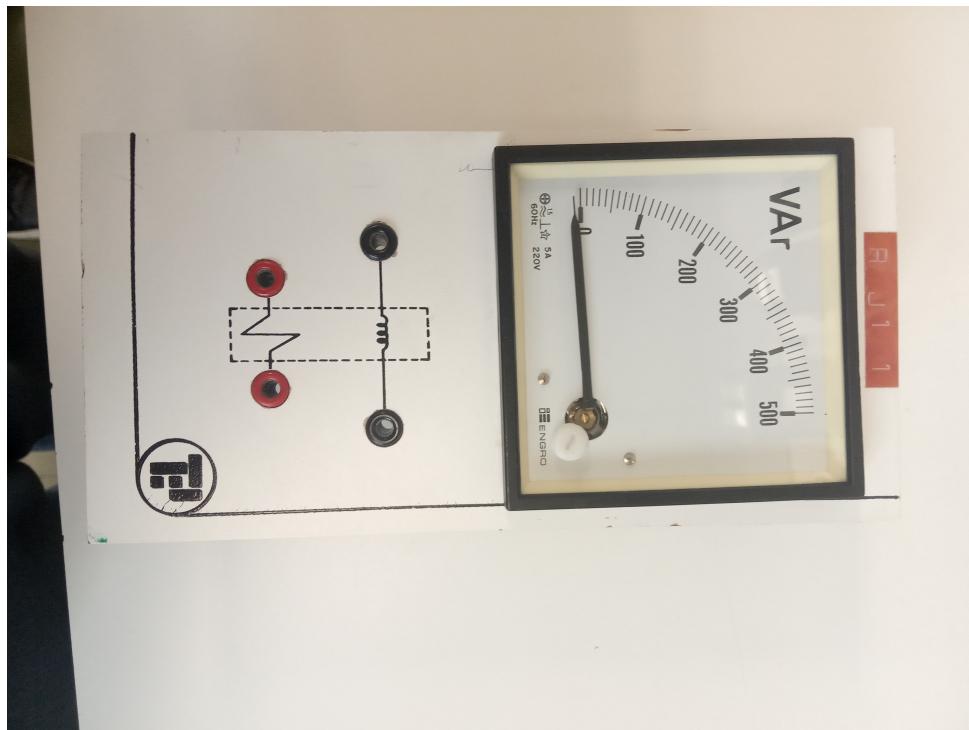
Material	Quantidade	Preço por Unidade (R\$)	Valor Total (R\$)
ESP32	1	60,00	60,00
ADC ADS1015	2	35,00	70,00
Buzzer THT	1	3,50	3,50
Capacitor 100 nF	16	0,25	4,00
Capacitor 330 pF	4	0,15	0,60
Capacitor 10 µF	4	0,20	0,80
Capacitor 1 µF	6	0,20	1,20
Diodo Schottky 1N5819	4	0,25	1,00
Diodo 1N4007	10	0,15	1,50
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	5	3,20	16,00
Barra de Pinos Fêmea 40x1	2	3,10	6,20
Fonte Isolada	2	12,50	25,00
TOTAL			332,37

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 41 e então feito o design com estas e também respeitando o tamanho e configuração da PCB.

Figura 39 – 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, ~~apenas teve seu dimensional analisado em ambiente virtual~~. Uma visão geral do modelo pode ser visto na Figura 40, juntamente de uma representação simplificada do suporte de madeira citado anteriormente. O detalhe dos suportes internos pode ser visto na ??.

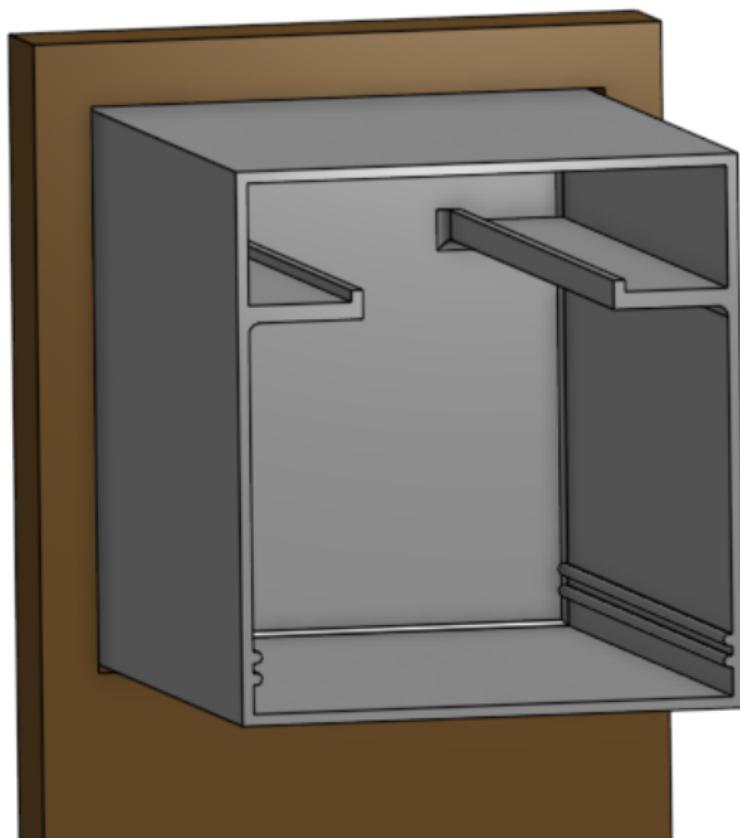
Assim como os demais elementos desse projeto, pode ser encontrado no [ANEXO X] ao final do trabalho, ~~bem como, dado a característica colaborativa da plataforma, pode ser clonado e modificado sem nenhum custo, conforme a necessidade do usuário.~~

Figura 40 – Modelo virtual do encapsulamento



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 41 – Detalhes de suportes para PCB e periféricos



Fonte: Autoria própria (2024).

5 TESTES E RESULTADOS

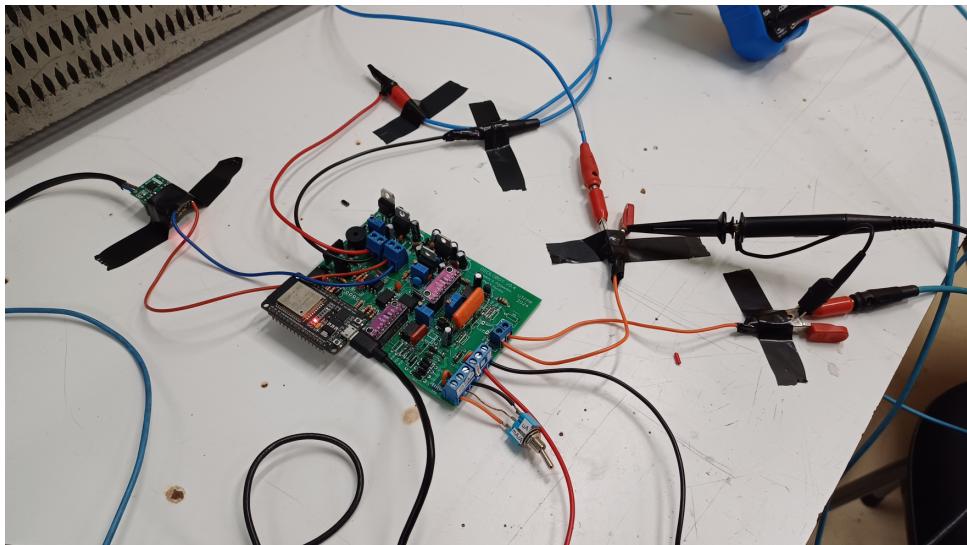


Os testes foram feitos para prova de conceito e demonstração do funcionamento do protótipo, comparando as leituras obtidas CA por este com as obtidas por um multímetro e por um osciloscópio.

O primeiro teste se diz respeito à leitura da tensão da rede local, sendo o sinal a ser lido as saídas de uma tomada de 127 V do laboratório. **O setup básico se encontra nas figuras 42 e 43.** Para este teste ~~se~~ foi utilizado um reostato pois este tem ~~uma grande~~ capacidade de suportar correntes altas. A resistência deste **se dá por** $60,3 \Omega$, como representado na Figura 44.

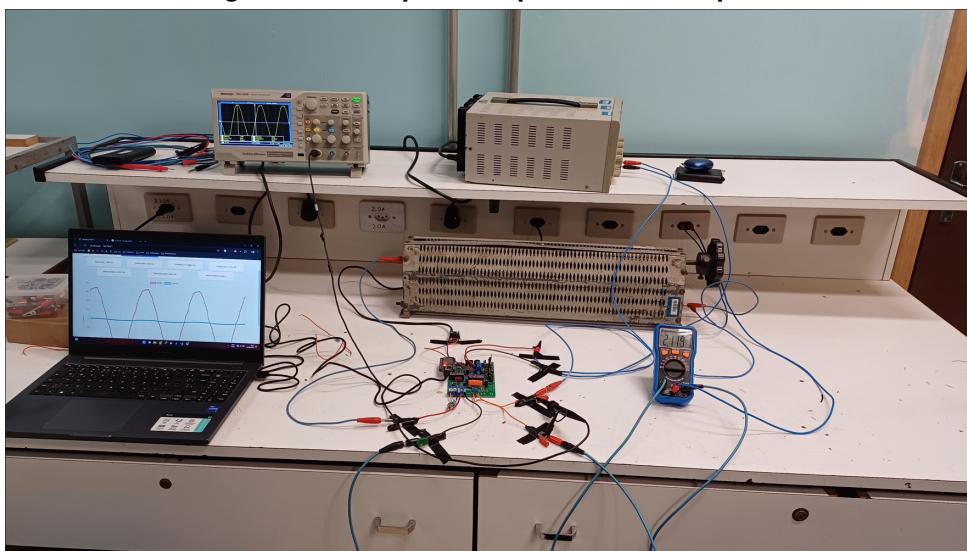
Utilizando a lei de ohm $v = r \cdot i$, espera-se uma leitura de corrente de 2.13 A.

Figura 42 – Setup básico para testes.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 43 – Setup básico para testes completo.



Fonte: Autoria própria (2024).

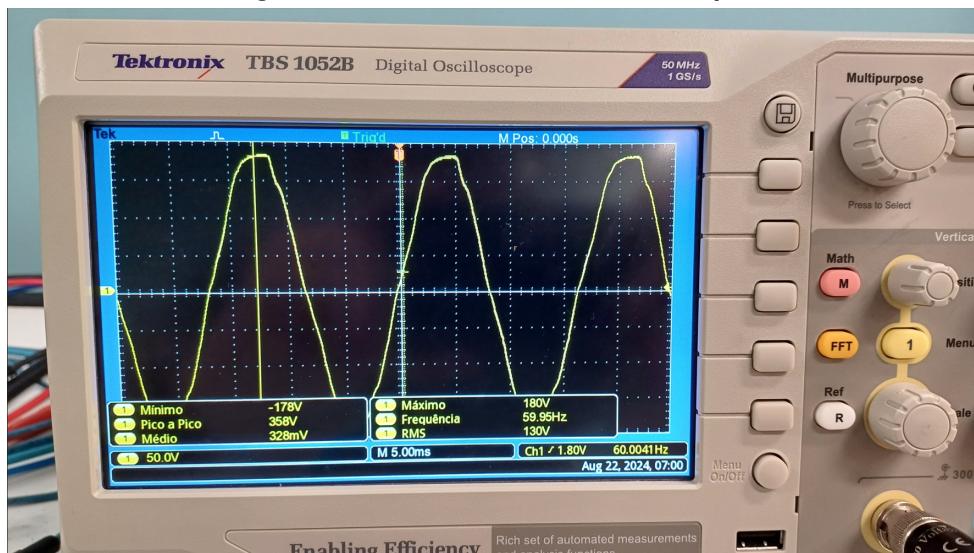
Figura 44 – Resistência do reostato.



Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 45 representa a leitura da tensão rede feita pelo osciloscópio, a Figura 46 representa a leitura de tensão feita pelo multímetro e a Figura 47 a leitura da corrente do circuito feita por este. Pelo protótipo, as figuras 48 e 49, ~~respectivamente~~, representam as ondas e o valor destas leituras, além também da frequência.

Figura 45 – Leitura da rede - Osciloscópio.



Fonte: Autoria própria (2024).

Comparando os sinais obtidos, percebe-se que o protótipo propõe uma qualidade de leitura excepcional para este range, mantendo o formato da onda fiel e os valores com um erro dentro do proposto pelas especificações.

Além deste teste da leitura da rede, foram conduzidos dois outros testes para prova de conceito: leitura de um sinal de tensão de pico de aproximadamente 200 mVpp e a leitura de uma corrente na ordem de micro amperes.

Figura 46 – Leitura da tensão da rede - Multímetro.



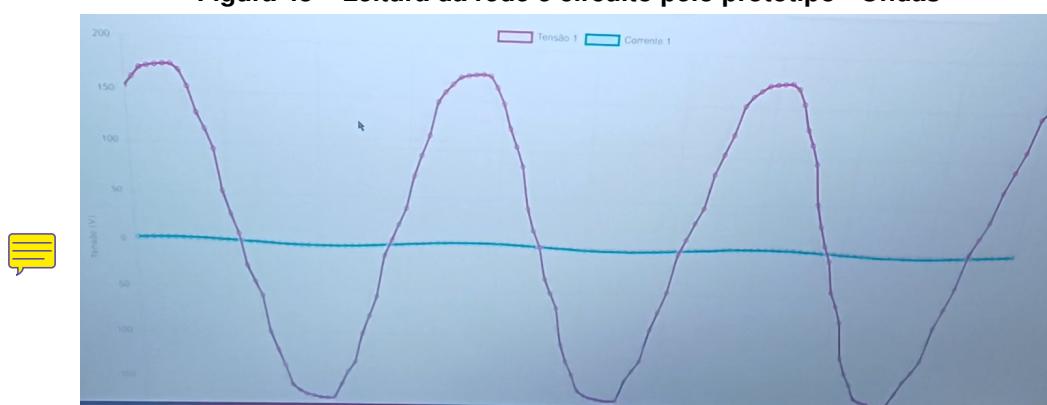
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 47 – Leitura da corrente do circuito - Multímetro.



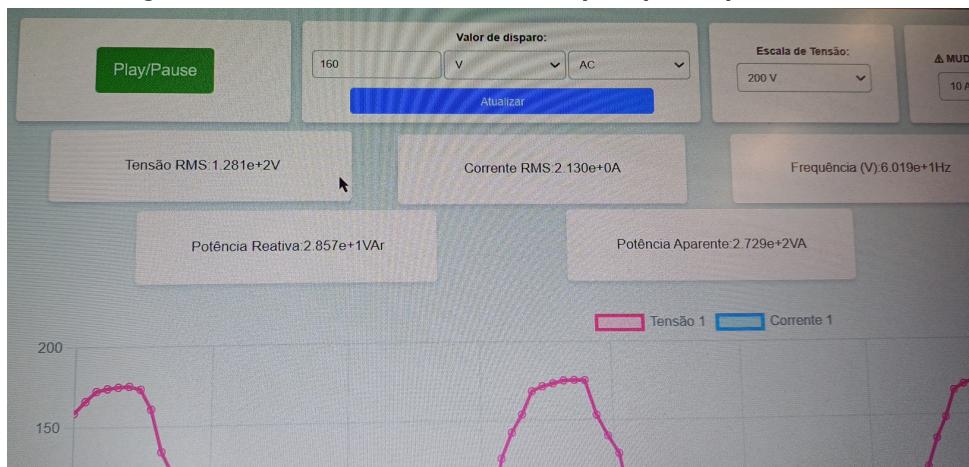
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 48 – Leitura da rede e circuito pelo protótipo - Ondas



Fonte: Autoria própria (2024).

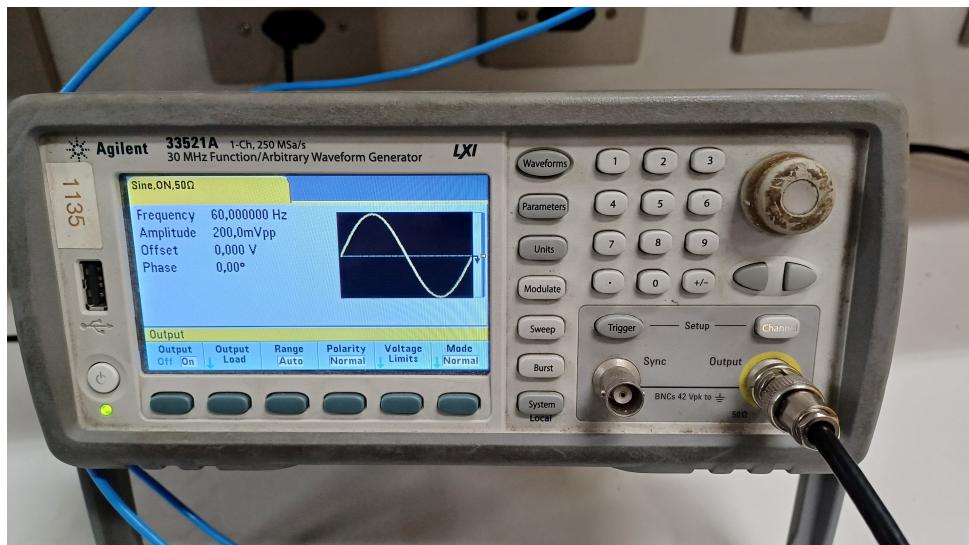
Figura 49 – Leitura da rede e circuito pelo protótipo - Valores



Fonte: Autoria própria (2024).

 O sinal de 200 mVpp foi gerado por um gerador de funções, conforme a Figura 50.

Figura 50 – Gerador de funções - Sinal 200 mVpp.



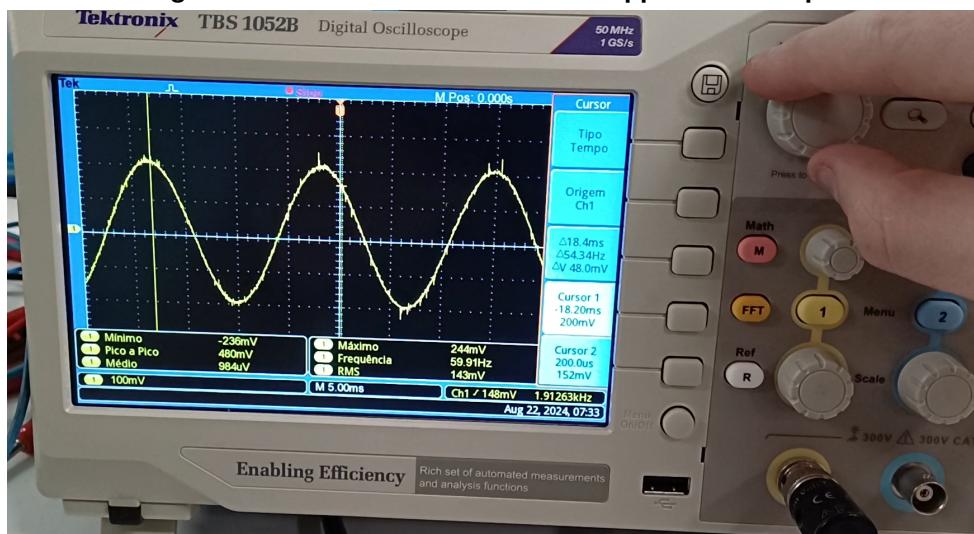
Fonte: Autoria própria (2024).

Utilizando-se novamente o osciloscópio e um multímetro, é possível comparar as leituras entre estes e o protótipo, respectivamente nas figuras 51, 52, 53 e 54.

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.

 Finalmente, para a leitura de corrente na ordem de micro amperes, foi utilizado um resistor comum de $30\text{ k}\Omega$, sendo este e seu valor representados pela ???. Além disto, utilizou-se o gerador de função novamente para gerar uma tensão pequena de 10 Vpp ou 7.07 V. Com estes

Figura 51 – Leitura da onda de 200 mVpp - Osciloscópio



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 52 – Leitura da onda de 200 mVpp - Multímetro (valor RMS)



Fonte: Autoria própria (2024).

dados, utilizando novamente a lei de Ohm, se espera uma leitura de corrente de 0,000217 A ou 217 μ A.

As leituras obtidas pelo multímetro e pelo protótipo são demonstradas respectivamente pelas figuras 55, 56 e 57. 

Olhando para os valores obtidos, percebe-se que o multímetro não apresenta um valor adequado, possivelmente por **sua entrada de corrente no valor de micro estar queimada ou defeituosa**. Já a leitura do protótipo está extremamente próxima do valor esperado, estando também dentro das especificações.

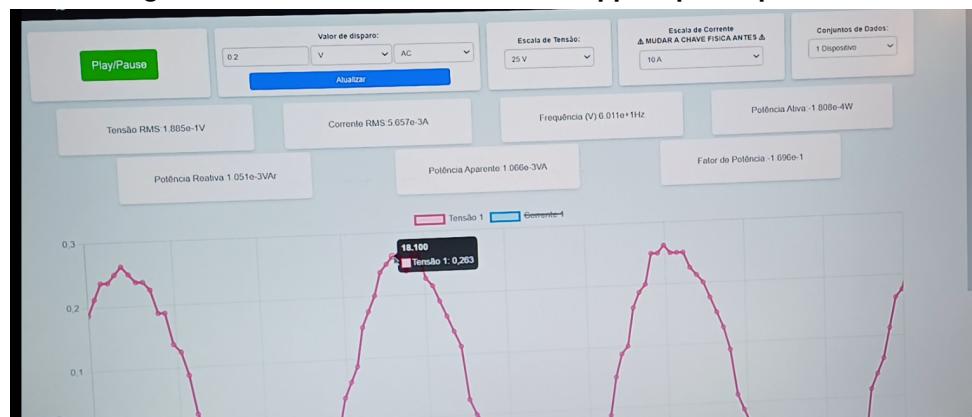
Finalmente, a tabela 9 contém todos os testes e seus resultados.

Figura 53 – Leitura da onda de 200 mVpp do protótipo - Onda



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 54 – Leitura da onda de 200 mVpp do protótipo - Valor



Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 9 – Resultados.

Leitura	Osciloscópio	Multímetro	Protótipo
Rede (V)	130 V	128,7 V	128,1 V
Rede (A)	-	2,129 A	2,130 A
200 mVpp	143 mV RMS e 244 mVpp	137 mV RMS	188 mV RMS e 263 mVpp
217 µA	-	11,8 µA	210,7 µA

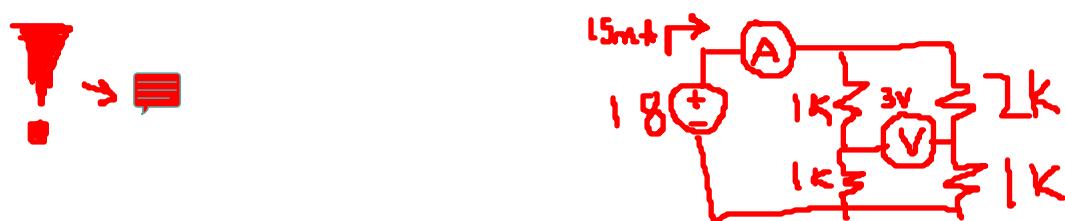
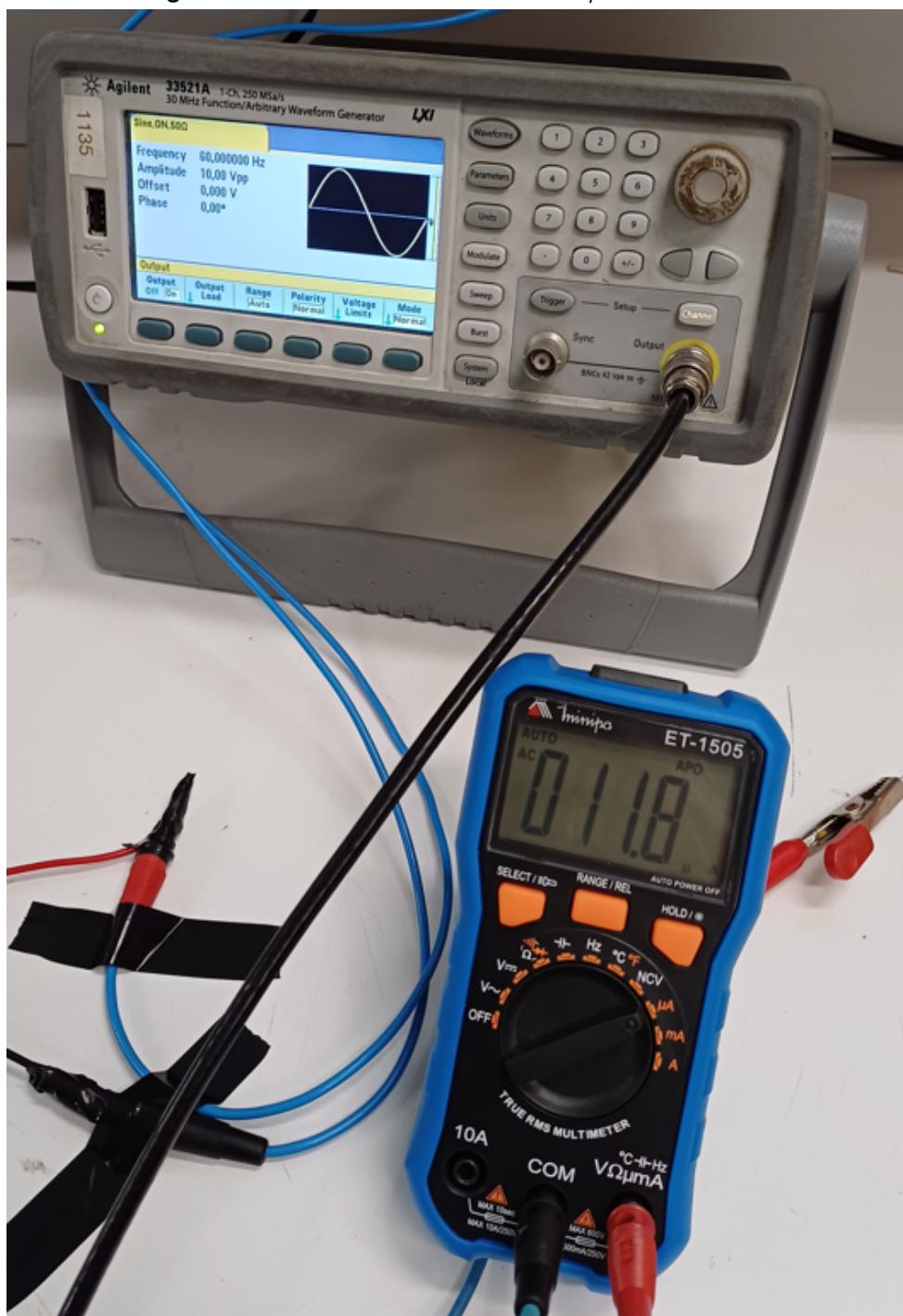


Figura 55 – Leitura da corrente de $217 \mu\text{A}$ - Multímetro.



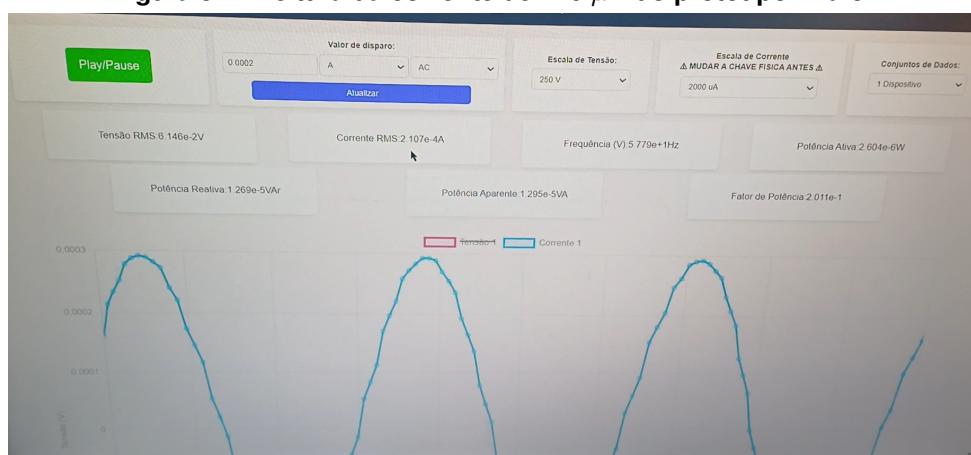
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 56 – Leitura da corrente de $210 \mu\text{A}$ do protótipo - Onda.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 57 – Leitura da corrente de $210 \mu\text{A}$ do protótipo - Valor.



Fonte: Autoria própria (2024).

6 CONCLUSÃO

O propósito deste trabalho foi o desenvolvimento de um multimedidor de baixo custo modular capaz de medir tensão e corrente paralelamente. Devido a **complexidade** da modularização, essa parte não foi implementada, porém, foi analisada e encaminhada para a funcionalidade em trabalhos futuros.

~~Para o desenvolvimento do hardware, pesquisou-se em trabalhos científicos, manuais, datasheets, livros, blogs, entre outras fontes para se ter um melhor entendimento de como funciona um circuito de leitura de sinais elétrico. Para a proteção deste circuito, muito foi pesquisado sobre proteção da entrada para tais instrumentos. Também para alcançar o objetivo de leitura paralela de tensão e corrente, foi necessário o desenvolvimento de um circuito isolado internamente, o que se apresentou como um grande obstáculo.~~

~~Foi colocado em questão o funcionamento do ADC, o componente mais importante para o objetivo e que também se pôs como a maior barreira para o desenvolvimento deste protótipo. Junto com este, o microcontrolador escolhido também foi estudado sumariamente para se desenvolver o firmware necessário para o funcionamento do pacote como um todo. Este firmware integra todo o resultado da pesquisa e assim possibilita a comunicação entre o ADC e a plataforma de tratamento de dados.~~

Foi possível se estabelecer a medição e comunicação dos dados com um dispositivo externo, bem como alcançar a precisão necessária para se observar a forma de onda e obter medições adequadas para o ensino. 

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>.
- 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_pdfls/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%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%253D33457.

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>.

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/](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.mjlorton.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/>.

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/>.

GLOSSÁRIO

Git software de controle de versionamento. 36

GitHub site de repositórios que utiliza o Git. 36

HTML linguagem de programação para páginas da internet. 36, 52

VSCode plataforma de edição de código. 36