

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANDREY ALEXANDRE GUIMARÃES

RAFAEL FELIPE PAROLIN

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

CURITIBA

2023

**ANDREY ALEXANDRE GUIMARÃES
RAFAEL FELIPE PAROLIN**

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

**Development of a low cost modular multimeter 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

**CURITIBA
2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

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.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de blocos do multimetedor trifásico oZm3	8
Figura 2 – Exemplo de um Diagrama de Blocos de um Multímetro de Bancada . . .	9
Figura 3 – Fluke 28-II	10
Figura 4 – Gráfico de corrente de consumo de um dispositivo, feito pelo DMM7510	
7.5 Digit Graphical Sampling Multimeter	10
Figura 5 – Dispositivo MMW03	10
Figura 6 – Exemplo de uso TVS Unidirecional	12
Figura 7 – Exemplo de uso TVS Bidirecional	12
Figura 8 – Ilustração da Classificação CAT	13
Figura 9 – Fluke 28-II PCB	14
Figura 10 – Diagrama de blocos de um ADC	14
Figura 11 – Diagrama de blocos de um ADC Flash	16
Figura 12 – Diagrama de blocos de um ADC SAR	17
Figura 13 – Plot sobre o tempo da saída de um ADC SAR	17
Figura 14 – Fluke 28-II	18
Figura 15 – Diagrama de Blocos de um Multímetro Portátil	19
Figura 16 – Diagrama de Blocos de um Multímetro de Bancada	19
Figura 17 – AD202 um exemplo de amplificador isolador	20
Figura 18 – Bobina Rogowski aberta	21
Figura 19 – Circuito completo com transformador de pulso para medição CA/CC . .	22
Figura 20 – Circuito de um comparador utilizando dois resistores como referência	
de tensão	23
Figura 21 – Família STM32 separada por função	26
Figura 22 – Interface WEB usada no 3Ph-ozm	27
Figura 23 – Módulo ESP32-WROOM-32D frente e verso	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviaturas

ADC	<i>Analogic-to-Digital Converter</i>
amp-op	Amplificador Operacional
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito Integrado
DAC	<i>Digital-to-Analogic Converter</i>
ESD	<i>Electrostatic Discharge</i>
HRC	<i>High Rupturing Capacity</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
MCU	<i>Microcontroller Unit</i>
MOV	<i>Metal Oxide Varistor</i>
MUX	Multiplexador
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i>
SAR	<i>Successive Approximation Register</i>
SEMAP	Setor de Almoxarifado/Manutenção dos Laboratórios
TCC	Tese de Conclusão de Curso
TVS	<i>Transient Voltage Suppressor</i>
UUT	<i>Unit Under Test</i>
WW	<i>Wire Wound</i>

Siglas

TI	<i>Texas Instruments</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
1.1	TEMA	5
1.1.1	Delimitações do tema	5
1.2	PROBLEMA E PREMISSAS	5
1.3	OBJETIVOS	6
1.3.1	Objetivo Geral	6
1.3.2	Objetivos Específicos	6
1.4	JUSTIFICATIVA	7
1.5	METODOLOGIA DE PESQUISA	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE	8
3	REFERENCIAL TEÓRICO	11
3.1	Proteção de Entrada	11
3.1.1	ESD	11
3.1.2	Proteção Específica para Equipamentos de Medição de Sinais Elétricos	11
3.1.2.1	Proteção de Entrada para Circuitos de Corrente	12
3.1.2.2	Proteção de Entrada para Circuitos de Tensão	13
3.2	Conversor Analógico Digital	14
3.2.1	Flash ADC	15
3.2.2	SAR ADC	15
3.3	Calibração	16
3.3.1	Calibrators ou Standards	16
3.4	Referência de Tensão	18
3.5	Condicionamento de Sinal e Pathing	18
3.6	Power Management	19
3.7	Aquisição de Sinal	19
3.7.1	Resistor Shunt	20
3.7.2	Bobina Rogowski	20
3.7.3	Transformador de Corrente	21
3.7.4	Circuito Integrado de Medição (<i>hall effect</i>)	22
3.8	Aviso de Entrada Incorreta (<i>Input Warning</i>)	22

3.8.1	Comparador para detecção de falhas	23
3.8.2	Tipos de aviso	23
3.8.3	Casos de extrema gravidade	24
3.9	MCU e Interface de Comunicação	24
3.9.1	Microcontroladores	24
<u>3.9.1.1</u>	<u>Microcontroladores Considerados</u>	<u>25</u>
3.9.2	Apresentação dos dados e Comunicação	25
3.9.3	Soluções completas	26
4	ESPECIFICAÇÕES	28
	REFERÊNCIAS	29

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 TCC será limitado a 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. Desenvolvidos com a expectativa de leituras mais precisas, maior fiabilidade, 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 matérias de Eletricidade e Magnetismo e Circuitos A. Os laboratórios de tais matérias e algumas outras serão o ponto focal da utilização dos dispositivos por este TCC desenvolvidos.

1.1.1 Delimitações do tema

1.2 PROBLEMA E PREMISSAS

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná - campus Curitiba, possui dois laboratórios de ensino para as disciplinas de Eletricidade e Magnetismo, Circuitos A e B, ofertadas por diversos cursos da universidade. Os laboratórios são salas com bancadas de testes para circuitos elétricos que possuem fontes de tensão e corrente, bem como módulos de medidores para diversos fins. Esses medidores, porém, são completamente analógicos, possuem fundo de escala que não condizem necessariamente com os testes que precisam ser realizados durante as aulas e, muitas vezes, não estão em condições adequadas de funcionamento. Isso se dá em grande parte por sua complexidade de reparos: tanto por precisarem de peças antigas para

reposição, quanto por possuírem diversas peças mecânicas em seu interior que dificultam o processo de reparo, necessitando de tempo e testes, bem 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. Além dos problemas de reparos destes equipamentos, 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 de verbas para esse processo dado os valores de medidores encontrados no mercado e disponibilidade de recursos da universidade.

1.3 OBJETIVOS

Desenvolver um equipamento de baixo custo para o auxílio à didática nas disciplinas de Eletricidade e Magnetismo, Circuitos A e Circuitos B.

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um multímetro de baixo custo com três canais capaz de medir tensão e corrente CC/CA simultaneamente, com proteções contra curto-circuito e sobretensão, capaz de se comunicar com um smartphone para apresentar as formas de onda e dados obtidos das medições para ser utilizado nos laboratórios das disciplinas de Eletricidade e Magnetismo, Circuitos A e Circuitos B da UTFPR – câmpus Curitiba.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para o desenvolvimento do multímetro serão 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 a serem utilizados para o desenvolvimento do projeto;
- Desenvolver de um protótipo funcional do multímetro de três canais;

- Desenvolver um sistema de fixação e alimentação para sua instalação nas bancadas de laboratório;
- Realizar o teste do protótipo e;
- Validar o protótipo com professores e alunos das disciplinas.

1.4 JUSTIFICATIVA

Uma ferramenta de medição de baixo custo, com capacidade de atender às principais demandas 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 deste laboratório e tornar o ensino mais dinâmico e adequado à prática almejada, além de permitir o tratamento de dados e formas de onda, estendendo a experiência de ensino das disciplinas.

1.5 METODOLOGIA DE PESQUISA

Este TCC se trata de uma pesquisa exploratória aplicada que visa o desenvolvimento de um protótipo de um multímetro digital com suas especificidades e testes para assegurar sua viabilidade. Para a elaboração deste trabalho 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 e um software 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, pesquisar-se-á métodos de amostragem utilizados em produtos comerciais e aprofundar os conhecimentos nos microcontroladores, componentes e plataformas de desenvolvimento escolhidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE

Neste trabalho, o objetivo foi desenvolver um multímetro capaz de medir tensão e corrente simultaneamente e enviar os dados para um smartphone por meio de uma conexão wifi. Considerando essa proposta, foram analisadas duas opções para servir como base: um multimetror e um multímetro.

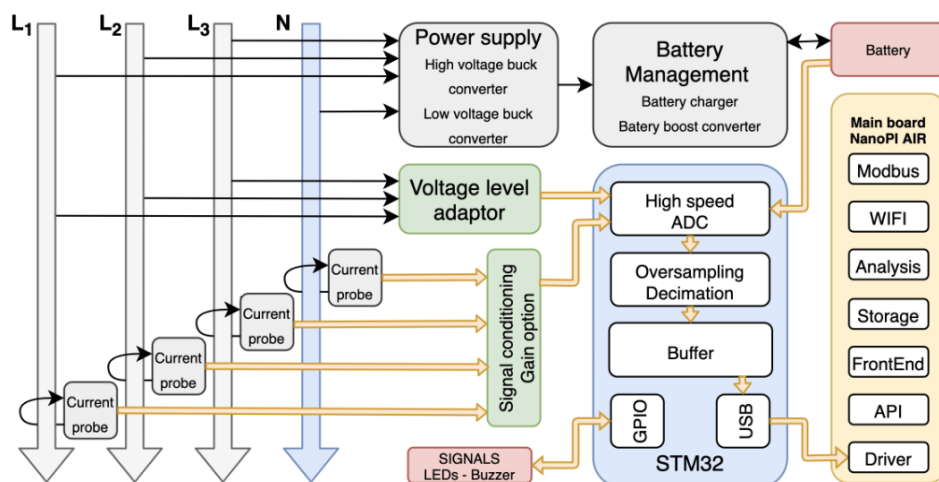
O multimetror é um dispositivo geralmente trifásico, que permite a medição simultânea de tensão e corrente, exibindo as formas de onda em um display. Possui três ou mais canais simultâneos. No entanto, apresenta a limitação de possuir apenas um referencial de medição, com resolução na ordem de 1V nos modelos mais baratos e 0,1V nos modelos mais caros, repetindo-se esses 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, capacitância, entre outros. Ele não exibe as curvas na tela, fornecendo apenas os 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 1uA (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 multimetror, 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.

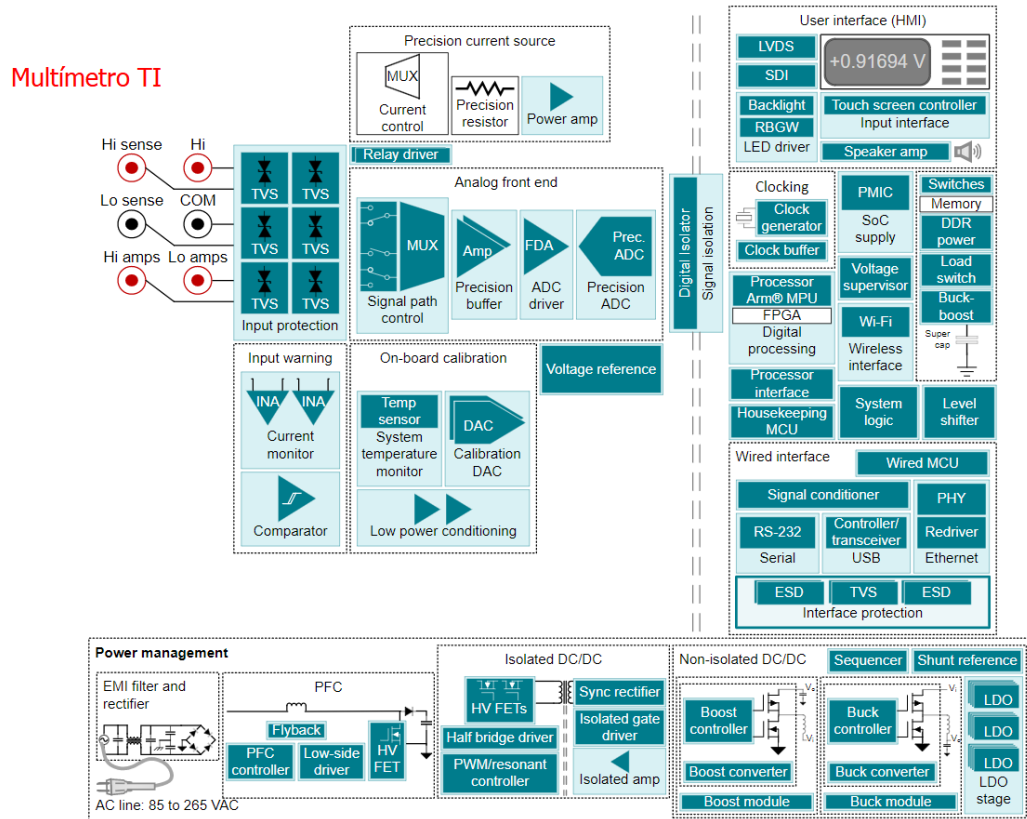
Figura 1 – Diagrama de blocos do multimetror trifásico oZm3



Fonte: (VICIANA et al., 2023).

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

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



Fonte: Texas Instruments.

Sobre o estado da arte, 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 Fluke 28-II EX possuem boa métrica de confiabilidade e também são portáteis, além de fazerem 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 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 explicitas 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.

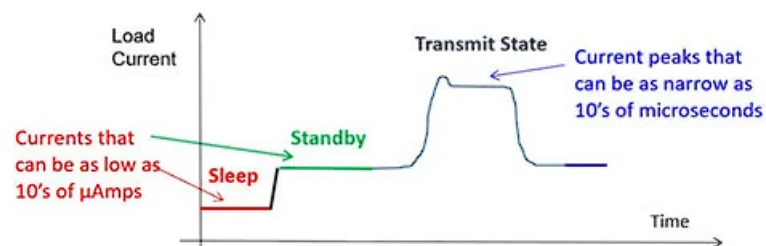
No caso de multimídios, que são somente de uso específico industrial, alguns fornecedores e dispositivos se sobressaem, como a WEG. O MMW03, por exemplo, é um multimídi-

Figura 3 – Fluke 28-II



Fonte: fluke28iixd.

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



Fonte: tektDMM.

dor 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.

Figura 5 – Dispositivo MMW03



Fonte: WEG.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção será dedicada a explicar como funcionam as várias partes envolvidas na construção e funcionamento de um multímetro digital e/ou multimedidor.

3.1 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 topografias 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. Notoriamente, seres humanos são capazes de entregar descargas de até 20 kV por consequência da capacitância inata à sua fisiologia. (TVS/ZENER. . . , 2005)

3.1.1 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. (MULTIMETER. . . , 2023)

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. (DESIGN. . . , 2012)

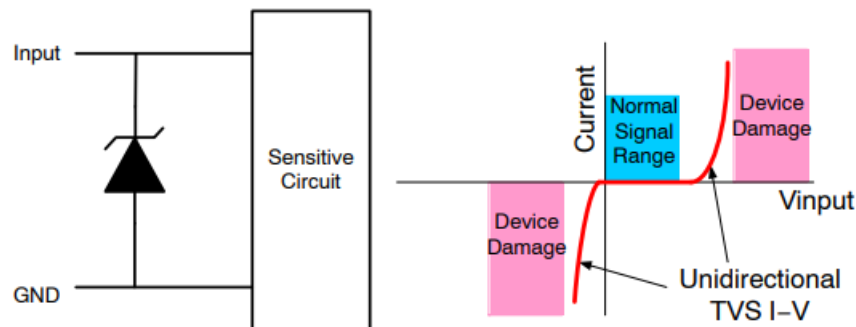
As figuras 6 e 7 demonstram a utilização básica de tal circuito e o conceito por trás da tensão de ruptura de tal semicondutor.

3.1.2 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 vai de CAT I a CAT IV. 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.

Figura 6 – Exemplo de uso TVS Unidirecional

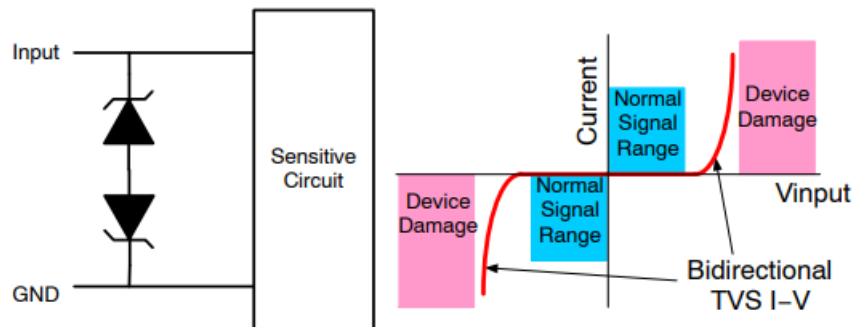
AND8424/D



Fonte: (UNIDIRECTIONAL..., 2009).

Figura 7 – Exemplo de uso TVS Bidirecional

AND8424/D



Fonte: (UNIDIRECTIONAL..., 2009).

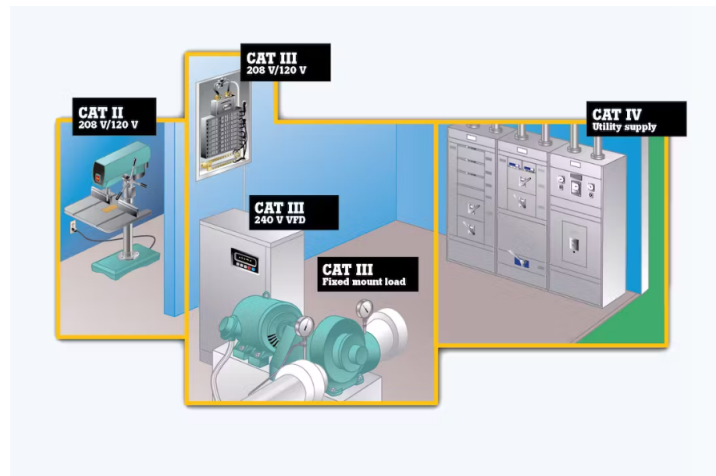
Dispositivos CAT IV devem estar protegidos a nível de distribuição de energia, pois estes serão utilizados em conexão entrada de energia de uma facilidade. Dispositivos CAT III devem estar protegidos a nível de distribuição interna (quadros de distribuição), podendo esta ser trifásica ou monofásica. 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)

3.1.2.1 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 de quatro terminais, 0R005 Ω , entre o ground e a entrada, no qual será feita a medida.

Figura 8 – Ilustração da Classificação CAT



Fonte: (SILVEY, 2022).

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. (MANUAL... , 1998)

Para o switch de mA, é conectado em série um resistor shunt de $4R995 \Omega$ com o shunt do range de A ($0R005 \Omega$), para ser feita a medição em uma resistência total de 5Ω .

Para o switch de μ A, é conectado um resistor shunt de 500Ω , no qual será feita a medição. (MULTIMETER... , 2023)

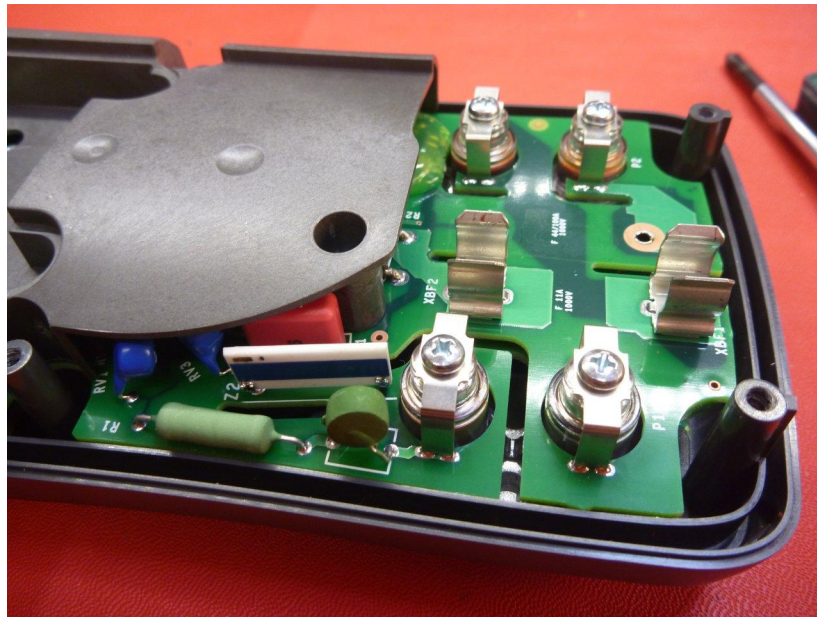
3.1.2.2 Proteção de Entrada para Circuitos de Tensão

O circuito de proteção para a entrada de tensão é simples, sendo este composto de um resistor WW (WireWound) em série com um termistor PTC (*Positive Temperature Coefficient*) em série com um resistor de $10 M\Omega$, no qual será feita a medida. (MANUAL... , 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 sobretensão, 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. (MULTIMETER... , 2012)

Uma parte importante 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 explícito na Figura 9.

Figura 9 – Fluke 28-II PCB

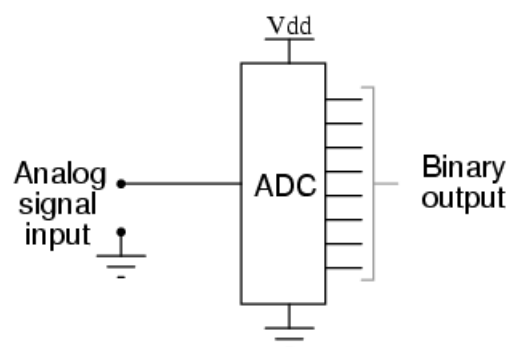


Fonte: (FLUKE..., 2012).

3.2 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 10.

Figura 10 – 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.

3.2.1 Flash ADC

Este ADC delimita o princípio de funcionamento desse tipo de dispositivo. Formado de uma série de comparadores, como mostrado na Figura 11, 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.

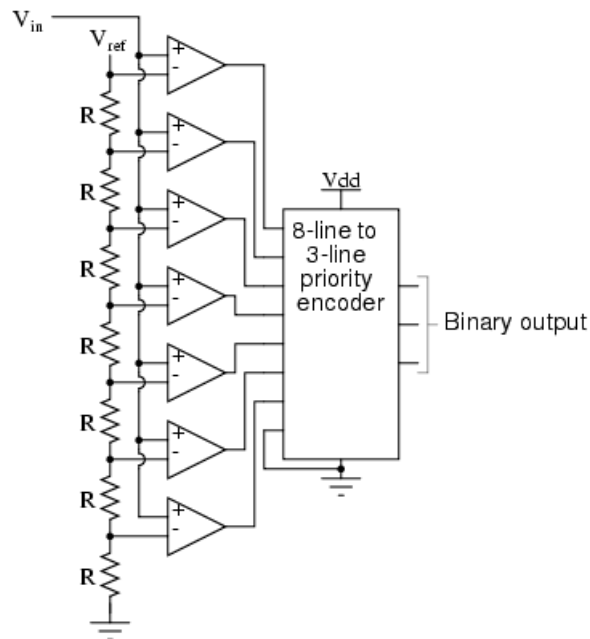
3.2.2 SAR ADC

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 significativo ao menos significativo para conseguir um número binário que se iguale ao número decimal original.

O circuito e resultado de leitura do ADC em questão, em termos simples, pode ser representado pelas figuras 12 e 13.

Figura 11 – Diagrama de blocos de um ADC Flash



Fonte: (KUPHALDT, 2021).

3.3 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.

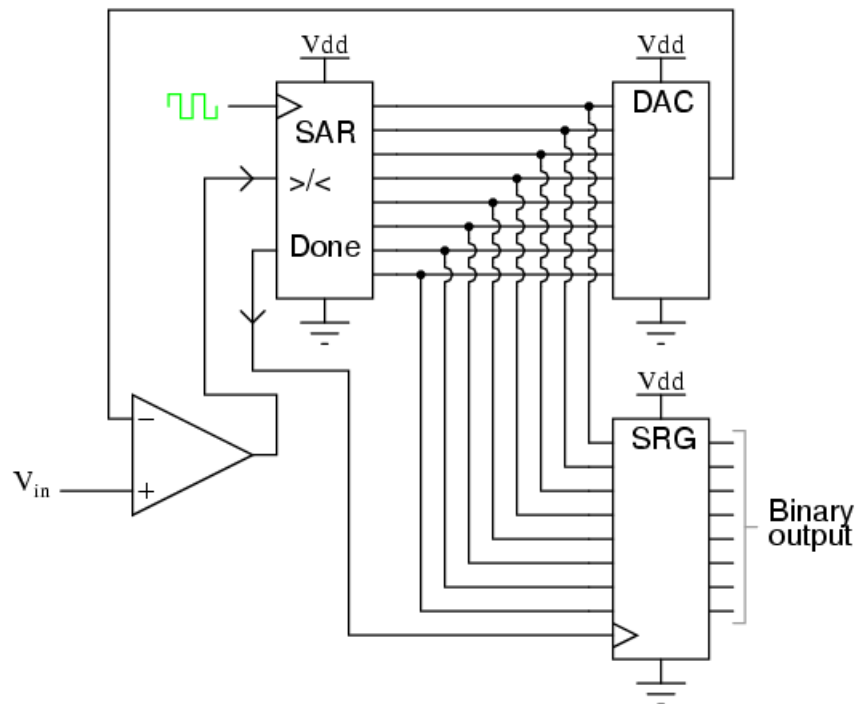
Para se calibrar um multímetro, é utilizado um outro dispositivo com no mínimo 4x a precisão do multímetro a ser calibrado. Portanto, normalmente se é utilizado um equipamento específico para exercer tal função. Esse equipamento geralmente é chamado de *calibrator* ou *standard*. (ELECTRICAL... , 2023)

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 rastreabilidade extensivas são requerimentos indispensáveis.

3.3.1 Calibrators ou Standards

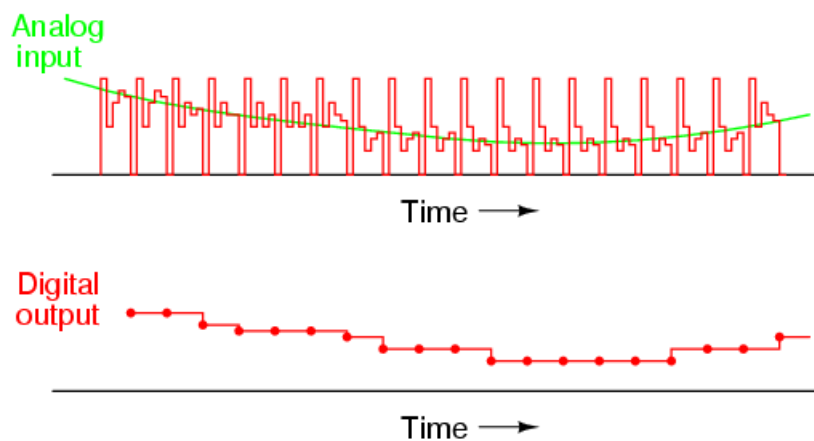
O *calibrator* tem a capacidade de fornecer sinais elétricos precisos e de função variável, que podem ser produzidos de μV a kV , normalmente. Estes sinais, em ranges específicos, serão lidos pela UUT (*Unit Under Test*) e então serão anotados os resultados da medição, fazendo-se

Figura 12 – Diagrama de blocos de um ADC SAR



Fonte: (KUPHALDT, 2021).

Figura 13 – Plot sobre o tempo da saída de um ADC SAR



Fonte: (KUPHALDT, 2021).

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 calibrador, 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 desta presente tese. (HIGH-PRECISION..., 2017)

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

3.5 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 14, ou em alguns casos, por uma combinação dos dois. (MULTIMETER..., 2023)

Figura 14 – Fluke 28-II

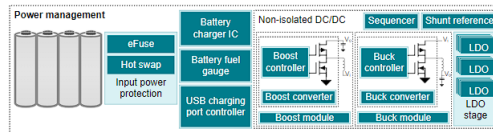


Fonte: (FLUKE..., 2012).

3.6 Power Management

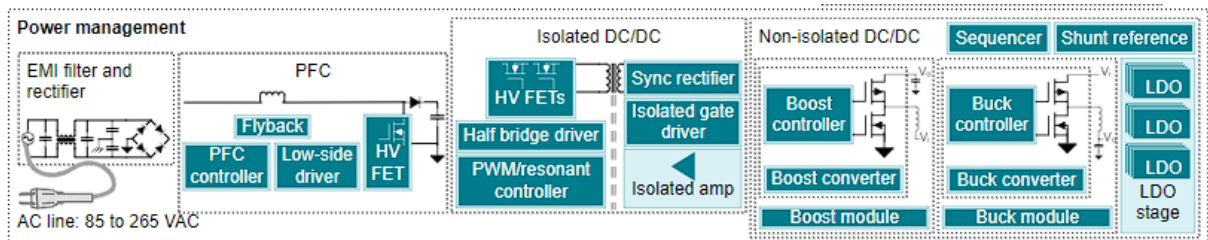
Multímetros digitais se apresentam em duas configurações, sendo estas de bancada e portátil. Na configuração portátil, se é utilizado pilhas ou baterias para prover a tensão necessária para se ligar todos os subsistemas do aparelho. Já na configuração de bancada, é utilizada uma fonte isolada, conectada à rede de energia para fornecer a tensão adequada para se ligar todos os subsistemas do dispositivo, como se pode ver nas figuras 16 e 15, dos designs propostos pela TI.

Figura 15 – Diagrama de Blocos de um Multímetro Portátil



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 16 – Diagrama de Blocos de um Multímetro de Bancada



Fonte: Texas Instruments.

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

3.7 Aquisição de Sinal

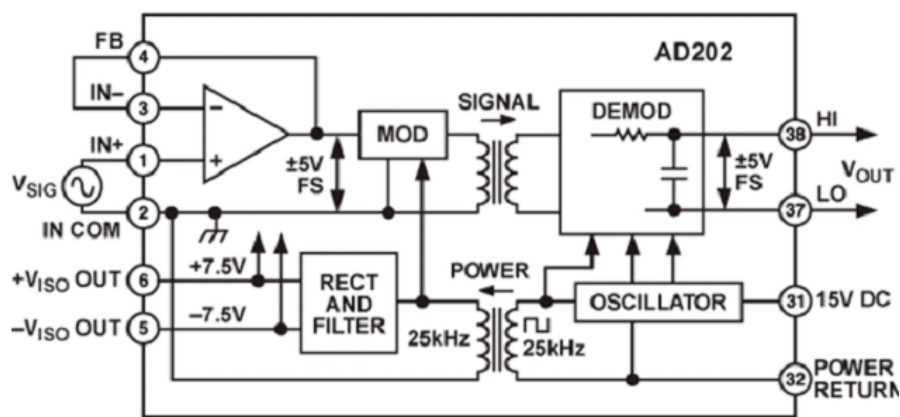
A aquisição de sinal é o processo de captura e conversão de sinais físicos em um formato adequado para análise, processamento ou armazenamento. No contexto da medição de tensão e corrente, a aquisição de sinal refere-se à captura e registro desses parâmetros elétricos em um sistema de medição, permitindo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

3.7.1 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 17.

Figura 17 – AD202 um exemplo de amplificador isolador



Fonte: (AD202..., 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 inerentemente por seus aspectos construtivos.

3.7.2 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 18 – Bobina Rogowski aberta



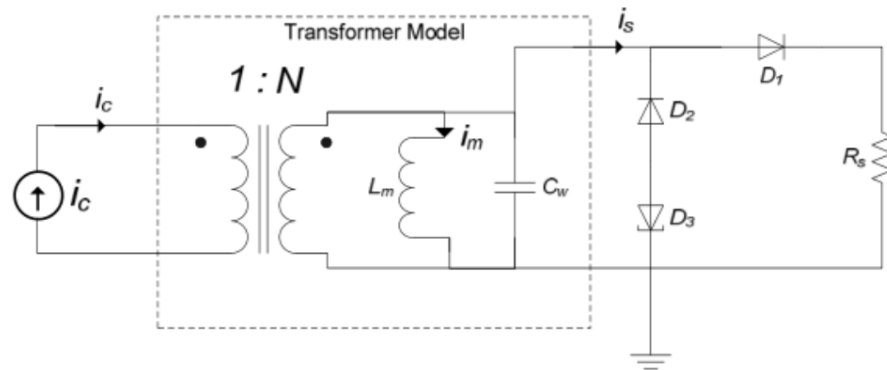
Fonte: CITAR Metodos de medição (artigo).

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)

3.7.3 Transformador de Corrente

O princípio de funcionamento do transformador de corrente é parecido com o da bobina Rogowski: possui um primário e um secundário com uma razão de voltas que permite que a tensão induzida seja lida em sua saída. A diferença deste para a bobina Rogowski é que existe agora um núcleo com certa permeabilidade magnética e o secundário possui um resistor R_s que permite uma medição mais simplificada da corrente de entrada. Nesse tipo de medição, a própria saída do transformador de corrente é proporcional a entrada de corrente, não sendo necessário um integrador como é o caso da bobina Rogowski. Devido a sua construção, seu sinal de saída também não necessita de nenhum tipo de amplificação, podendo ser lido diretamente por um ADC. É teoricamente impossível medir correntes contínuas com esse método, porém, caso seja possível pulsar essa corrente, utilizando um circuito acessório de desmagnetização e, respeitando os tempos necessários entre os pulsos, é possível obter uma medida satisfatória.

Figura 19 – Circuito completo com transformador de pulso para medição CA/CC



Fonte: (ZIEGLER et al., 2009).

3.7.4 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.(ACS712... , 2022)

3.8 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.

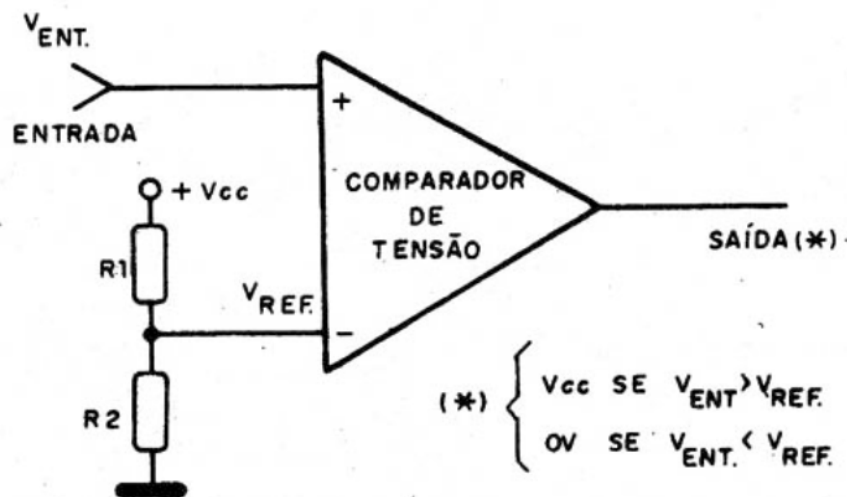
Em medições com vários canais, o *input warning* pode ser diferenciado dependendo da configuração do sistema de aquisição de dados. Pode haver avisos específicos para cada canal, indicando problemas individuais, como tensão excessiva ou corrente anormalmente alta.

Alternativamente, pode haver um aviso global indicando um problema geral em qualquer um dos canais.

3.8.1 Comparador para detecção de falhas

Para o caso do multímetro a ser desenvolvido pode-se utilizar um simples circuito comparador para monitorar as tensões de entrada e indicar ao usuário que a escala utilizada está incorreta ou, até mesmo, que a tensão ou corrente medidas está acima do limite suportado. O circuito pode ser visto na Figura 20 e consiste apenas em um amp-op.

Figura 20 – Circuito de um comparador utilizando dois resistores como referência de tensão



Fonte: (BRAGA, 2017).

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

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

3.8.3 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 3.7.1. Colocar as ponteiros 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.

3.9 MCU e Interface de Comunicação

3.9.1 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)

3.9.1.1 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 início 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.

Para a seleção de um microcontrolador adequado, pode-se seguir a linha *mainstream* da Figura 21, 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.

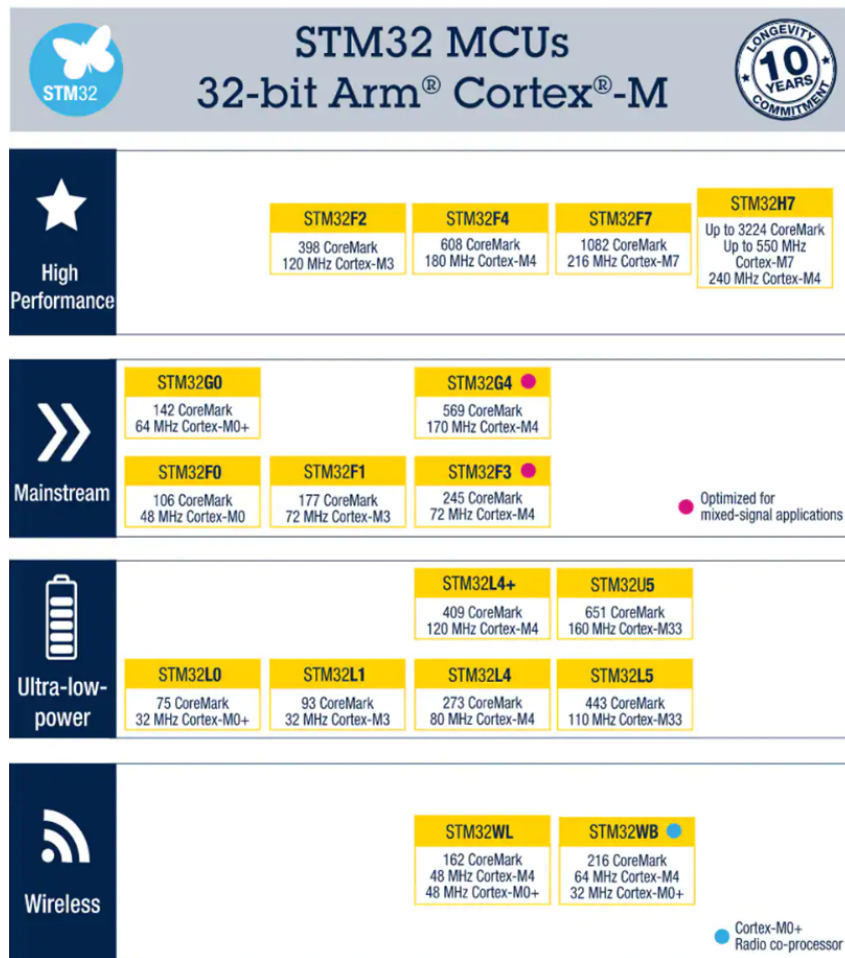
3.9.2 Apresentação dos dados e Comunicação

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.

Figura 21 – Família STM32 separada por função



Fonte: Mouser.

Para realizar esse envio, podem-se utilizar diversas tecnologias diferentes, desde protocolos com fio (CAN, MODBUS, I2C, UART, etc.) até protocolos sem fio — que serão os mais aprofundados nessa seção.

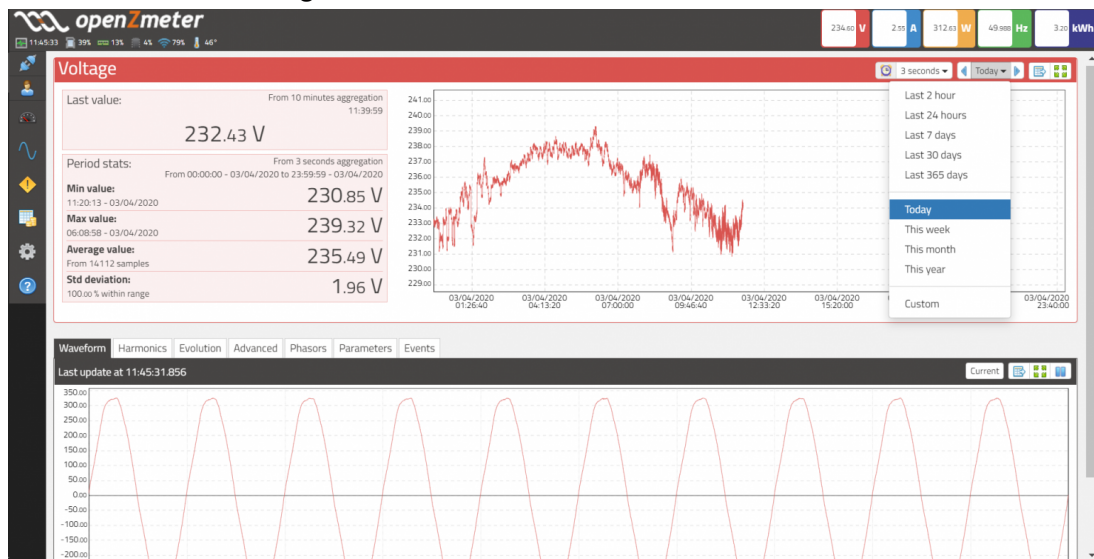
Baseando-se no artigo Abate *et al.* (2019), as tecnologias que podem ser usadas são as encontradas no ambiente de IoT (Internet das Coisas) como LoRa, Sigfox e NB-IoT. Também é possível utilizar tecnologias mais populares, como é o caso do Viciano *et al.* (2023) que utiliza WiFi e Bluetooth para realizar sua comunicação e o display de seus dados através de uma interface web conforme a Figura 22.

3.9.3 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 23), 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

Figura 22 – Interface WEB usada no 3Ph-ozm



Fonte: www.openzmeter.com/.

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. (ESP32... , 2023)

Figura 23 – Módulo ESP32-WROOM-32D frente e verso



Fonte: DigiKey.

4 ESPECIFICAÇÕES

Baseado em relatos dos professores das disciplinas de Eletricidade e Magnetismo, Circuitos A e Circuitos B da UTFPR de Curitiba. Além disso, dados os equipamentos utilizados nos laboratórios dessas disciplinas, bem como os utilizados no SEMAP (Setor de Almoxarifado/Mantenção 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
Resolução	3 1/2 dígitos	3 1/2 dígitos
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: Através de Wifi para dispositivos com acesso a navegador web

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.

O multímetro será fabricado em placa de circuito impressa e montado em um módulo de bancada conforme os que os laboratórios da UTFPR possuem.

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>.
- ACS712 datasheet. [S./], 2022. Disponível em: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/570845/AllegroMicroSystems/ACS712/1>.
- AD202 datasheet. [S./], 2001. Disponível em: <https://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/041/AD202-pdf.php>.
- BRAGA, N. C. **Como Funciona o Comparador de Tensão (ART1511)**. 2017. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/12973-como-funciona-o-comparador-de-tensao-art1511.html>.
- COMPONENTS101. **Difference between Microprocessor and Micro-controller**. 2019. Disponível em: <https://components101.com/articles/difference-between-microprocessor-and-microcontroller>.
- 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.
- ELECTRICAL Calibration Equipment | Fluke Calibration. 2023. Disponível em: <https://eu.flukecal.com/products/electrical-calibration-0>.
- ESP32 Datasheet. [S./], 2023. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf.
- FLUKE. **Manual do usuário Fluke 434**. [S./], 2014. Disponível em: https://www.manualsbase.com/pt/manual/431880/stereo_system/fluke/434/.
- 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>.
- HIGH-PRECISION Reference Design for Buffering a DAC Signal. 2017. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ug/tiduct8/tiduct8.pdf?ts=1685988821918&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fsolution%252Fdigital-multimeter-dmm%253Fvariantid%253D20220%2526subsystemid%253D33430.
- ICL8069 Datasheet. [S./], 2005. Disponível em: <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/ds/ICL8069.pdf>.
- 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>.
- MANUAL Fluke 27. [S./], 1998. Disponível em: https://www.testmart.com/webdata/mfr_pdfs/FLU/27_____smeng0100.pdf.
- MINIPA. **MINIPA ET-1100 INSTRUCTION MANUAL**. [S./], 2013. Disponível em: <https://www.manualslib.com/manual/1085992/Minipa-Et-1100.html>.

- MULTIMETER design. 2023. Disponível em: <https://lygte-info.dk/info/DMMDesign%20UK.html>.
- MULTIMETER Input Protection Tutorial. 2012. Disponível em: <https://www.eevblog.com/forum/blog/eevblog-373-multimeter-input-protection-tutorial/>.
- MULTIMETER protection and safety. 2023. Disponível em: <https://lygte-info.dk/info/DMMDesignProtection%20UK.html>.
- 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/>.
- 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/>.
- TVS/ZENER Theory and Design Considerations. 2005. Disponível em: http://www.reallyreallyrandom.com/zener/media/Zener_Theory_and_Design.pdf.
- UNIDIRECTIONAL Versus Bidirectional Protection. 2009. Disponível em: <https://www.mouser.com/pdfdocs/AND8424-D.PDF>.
- 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/>.