

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DA PARAÍBA  
COORDENAÇÃO DO CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA DE  
COMPUTAÇÃO**

**ELLISSON DA SILVA BARBOSA  
FABRÍCIO DOMINGOS DA SILVA  
JOÃO PEDRO DE LIMA E SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA MONITORAMENTO DE  
TENSÃO E CORRENTE ELÉTRICA UTILIZANDO O STM32**

Catálogo na fonte:

Ficha catalográfica elaborada por Gustavo César Nogueira da Costa - CRB 15/479

B238d Barbosa, Elisson da Silva

Desenvolvimento de um dispositivo para monitoramento de tensão e corrente elétrica utilizando o STM32 / Elisson da Silva Barbosa, Fabrício Domingos da Silva, João Pedro de Lima e Silva. - Campina Grande, 2025. 80 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia de Computação) - Instituto Federal da Paraíba, 2025. Orientador: Prof. Dr. Fagner de Araújo Pereira.

1. Engenharia de computação 2. Monitoramento elétrico - qualidade da rede 3. Microcontroladores - STM32 I. Silva, Fabrício Domingos da II. Silva, João Pedro de Lima III. Pereira, Fagner de Araújo IV. Título.

CDU 621.3

ELLISSON DA SILVA BARBOSA  
FABRÍCIO DOMINGOS DA SILVA  
JOÃO PEDRO DE LIMA E SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA MONITORAMENTO DE  
TENSÃO E CORRENTE ELÉTRICA UTILIZANDO O STM32**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia da Computação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Fagner de Araújo Pereira - (Orientador)

---

Prof. Dr. Moacyr Pereira da Silva - (Avaliador interno)

---

Prof. Me. Antônio Feliciano Xavier Filho - (Avaliador interno)

Campina Grande, 27 de fevereiro de 2025

**Dedicamos este trabalho a todos que contribuíram nessa jornada de enriquecimento da mente e da alma, a evolução que foi obtida nesta nobre jornada foi de valor inestimável.**

## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio e incentivo de muitas pessoas, às quais expressamos nossa sincera gratidão.

Primeiramente, agradecemos a Deus, fonte de nossa força e sabedoria. Aos nossos familiares, que sempre nos apoiaram incondicionalmente ao longo de nossa trajetória acadêmica, oferecendo suporte e incentivo nos momentos mais desafiadores.

Aos nossos professores e orientadores, que com paciência e dedicação compartilharam seu conhecimento, guiando-nos e ajudando-nos a superar os obstáculos do projeto. Suas orientações foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para nosso crescimento profissional e pessoal.

Aos nossos colegas de curso, que estiveram ao nosso lado nessa jornada, compartilhando experiências, desafios e aprendizados. O apoio e a colaboração entre todos foram essenciais para tornar essa caminhada mais enriquecedora e gratificante.

Por fim, agradecemos a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada palavra de incentivo, cada conselho e cada gesto de apoio foram fundamentais para chegarmos até aqui.

“Não creio que haja uma emoção mais intensa para um inventor do que ver suas criações funcionando. Essas emoções fazem você esquecer de comer, de dormir, de tudo.”

— **Nikola Tesla.**

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de medição e monitoramento de tensão e corrente baseado na família de microcontroladores STM32, visando atender à demanda por soluções mais precisas e acessíveis para o acompanhamento do consumo de energia. Para tal, foi desenvolvido um dispositivo composto por um circuito eletrônico de condicionamento da rede elétrica, adequando assim o sinal para a leitura pelo conversor analógico digital do microcontrolador escolhido: STM32F767ZI. Inicialmente testado em protoboard, o sistema foi posteriormente implementado em placa PCB, onde disponibiliza os sinais condicionados para serem lidos e processados pelo microcontrolador, o sensor SCT-013 para detecção de corrente e um circuito formado por resistores e amplificadores operacionais para a medição de tensão. O software embarcado foi desenvolvido na plataforma oficial fornecida pela STMicroelectronics, o STM32CubeIDE, o qual possibilita a leitura dos sinais e envio pela internet, possibilitando assim a aquisição remota, o processamento e a visualização dos dados em tempo real, permitindo a comparação dos resultados com os obtidos por instrumentos de referência. Os testes realizados demonstraram que os objetivos propostos foram alcançados, evidenciando uma solução de baixo custo, com componentes de fácil aquisição e medições precisas, comparáveis às de equipamentos comerciais, o que valida a eficácia do dispositivo para a análise da qualidade da rede elétrica.

**Palavras-Chave:** Medição. Tensão. Corrente. STM32. Smart.

## **ABSTRACT**

This paper presents the development of a voltage and current measurement and monitoring system based on the STM32 microcontroller family, aiming to meet the demand for more accurate and affordable solutions for energy consumption monitoring. To achieve this, a device was developed consisting of an electronic circuit for conditioning the power grid, thus adapting the signal for reading by the analog-to-digital converter of the chosen microcontroller, the STM32F767ZI. Initially tested on a breadboard, the system was later implemented on a PCB, where the conditioned signals are made available for reading and processing by the microcontroller, the SCT-013 sensor for current detection, and a circuit formed by resistors and operational amplifiers for voltage measurement. The embedded software, developed on the official platform provided by STMicroelectronics, named STM32CubeIDE, enables the reading of signals and internet transmission, thus enabling remote data acquisition, processing, and real-time visualization, allowing comparison of results with those obtained by reference instruments. The tests performed showed that the proposed objectives were achieved, demonstrating a low-cost solution with easily accessible components and accurate measurements comparable to commercial equipment, validating the device's effectiveness for electrical grid quality analysis.

**Keywords:** Measurement. Voltage. Current. STM32. Smart.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1.1.1 - Ilustração de um átomo, com os prótons e nêutrons compondo o núcleo atômico, e os elétrons na eletrosfera.....	13
Figura 3.2.1.1 - Simbologia de um resistor.....	17
Figura 3.2.1.2 - Componente resistor.....	18
Figura 3.2.2.1 - Simbologia de um diodo.....	19
Figura 3.2.2.2 - Componente diodo.....	19
Figura 3.2.2.3 - Simbologia do diodo Zener.....	20
Figura 3.2.2.4 - Componente diodo.....	20
Figura 3.2.3.1 - Simbologia de um capacitor.....	21
Figura 3.2.3.2 - Componente capacitor.....	21
Figura 3.2.4.1 - AmpOps simbologia.....	22
Figura 3.2.4.2 - CI Amplificador Operacional 741.....	22
Figura 3.2.5.1 - Simbologia do indutor.....	23
Figura 3.2.5.2 - Componente indutor.....	24
Figura 3.2.5.3 - Simbologia do transformador.....	25
Figura 3.2.5.4 - Transformador.....	25
Figura 3.2.6.1 - Simbologia varistor e fusível.....	26
Figura 3.2.6.2 - Varistor E Fusível.....	27
Figura 3.2.7.1.1 - Associação De Resistores Em Série.....	28
Figura 3.2.7.1.2 - Associação De Resistores Em Paralelo.....	28
Figura 3.2.7.1.3 - Associação De Resistores Mista.....	29
Figura 3.2.8.1 - Tensão Pré-Offset.....	30
Figura 3.2.8.2 - Tensão Pós-Offset.....	30
Figura 3.5.1 - Exemplo De Funcionamento De Sensor.....	33
Figura 3.5.1.1 - Exemplo De Saída De Um Sensor Analógico.....	34
Figura 3.5.1.2 - Exemplo De Saída De Um Sensor Digital.....	34

Figura 3.5.2.1.1 - Divisor Resistivo De Tensão.....	35
Figura 3.5.2.2.1 - Sensor TC Do Tipo Enrolado.....	37
Figura 3.5.2.2.2 - TC Bucha E Núcleo Dividido.....	37
Figura 3.6.1.1 - STM32F767ZI.....	38
Figura 3.6.2.1 - Saída De Um Circuito Sample & Hold Quando Estimulada Por Um Sinal Contínuo.....	39
Figura 3.6.2.2 - Comparação Entre Sinais Quantizados Com Diferentes Resoluções.....	40
Figura 3.6.2.3 - Comparação Entre Sinais Quantizados Com Diferentes Taxas De Amostragem.....	41
Figura 4.2.1.1 - Circuito divisor de tensão implementado.....	45
Figura 4.2.2.1 - Amplificador diferencial com buffer.....	48
Figura 4.2.3.1 - Circuito Grampeador.....	49
Figura 4.3.1 - Sensor de corrente TC.....	51
Figura 4.3.2 - Circuito do sensor de corrente TC.....	51
Figura 4.4.1 - Exemplo de dados enviados pelo microcontrolador.....	52
Figura 4.4.2 - Dados coletados por segundo.....	53
Figura 4.4.3 - STM32F767ZI conectado.....	53
Figura 4.5.1 - Dashboard incompleto de exibição de dados com Grafana.....	54
Figura 4.6.1 - Circuito divisor de tensão com amplificação diferencial.....	55
Figura 4.6.2 - Sinais obtidos após a queda de tensão e amplificação diferencial.....	56
Figura 4.6.3 - Montagem do circuito em Protoboard.....	57
Figura 4.6.4 - Esquemático do circuito inicial.....	58
Figura 4.6.5 - Roteamento da primeira versão do PCB.....	59
Figura 4.6.6 - CNC Bungard.....	60
Figura 4.6.7 - Vista superior da primeira prototipagem da PCB.....	61
Figura 4.6.8 - Vista inferior da primeira prototipagem da PCB.....	61
Figura 4.6.9 - Vista superior da segunda prototipagem da PCB.....	62
Figura 4.6.10 - Vista inferior da segunda prototipagem da PCB.....	62

Figura 4.6.11 - Entrada do do sensor de corrente com o amplificação de 1,31X.....	64
Figura 4.6.12 - Representação 3D do protótipo final - vista isométrica.....	64
Figura 4.6.13 - Representação 3D do protótipo final - vista superior.....	65
Figura 4.6.14 - Vista Superior da terceira prototipagem da PCB pós soldagem de componentes.	65
Figura 4.6.15 - Circuito e STM32F767ZI alocados na caixa.....	66
Figura 5.1.1 - Tensão enviada pelo STM32F767ZI ao dashboard.....	67
Figura 5.1.2 - Tensão da rede elétrica medida pelo multímetro de bancada.....	68
Figura 5.1.3 - Tensão da rede medida pelo multímetro portátil.....	68
Figura 5.1.4 - Exibição de dados em dashboard.....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de componentes.....	42
--------------------------------------	----

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ADC - Conversor Analógico-Digital

CC - Corrente Contínua

CA - Corrente Alternada

DDP - Diferença de potencial

FEM - Força Eletromotriz

PCB - Placa de Circuito impresso

SI - Sistema Internacional de Unidades

RMS - Valor Eficaz

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>4</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>8</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>9</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
1.1 Objetivo geral.....	10
1.2 Objetivos específicos.....	11
<b>2 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>11</b>
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>12</b>
3.1 Grandezas elétricas e suas relações.....	12
3.1.1 Cargas elétricas.....	12
3.1.2 Tensão elétrica.....	14
3.1.3 Resistência elétrica.....	14
3.1.4 Corrente elétrica.....	14
3.1.5 Correntes contínuas e alternadas.....	15
3.1.6 Lei de Ohm e potência elétrica.....	15
3.1.6.1 Lei de Ohm.....	15
3.1.6.2 Potência elétrica.....	16
3.2 Circuitos elétricos.....	16
3.2.1 Resistores.....	17
3.2.2 Diodos.....	18
3.2.3 Capacitores.....	20
3.2.4 Amplificadores Operacionais.....	22

3.2.5 Bobinas e fenômeno indutivo.....	23
3.2.6 Componentes de proteção.....	25
3.2.7 Circuitos resistivos.....	27
3.2.7.1 Associação de resistores.....	27
3.2.8 Deslocamento DC(offset) de tensão com AmpOp.....	29
3.3 Redes elétricas residenciais e industriais.....	31
3.3.1 Tensão e frequência.....	31
3.3.2 Distribuição de carga e eficiência energética.....	31
3.4 Monitoramento de tensão.....	32
3.5 Sensores.....	32
3.5.1 Sensores analógicos e digitais.....	33
3.5.2 Sensores de tensão e corrente.....	35
3.5.2.1 Sensor de tensão com divisor de tensão resistivo.....	35
3.5.2.2 Sensor de corrente TC.....	36
3.6 Microcontroladores.....	37
3.6.1 Microcontrolador STM32F767ZI.....	38
3.6.2 Conversores A/D.....	39
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>42</b>
4.1 Materiais.....	42
4.2 Desenvolvimento do Circuito de condicionamento de sinais de tensão e corrente.....	43
4.2.1 Divisor resistivo de tensão.....	43
4.2.2 Amplificação Diferencial.....	47
4.2.3 Circuito de offset.....	48
4.3 Sensor de corrente.....	50
4.4 Integração com o Microcontrolador.....	52
4.5 Exibição dos dados.....	53
4.6 Prototipagem.....	55

<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>66</b>
<b>5.1 Testes e validação.....</b>	<b>66</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em um mundo movido pela eletricidade, o consumo de energia elétrica ocupa uma posição central no desenvolvimento social e econômico. No Brasil, a crescente demanda por energia segue inabalável, mesmo em um cenário de desafios econômicos. Esse aumento constante, combinado com reajustes tarifários recentes (ANEEL, 2024), realça a necessidade de medidas mais eficazes para promover o uso racional e eficiente da energia.

A busca por soluções tecnológicas que permitam o uso mais eficiente da energia tem incentivado a inovação em diversos setores. Nesse contexto, o sistema de medição de energia, apresentado neste projeto, e baseado no microcontrolador STM32 surge como uma alternativa promissora, oferecendo um meio eficaz de monitoramento para redes elétricas.

Apesar dos avanços tecnológicos, o consumo de energia elétrica continua a crescer. Para comparação, entre janeiro de 2022 e o mesmo mês de 2023, observou-se um aumento de 0,6% na demanda energética. Esse cenário exige ferramentas mais precisas para a medição e análise do consumo, especialmente diante do surgimento de formas de onda não senoidais, que demandam medidores true RMS. Ao contrário dos voltímetros convencionais, que calculam o valor RMS com base nos pico da onda senoidal, pico é o valor mais máximo da onda senoidal já o vale o valor mínimo, os medidores true RMS capturam amostras ao longo do tempo, oferecendo uma leitura mais precisa, especialmente em sinais distorcidos.

Adicionalmente, com o aumento da conectividade de dispositivos eletrônicos à rede elétrica, torna-se essencial a capacidade de monitorar e avaliar a qualidade da energia fornecida. Dispositivos sensíveis a variações de tensão podem sofrer danos ou perda de eficiência devido a essas oscilações. Nesse sentido, este projeto busca oferecer uma solução robusta que, por meio do uso de um microcontrolador STM32 e um circuito de condicionamento de sinal, permite a avaliação e registro contínuo de parâmetros operacionais da rede elétrica, como tensão, corrente, potência e demanda de energia.

### 1.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um sistema de medição de tensão e corrente elétrica, utilizando um microcontrolador STM32F767ZI, capaz de realizar a coleta de amostras dos sinais de tensão e corrente da rede elétrica e exibir os dados coletados em uma interface web de fácil acesso. O sistema visa monitorar o comportamento da tensão e da corrente,

bem como outros parâmetros associados, oferecendo dados precisos do estado de operação da rede elétrica.

## 1.2 Objetivos específicos

- Projetar e implementar um circuito divisor de tensão que reduza a tensão da rede para níveis seguros e compatíveis com as entradas ADC do microcontrolador STM32F767ZI;
- Implementar um circuito condicionador de sinais usando amplificadores operacionais (AMP-OP) para realizar o ajuste de offset na tensão, de modo a transformar a leitura de um sinal alternado em um sinal contínuo, compatível com a entrada do conversor ADC do microcontrolador STM32F767ZI;
- Implementar um circuito condicionador de sinais para um sensor de corrente do tipo TC;
- Desenvolver uma interface de exibição dos dados de tensão e corrente coletados, que permita o acesso e monitoramento remoto através de uma página web ou aplicativo;
- Implementar e testar um algoritmo de cálculo de valor RMS verdadeiro (*true RMS*) no microcontrolador, assegurando medições precisas, mesmo em sinais com formas de onda não senoidais.
- Validar a precisão e segurança do sistema com medições em tempo real, verificando sua capacidade de operar dentro das faixas ideais de tensão e corrente;

## 2 JUSTIFICATIVA

O aumento contínuo da demanda por eletricidade, associado a uma infraestrutura de distribuição que frequentemente enfrenta desafios para manter a estabilidade e a qualidade do fornecimento, além de questões do próprio consumo, como equipamentos que afetam a qualidade da eletricidade da localidade, em um contexto geral, faz com que o monitoramento da energia se torne uma questão de grande relevância nos dias atuais.

A criação de um sistema de medição e monitoramento de tensão baseado no microcontrolador STM32 é uma resposta à necessidade de ferramentas mais precisas e acessíveis para o monitoramento da energia. Além de acompanhar o consumo de energia elétrica, este sistema visa detectar anomalias, como surtos de tensão ou instabilidades de rede, que podem comprometer o desempenho e a vida útil de equipamentos eletrônicos. Dispositivos sensíveis conectados à rede

podem sofrer com variações bruscas, e a ausência de monitoramento preventivo expõe consumidores e empresas a riscos operacionais e financeiros.

A justificativa para o desenvolvimento deste projeto também está fundamentada na praticidade e acessibilidade. O sistema, por integrar um circuito de condicionamento de sinal e uma interface digital, visa facilitar o acompanhamento dos dados de forma contínua e remota, tornando o monitoramento da tensão algo viável para usuários que buscam eficiência energética e maior controle sobre o consumo. Dessa forma, o projeto contribui não só para a sustentabilidade, ao incentivar o uso eficiente da energia, mas também para a segurança, ao permitir o registro e análise de eventos anômalos na rede elétrica.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Para a elaboração de um projeto de monitoramento capaz de analisar redes elétricas residenciais, foi necessário realizar estudos sobre as grandezas elétricas e suas características, a aplicação das leis de ohm e a utilização de circuitos para o condicionamento da tensão para leitura direta pelo microcontrolador STM32F767ZI, além do estudo sobre o próprio microcontrolador utilizado e as vantagens da utilização deste sistema de medição e monitoramento.

#### **3.1 Grandezas elétricas e suas relações**

A eletricidade como se compreende, é dividida e categorizada pelas grandezas elétricas, que também dizem respeito aos fenômenos ou ações aos quais se referem. As grandezas elétricas são: “carga, tensão, corrente, resistência, potência [...]”(PELEGRIM, 2020).

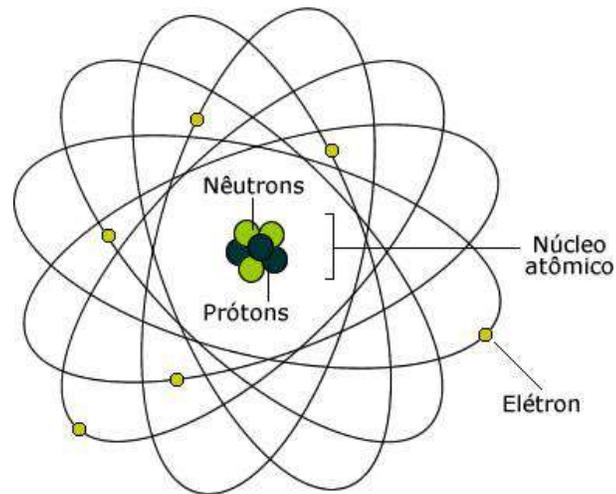
Além de abordar os conceitos das grandezas elétricas, também é fundamental estabelecer uma compreensão sólida de suas relações, que estão descritas na primeira parte de desenvolvimento deste projeto. As principais relações entre estas grandezas, são estruturadas pela Lei de Ohm e por outras fórmulas fundamentais.

##### *3.1.1 Cargas elétricas*

As cargas elétricas são uma parte fundamental da composição da matéria, sendo uma propriedade encontrada nos prótons e elétrons, que juntos formam os átomos. Dizemos que os prótons possuem carga positiva (+), os elétrons têm carga negativa (-), enquanto os nêutrons são eletricamente neutros. Os prótons e nêutrons permanecem no núcleo do átomo, enquanto os

elétrons orbitam na região externa, conhecida como camada eletrônica. As cargas atômicas estão sendo representadas pela figura 3.1.1.1.

**Figura 3.1.1.1** - Ilustração de um átomo, com os prótons e nêutrons compondo o núcleo atômico, e os elétrons na eletrosfera.



Fonte: INFOESCOLA (2024).

Os átomos de diferentes elementos se diferenciam pela quantidade de prótons e elétrons que possuem (GUSSOW, 2009). Cada tipo de átomo é definido por seu número atômico, que corresponde ao número de prótons presentes em seu núcleo. Esse número é fundamental, pois determina as propriedades químicas do elemento e sua posição na tabela periódica.

Os elétrons na camada eletrônica são responsáveis pelas ligações entre os átomos, formando assim as moléculas. A estabilidade dessas moléculas tende a depender do número de elétrons na camada de valência, que é a mais externa. No entanto, alguns materiais apresentam a característica de ceder elétrons de sua camada mais externa, permitindo que suas cargas elétricas se desloquem livremente. Esses materiais são conhecidos como condutores.

Os condutores, como o cobre e o alumínio, possuem elétrons de valência fracamente ligados ao núcleo atômico, o que facilita seu deslocamento sob a influência de um campo elétrico. Esse fenômeno ocorre devido ao campo eletrostático, no qual cargas de mesmo sinal, sejam elas negativas ou positivas, se repelem. Esse comportamento dos elétrons torna esses materiais ideais para o transporte de corrente elétrica em circuitos elétricos e eletrônicos, pois a baixa energia de ligação dos elétrons de valência permite que eles se movam livremente.

A carga elétrica é medida no Sistema Internacional de Unidades (SI) em Coulombs, representada pela letra C. Cada próton possui uma carga elementar positiva de  $+1e$ , e cada elétron possui uma carga elementar negativa de  $-1e$ , onde  $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$  (SANTOS, 2011). Esse valor representa a menor quantidade indivisível de carga elétrica e é essencial para definir as interações elétricas dos átomos e materiais condutores.

### 3.1.2 Tensão elétrica

A tensão elétrica refere-se à diferença de potencial elétrico (DDP) entre dois pontos em um meio condutor. Essa diferença surge quando há uma concentração maior de elétrons em um ponto em comparação a outro. Essa desigualdade de cargas cria uma força que tende a levar o sistema ao equilíbrio, de forma que os elétrons do ponto com maior concentração são deslocados em direção ao ponto com menor concentração. Esse fluxo de elétrons devido à DDP é o que gera a corrente elétrica, essencial para o transporte de energia nos materiais.

A tensão elétrica no SI é medida em Volt (V), e possui sua grandeza representada pela letra U.

### 3.1.3 Resistência elétrica

A resistência elétrica é uma propriedade intrínseca dos materiais que expressa a oposição ao fluxo de elétrons, ou seja, a dificuldade que um material impõe para a passagem da corrente elétrica. Essa característica varia entre os materiais: condutores como cobre e alumínio possuem resistência baixa, facilitando o movimento dos elétrons, enquanto materiais como madeira ou borracha, que têm alta resistência, atuam como isolantes. Essa resistência resulta da interação entre os elétrons e os átomos do material, o que gera dissipação de energia na forma de calor. A resistência no SI é medida em Ohms ( $\Omega$ ) e é representada pela letra R.

### 3.1.4 Corrente elétrica

O fenômeno gerado pelo deslocamento de cargas elétricas em um meio, impulsionado pela DDP, é denominado corrente elétrica. A corrente elétrica refere-se, portanto, ao fluxo de elétrons que atravessa um material, sempre no sentido do menor potencial elétrico, em busca de equilíbrio de cargas. Nos condutores, como o cobre e o alumínio, os elétrons de valência que se encontram

fracamente ligados ao núcleo são facilmente deslocados, gerando o fluxo ordenado de cargas que caracteriza a corrente elétrica.

A corrente elétrica no SI tem sua grandeza representada pela letra I, enquanto sua unidade de medida é dada pelo Ampere (A).

### 3.1.5 *Correntes contínuas e alternadas*

A corrente elétrica, resultante do movimento de cargas em um meio devido a uma DDP, apresenta variações distintas de acordo com o tipo de fluxo. Os principais tipos de corrente são a corrente contínua (CC) e a corrente alternada (CA), cada uma com características próprias.

A corrente contínua (CC) flui em um único sentido, sendo sempre positiva (+) ou negativa (-). Esse fluxo constante é utilizado em sistemas eletrônicos e dispositivos que exigem uma tensão estável, como baterias, painéis solares e circuitos eletrônicos sensíveis.

Por outro lado, a CA alterna a direção do fluxo das cargas periodicamente, variando entre positivo e negativo de acordo com uma frequência de oscilação. Essa característica permite que a energia elétrica seja transmitida de forma mais eficiente em longas distâncias, reduzindo as perdas. No Brasil, a rede elétrica opera em uma frequência padrão de 60 Hz, ou seja, o sentido da corrente se alterna 60 vezes por segundo, garantindo o suprimento de energia para dispositivos e equipamentos domésticos e industriais.

Essas diferenças entre CC e CA tornam cada tipo de corrente adequado a aplicações específicas, onde a estabilidade e a frequência de oscilação atendem a diferentes demandas energéticas e de eficiência em sistemas elétricos e eletrônicos.

### 3.1.6 *Lei de Ohm e potência elétrica*

#### 3.1.6.1 Lei de Ohm

A lei de Ohm estabelece uma relação fundamental entre tensão, resistência e corrente elétrica, sendo definida matematicamente por:

$$I = \frac{U}{R} \quad (1),$$

onde U representa a tensão elétrica (V), R representa a resistência ( $\Omega$ ) e I representa a corrente elétrica (A).

### 3.1.6.2 Potência elétrica

A potência elétrica representa a taxa de conversão de energia elétrica em outras formas de energia, como energia térmica, luminosa ou mecânica, em um intervalo de tempo. Em termos simples, é uma medida da quantidade de energia consumida ou fornecida por um dispositivo em um dado intervalo de tempo. Sua unidade de medida no SI é o watt (W), onde 1 watt equivale a 1 joule por segundo.

A potência elétrica pode ser classificada como ativa (ou real), reativa, e aparente em circuitos de corrente alternada. A potência ativa representa a energia efetivamente consumida para realizar trabalho útil, enquanto a potência reativa refere-se à energia temporariamente armazenada nos campos elétrico e magnético dos componentes reativos, como capacitores e indutores. A combinação dessas duas dá origem à potência aparente, que é a medida total do fluxo de energia no circuito, e sua unidade é o volt-ampère (VA).

A potência pode ser representada de forma matemática por:

$$P = U \cdot I \quad (2),$$

onde P é a potência, U é a tensão e I é a corrente.

## 3.2 Circuitos elétricos

Em um contexto onde a eletricidade e suas aplicações são centrais, é fundamental manipular os fenômenos eletromagnéticos para alcançar resultados específicos. Como descrito por SADIKU e ALEXANDER (2013), um circuito elétrico é “a interconexão de elementos elétricos”. Os elementos fundamentais de um circuito básico são a fonte geradora, o meio condutor e a carga.

A fonte geradora é o componente que cria a DDP ou campo elétrico necessário para movimentar as cargas no circuito, originando assim a corrente elétrica. Exemplos de fontes geradoras incluem baterias, que fornecem corrente contínua, e as turbinas hidrelétricas, responsáveis por uma significativa parcela da geração de energia elétrica no Brasil, fornecendo corrente alternada.

O meio condutor, como fios de cobre, barramentos ou linhas de transmissão, é responsável por distribuir a corrente ao longo do circuito. Em aplicações residenciais e industriais, a rede

elétrica interna e as linhas de distribuição das concessionárias de energia são exemplos de meios condutores essenciais para a transmissão da energia elétrica.

A carga em um circuito elétrico representa o componente que consome a maior parte da energia elétrica fornecida pela fonte. Em um circuito resistivo simples, a carga pode ser um resistor ou uma lâmpada incandescente.

O exemplo de um circuito elétrico simples apresentado anteriormente representa apenas o ponto de partida para a vasta diversidade de circuitos existentes. Circuitos reais, dependendo de suas aplicações, podem ser significativamente mais complexos e oferecem diferentes funções no mundo prático. As cargas nos circuitos, por exemplo, podem ter características resistivas, indutivas ou capacitivas, de acordo com a finalidade do circuito.

Cargas resistivas, como resistores, transformam a energia elétrica em calor, sendo comuns em sistemas de aquecimento e iluminação incandescente. Já as cargas indutivas, como bobinas e transformadores, armazenam energia em campos magnéticos e são amplamente empregadas em motores, geradores e sistemas de transmissão de energia. Cargas capacitivas, por sua vez, armazenam energia em campos elétricos e são essenciais em circuitos de filtragem, estabilização e temporização, como em fontes de alimentação e dispositivos de comunicação. Esses diferentes tipos de cargas possibilitam a criação de circuitos que atendem a variadas necessidades e aplicações no mundo real.

### 3.2.1 Resistores

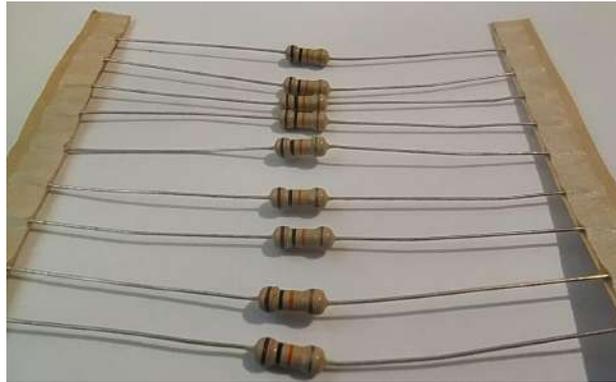
Resistores são componentes eletrônicos, capazes de oferecer resistência ao fluxo de cargas elétricas em um circuito, sendo responsáveis diretos por alterações de corrente elétrica e potência dissipada por um circuito. Simbologia e componente físico estão sendo representados pelas figuras 3.2.1.1 e 3.2.1.2.

**Figura 3.2.1.1** - Simbologia de um resistor.



Fonte: ELT GERAL (2024).

**Figura 3.2.1.2 - Componente resistor.**



Fonte: Elaborado pelos autores.

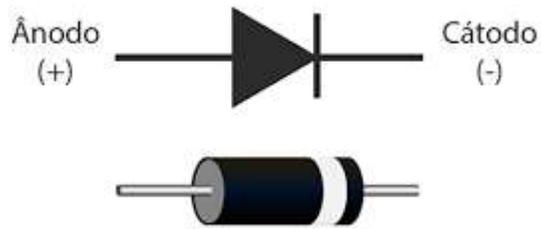
Existem diversos tipos de resistores utilizados no mercado, como os resistores de filme de carbono, resistores de filme metálico, resistores de fio, resistores de filme grosso, resistores de filme fino, resistores de carvão composto, resistores variáveis (potenciômetros e trimpots), resistores SMD (montagem em superfície), onde a utilização de cada tipo de resistor pode ser decidida de acordo com sua aplicação, para se obter melhores resultados na realização de sua função em um circuito.

### 3.2.2 Diodos

Diodos são componentes semicondutores muito versáteis e importantes na eletrônica, são componentes que permitem a passagem da corrente elétrica em um único sentido. Possuem dois terminais polarizados, ou seja, um positivo e um negativo, sendo chamados respectivamente de ânodo e cátodo. Diodos são amplamente utilizados em circuitos retificadores de tensão, proteção contra inversão de polarização, reguladores de tensão entre outros.

Sua simbologia e o componente estão sendo representados respectivamente pelas figuras 3.2.2.1 e 3.2.2.2.

**Figura 3.2.2.1** - Simbologia de um diodo.



Fonte: Usinfainfo (2024).

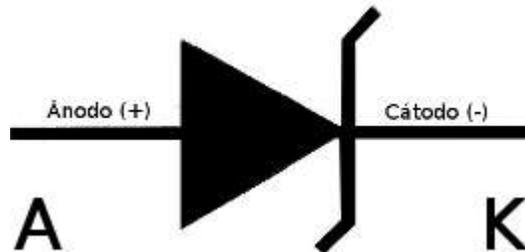
**Figura 3.2.2.2** - Componente diodo.



Fonte: AUTOCORE ROBÓTICA (2024).

Além dos diodos regulares, ainda existem diversos outros tipos de diodos. Um destes tipos é o diodo Zener, amplamente utilizado como regulador de tensão. Ele funciona de maneira diferente do diodo comum quanto à sua polarização. Quando polarizado reversamente, ele funciona como um regulador de tensão, mantendo sua tensão fixa. Simbologia e componente estão sendo representados respectivamente pelas figuras 3.2.2.3 e 3.2.2.4.

**Figura 3.2.2.3** - Simbologia do diodo Zener.



Fonte: ELETRONICA PT (2020).

**Figura 3.2.2.4** - Componente diodo.

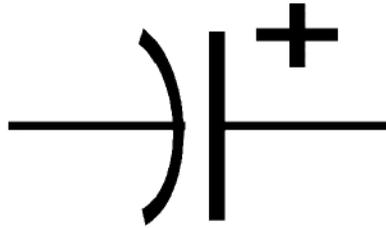


Fonte: MakerHero (2023).

### 3.2.3 Capacitores

Capacitores são componentes eletrônicos, projetados para armazenar energia por meio de campo elétrico. Eles são amplamente utilizados em circuitos elétricos para as mais diversas funções, como por exemplo; filtragem de sinais, estabilização de tensão, acoplamento e desacoplamento de circuitos, entre outras aplicações. A simbologia e o componente físico estão representados nas figuras 3.2.3.1 e 3.2.3.2.

**Figura 3.2.3.1** - Simbologia de um capacitor.



Fonte: BLOG RAISA(2023).

**Figura 3.2.3.2** - Componente capacitor.



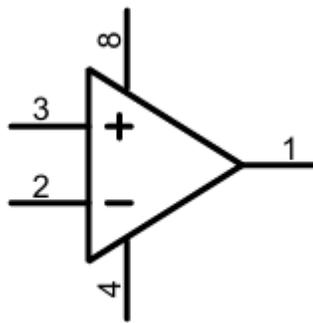
Fonte: AUTOCORE ROBÓTICA(2024).

Existem diversos tipos de capacitores utilizados no mercado, como os capacitores cerâmicos, capacitores eletrolíticos, capacitores de tântalo, capacitores de poliéster, capacitores de mica, capacitores de filme plástico e capacitores SMD (montagem em superfície). A escolha do tipo de capacitor adequado depende da aplicação desejada, levando em consideração fatores como capacitância, tensão nominal, estabilidade térmica e frequência de operação, a fim de garantir o melhor desempenho no circuito.

### 3.2.4 Amplificadores Operacionais

Os amplificadores operacionais (AmpOps), são componentes eletrônicos altamente versáteis, essenciais na eletrônica analógica. Concebidos inicialmente como meio para cálculos matemáticos analógicos, evoluíram para componentes utilizados em funções como amplificação, filtragem, comparação de sinais, integração e derivação, além de outras operações complexas. O AmpOp é um componente que possui, mais comumente, duas entradas, sendo elas uma inversora e uma não-inversora, com uma única saída. Simbologia e componente físico estão sendo representados pelas figuras 3.2.4.1 e 3.2.4.2.

**Figura 3.2.4.1** - AmpOps simbologia.



Fonte: Elaborado pelos autores com simulador de circuitos eletrônicos.

**Figura 3.2.4.2** - CI Amplificador Operacional 741.



Fonte: AUTOCORE ROBÓTICA (2024).

Sua característica principal é a capacidade de amplificar uma diferença de tensão entre duas entradas, sendo comum que ofereçam uma alta impedância de entrada e baixa impedância de saída, ideal para minimizar o impacto no circuito conectado. Essa característica de impacto mínimo no circuito, onde está inserido, permite que seja utilizado para condicionamento de sinal, em projetos que necessitam de minimizar as alterações em um sinal de origem. Em um contexto onde é necessário se obter dados de um sinal analógico, mas antes é preciso condicionar o sinal, sem afetá-lo grandemente, os AmpOps tornam-se um componente bastante útil.

Existem diversas configurações de circuitos que utilizam os AmpOps, cada uma com características e aplicações específicas. Os amplificadores operacionais podem ser configurados em modo inversor, não inversor, seguidor de tensão, diferencial, integrador e derivador, entre outros, cada uma dessas configurações servindo a finalidades distintas em circuitos analógicos.

### 3.2.5 Bobinas e fenômeno indutivo

As bobinas, também chamadas de indutores, são componentes eletrônicos cuja principal função é armazenar energia na forma de campo magnético. Elas consistem basicamente em fios enrolados, geralmente em torno de um núcleo de ar ou material ferromagnético, formando uma estrutura que reage ao fluxo de corrente elétrica. Simbologia e componente físico estão sendo representados pela figura 3.2.5.1 e 3.2.5.2.

**Figura 3.2.5.1** - Simbologia do indutor.



**Figura 3.2.5.2 - Componente indutor.**

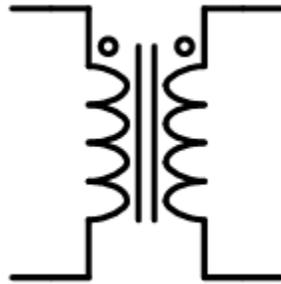


Fonte: ALIBABA (2024).

Quando uma corrente elétrica passa por uma bobina, gera-se ao seu redor um campo magnético, processo que caracteriza o fenômeno indutivo. Esse campo magnético é diretamente proporcional à corrente que passa pela bobina, e ele tende a persistir mesmo quando a corrente varia. A indutância, medida em henrys (H), quantifica a capacidade de uma bobina de gerar esse campo magnético. Quanto maior a indutância, mais energia a bobina pode armazenar em seu campo magnético.

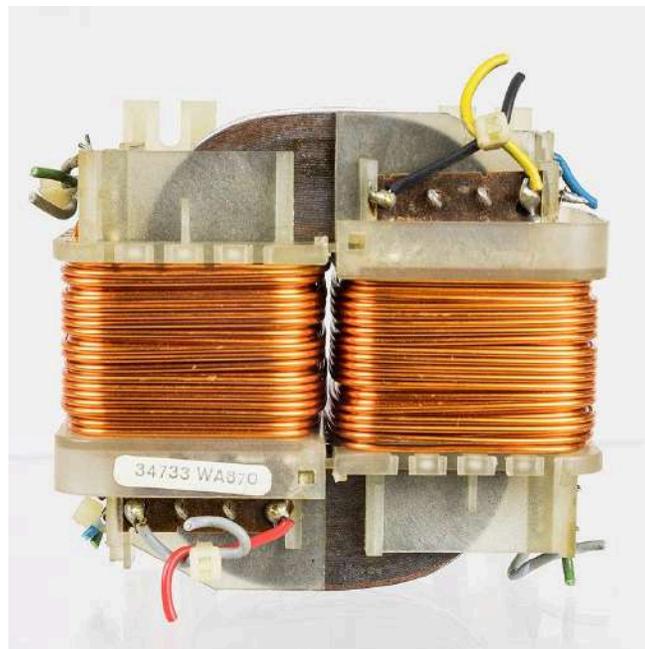
Em contrapartida, outra aplicação do fenômeno indutivo e dos indutores é a utilização de um campo eletromagnético, que permite mover as cargas elétricas presentes no fio que compõem o indutor. Quando um campo magnético variável é aplicado a uma bobina, ele induz uma FEM (força eletromotriz) que resulta na movimentação dos elétrons dentro do fio. Isso ocorre devido à interação entre o campo magnético e a corrente elétrica que passa pela bobina. Tal fenômeno é amplamente observado em transformadores de tensão, onde a tensão aplicada a um dos lados do transformador gera um campo magnético que afeta o outro lado. A relação entre o número de espiras nas bobinas primária e secundária do transformador determina se a tensão resultante será diminuída ou aumentada. Assim, se a bobina secundária possui mais espiras do que a primária, a tensão será aumentada, configurando um transformador elevador. Por outro lado, se a bobina secundária tem menos espiras, a tensão será reduzida, formando um transformador redutor. Simbologia e componente físico estão sendo representados pelas figuras 3.2.5.3 e 3.2.5.4.

**Figura 3.2.5.3** - Simbologia do transformador.



Fonte: Elaborado pelos autores com simulador de circuitos eletrônicos.

**Figura 3.2.5.4** - Transformador.



Fonte: WIKIPÉDIA (2024).

### 3.2.6 Componentes de proteção

Os elementos de proteção em um circuito são componentes responsáveis pela proteção geral de um circuito e de seus componentes. Eles agem em situações de perigo, como surtos de tensão e curtos circuitos, provenientes de fontes externas ou internas.

Fontes externas de risco incluem oscilações na rede de distribuição elétrica das concessionárias, que podem causar variações bruscas de tensão, e as redes internas, tanto residenciais quanto industriais, que podem estar sujeitas a interferências e flutuações. Já as fontes internas de risco podem resultar de mau funcionamento de um circuito, originado por componentes defeituosos ou falhas de projeto, que comprometem a operação segura do sistema.

Para mitigar esses riscos, diversos componentes de proteção são utilizados, como fusíveis, disjuntores, varistores e diodos de proteção. Esses dispositivos desempenham um papel crítico na interrupção do fluxo de corrente em caso de sobrecargas ou surtos, evitando danos permanentes aos equipamentos e garantindo a segurança do sistema elétrico como um todo. Os varistores protegem os circuitos contra surtos de tensão e os fusíveis protegem contra curto-circuitos. O uso adequado desses componentes é fundamental para a confiabilidade e a durabilidade dos circuitos, proporcionando um funcionamento seguro e eficiente. Simbologia e componentes físicos estão sendo representados pelas figuras 3.2.11 e 3.2.12.

**Figura 3.2.6.1** - Simbologia varistor e fusível.



Fonte: Elaborado pelos autores com simulador de circuitos eletrônicos.

**Figura 3.2.6.2** - Varistor E Fusível.



Fonte: AUTOCORE ROBÓTICA (2024); ELETORASTRO (2024).

### 3.2.7 Circuitos resistivos

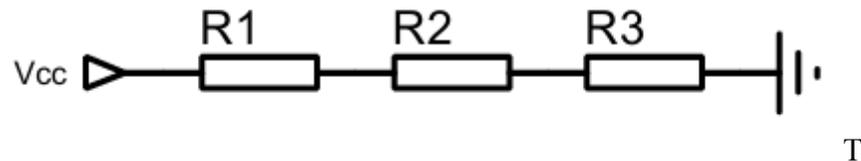
Um circuito resistivo é composto exclusivamente por elementos que oferecem resistência elétrica, sem a presença de componentes indutivos ou capacitivos. Como descrito no início da seção 3.2 deste trabalho, um exemplo básico de circuito resistivo é aquele em que a carga é puramente resistiva, de modo que a corrente e a tensão estão diretamente relacionadas pela Lei de Ohm. Esses circuitos são amplamente utilizados em aplicações práticas, como divisores de tensão e divisores de corrente, onde a resistência é a principal característica que define o comportamento do circuito.

#### 3.2.7.1 Associação de resistores

A associação de resistores permite combinar vários resistores de diferentes maneiras para se obter valores específicos de resistência equivalente, ajustando a resposta do circuito de acordo com a aplicação desejada. As configurações mais comuns são as associações em série, paralelo e mista.

Na associação em série, dois ou mais resistores são conectados de forma sequencial, em que o terminal final de um resistor se liga ao terminal inicial do próximo, conforme ilustrado na Figura 3.2.7.1.1.

**Figura 3.2.7.1.1** - Associação De Resistores Em Série.



Fonte: Elaborado pelos autores com simulador de circuitos eletrônicos.

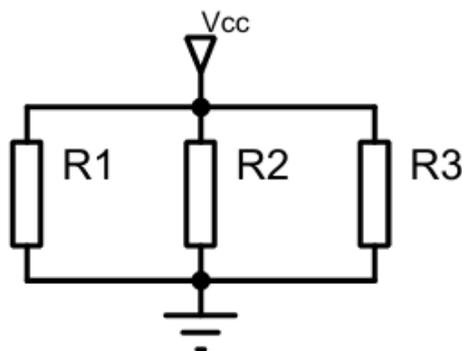
Nesse tipo de configuração, a resistência total ( $R_{eq}$ ) é a soma das resistências individuais, como descrito pela seguinte expressão:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (3).$$

A corrente elétrica que percorre os resistores em série é a mesma em todos os elementos, já que o fluxo não possui desvios. No entanto, a tensão em cada resistor depende de seu valor de resistência, resultando em uma distribuição de potência proporcional a cada resistência, um fenômeno conhecido como divisor de tensão.

Na associação em paralelo, os resistores são conectados de forma que ambos os terminais de cada resistor estão ligados entre si, formando uma configuração que permite diferentes caminhos para o fluxo de corrente, como mostra a Figura 3.2.7.1.2.

**Figura 3.2.7.1.2** - Associação De Resistores Em Paralelo.



Fonte: elaborado pelos autores com simulador de circuitos eletrônicos.

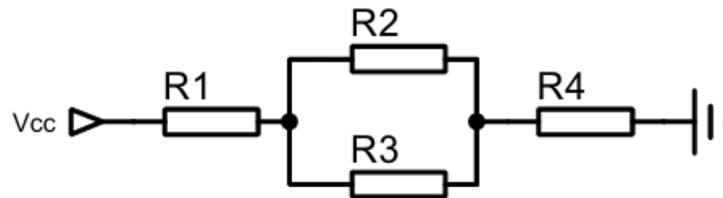
Nessa configuração, a tensão é a mesma em todos os resistores, mas a corrente total do circuito se divide entre eles. A resistência equivalente ( $R_{eq}$ ) de resistores em paralelo é dada pela fórmula:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (4).$$

Uma característica importante dessa associação é que a corrente tende a seguir o caminho de menor resistência; logo, em um conjunto de resistores paralelos com valores diferentes, a maior parte da corrente flui através do resistor de menor valor.

Em muitos circuitos, combina-se a associação em série e em paralelo para obter uma configuração mista, que aproveita as características de ambas. Esse tipo de circuito permite tanto a divisão de tensão quanto a divisão de corrente, dependendo da estrutura do circuito. Um exemplo de circuito misto é ilustrado na Figura 3.2.7.1.3 .

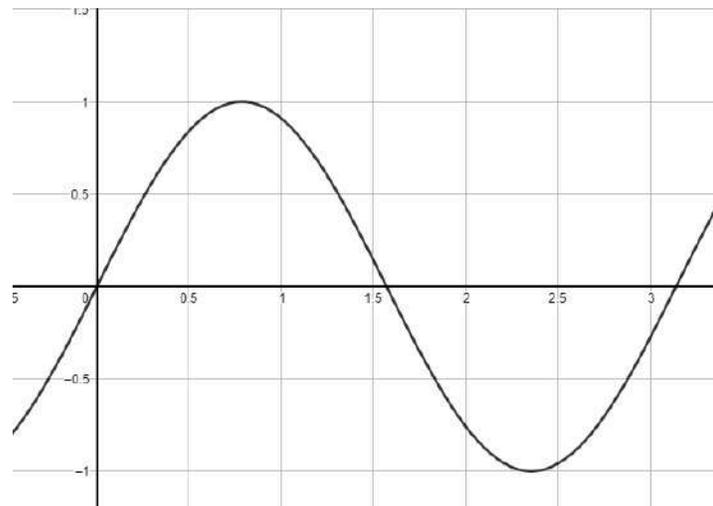
**Figura 3.2.7.1.3** - Associação De Resistores Mista.



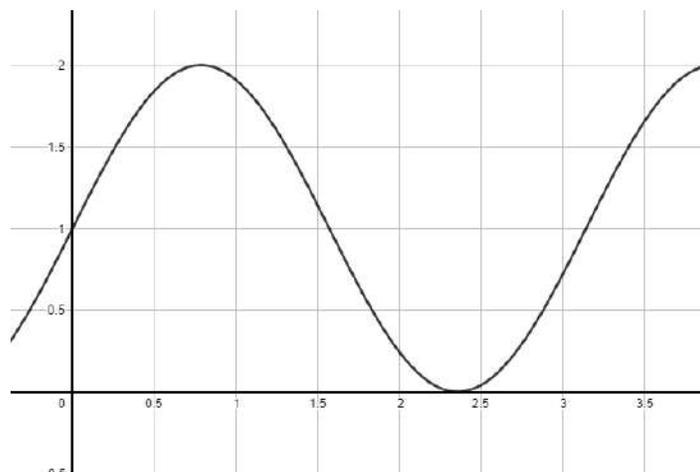
Fonte: Elaborado pelos autores com simulador de circuitos eletrônicos.

### 3.2.8 Deslocamento DC(offset) de tensão com AmpOp

A aplicação de um deslocamento de tensão DC, ou offset DC, utilizando um amplificador operacional em configuração de somador não-inversor, possibilita a elevação de um sinal AC para remover sua componente negativa, como demonstrado nas Figuras 3.2.8.1 e 3.2.8.2 .

**Figura 3.2.8.1 - Tensão Pré-Offset.**

Fonte: Elaborado pelos autores com Geogebra.

**Figura 3.2.8.2 - Tensão Pós-Offset.**

Fonte: Elaborado pelos autores com Geogebra.

Esse ajuste é particularmente útil para o condicionamento de sinais em sistemas de aquisição de dados, onde sinais de entrada que oscilam abaixo de zero poderiam gerar erros ou leituras incorretas. Por meio do deslocamento DC, o sinal é ajustado de modo que suas variações fiquem inteiramente dentro da faixa positiva, tornando-o adequado para leitura em portas ADC (conversor analógico-digital) de microcontroladores, que tipicamente operam apenas com tensões positivas.

### 3.3 Redes elétricas residenciais e industriais

As redes elétricas residenciais são sistemas de distribuição de energia elétrica projetados para atender às demandas de consumo em residências, fornecendo eletricidade de maneira segura e eficiente para diversos tipos de equipamentos, desde iluminação até eletrodomésticos de alta potência, como chuveiros e condicionadores de ar. Essas redes operam em baixa tensão e são construídas com base em normas específicas para garantir segurança, funcionalidade e economia.

#### 3.3.1 Tensão e frequência

No Brasil, a tensão monofásica de fornecimento em redes residenciais pode ser de 127 V ou 220 V, dependendo da região, enquanto a frequência é de 60 Hz. Essa variação de tensão ocorre em função de decisões regionais de distribuição e, em alguns casos, da disponibilidade de transformadores de distribuição. A tensão de 127 V é comum em residências em estados como São Paulo e Minas Gerais, enquanto a tensão de 220 V é predominante em outras regiões. Em países onde a frequência é de 50 Hz, ajustes nos aparelhos são feitos para compatibilidade, mas o princípio de operação da rede residencial permanece o mesmo.

#### 3.3.2 Distribuição de carga e eficiência energética

Redes elétricas residenciais devem ser projetadas para atender de forma eficiente às demandas energéticas de cada residência, evitando problemas como sobrecargas e desperdícios de energia. No entanto, é comum haver falhas de dimensionamento e a utilização inadequada de materiais, especialmente quando não se seguem padrões técnicos de elaboração e implantação dos projetos elétricos.

A eficiência energética pode ser otimizada pela escolha de componentes de alta qualidade e pela utilização de dispositivos economizadores de energia, como as lâmpadas LED, que reduzem o consumo em comparação com tecnologias convencionais.

### 3.4 Monitoramento de tensão

O crescente consumo de energia elétrica e a qualidade desse fornecimento são aspectos fundamentais para a eficiência energética em residências. A perda de equipamentos devido a surtos elétricos e o desperdício de energia, refletido nas contas de luz, destacam a importância de dispositivos capazes de monitorar e avaliar a qualidade da energia utilizada. A utilização de sistemas de monitoramento energético em redes elétricas residenciais é uma solução eficaz para acompanhar o consumo em tempo real, identificar setores com maior demanda e avaliar o uso individual de cada aparelho. Isso não apenas ajuda a evitar danos aos equipamentos, mas também permite a identificação de pontos de desperdício energético, proporcionando ao usuário um controle mais eficiente e econômico do consumo.

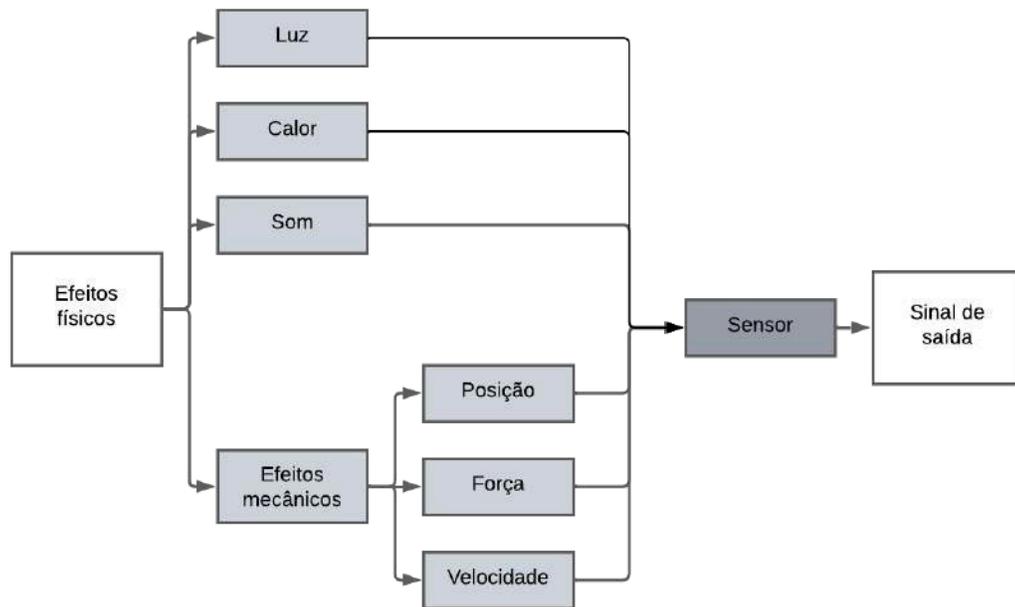
Além disso, é crucial considerar a presença de potências reativas geradas por alguns equipamentos elétricos, como motores e aparelhos com componentes indutivos ou capacitivos. Essa potência reativa, que não realiza trabalho útil, pode gerar instabilidades na rede elétrica e comprometer a eficiência do sistema, além de aumentar os custos de energia em instalações onde se aplica a cobrança por baixo fator de potência. O controle e a correção do fator de potência são práticas que evitam tais desequilíbrios, melhorando a qualidade do fornecimento de energia e a eficiência do consumo residencial.

Esses pontos ressaltam a importância de um planejamento elétrico adequado e do uso de tecnologias que monitoram e auxiliam a corrigir a qualidade da energia, otimizando o consumo e prolongando a vida útil dos equipamentos.

### 3.5 Sensores

Sensores são dispositivos que possibilitam a observação e a análise de fenômenos específicos, permitindo inferências sobre variáveis de interesse. Normalmente, os sensores são sensíveis a elementos naturais, como luz, calor e energia cinética, sendo utilizados para medir grandezas físicas essenciais para diversos sistemas industriais e tecnológicos (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2013). Entre as grandezas que podem ser mensuradas, destacam-se tensão, corrente elétrica, temperatura, pressão, entre outras. Neste capítulo se tratará, principalmente, sobre sensores para CA. A figura 3.5.1 demonstra o funcionamento dos sensores quanto aos elementos físicos.

**Figura 3.5.1 - Exemplo De Funcionamento De Sensor.**



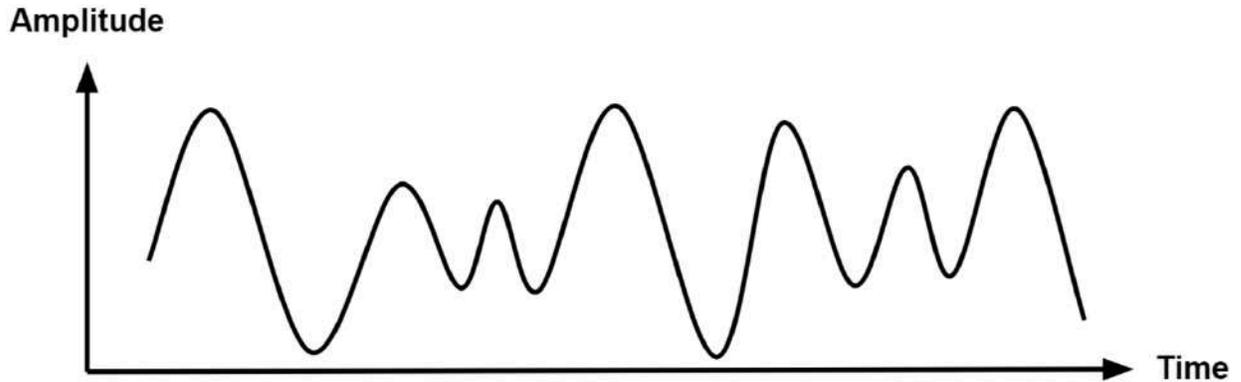
Fonte: Elaborado pelos autores com Lucidchart, baseado em THOMAZINI, ALBUQUERQUE. (2013, pg. 18)

### 3.5.1 Sensores analógicos e digitais

Existem dois principais tipos de sensores, classificados de acordo com o tipo de sinal de saída: os sensores com saída analógica e os com saída digital.

Um sinal analógico se caracteriza por ser contínuo e por representar de forma análoga o fenômeno físico ao qual está associado. Sensores com saída analógica produzem um sinal que varia de maneira contínua em resposta ao estímulo do elemento natural a que são sensíveis, assumindo qualquer valor dentro de um intervalo operacional. Isso permite uma representação direta e contínua do fenômeno observado. Por exemplo, um sensor de temperatura analógico gera uma tensão variável em função da temperatura medida, como ilustrado na Figura 3.5.1.1.

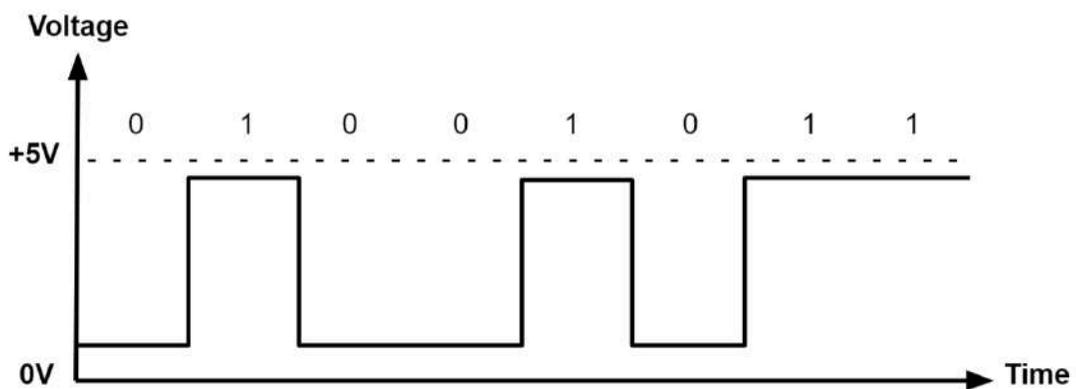
**Figura 3.5.1.1** - Exemplo De Saída De Um Sensor Analógico.



Fonte: MONOLITHIC POWER SYSTEMS (2022).

Por outro lado, um sinal digital é discreto e composto por valores binários (0s e 1s). Esse tipo de saída é adequado para sistemas que processam dados em forma digital e utilizam protocolos específicos de comunicação que variam de acordo com o sensor e são definidos pelo fabricante. Os sensores digitais convertem o fenômeno físico em um formato discretizado, o que facilita a interpretação direta pelo sistema ou equipamento que processará as informações. A Figura 3.5.1.2 ilustra uma saída típica de um sensor digital.

**Figura 3.5.1.2** - Exemplo De Saída De Um Sensor Digital.



Fonte: MONOLITHIC POWER SYSTEMS (2022).

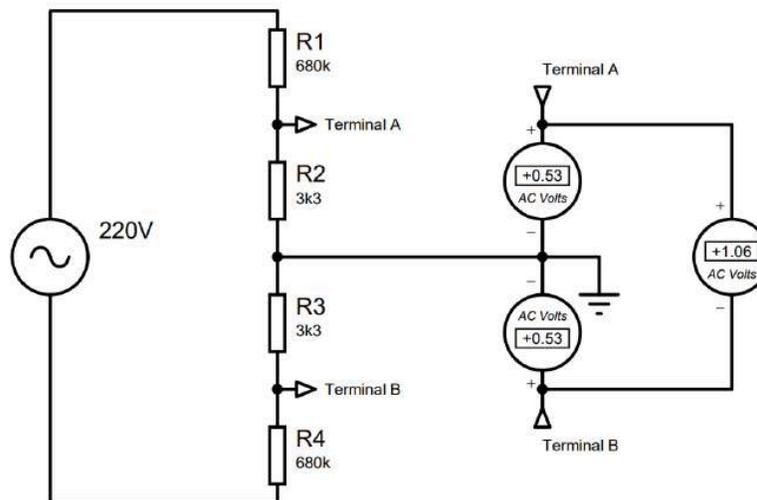
### 3.5.2 Sensores de tensão e corrente

Dentre os vários tipos de sensores, existem aqueles utilizados para medir grandezas elétricas, como tensão e corrente. Os sensores focados na tensão são utilizados para medir a diferença de potencial entre dois pontos, enquanto os sensores de corrente são utilizados para medir o fluxo de elétrons em um meio condutor.

#### 3.5.2.1 Sensor de tensão com divisor de tensão resistivo

O divisor de tensão é composto por dois ou mais resistores conectados em série, de modo que a tensão total aplicada no circuito seja dividida proporcionalmente entre os resistores, de acordo com suas resistências. Dessa forma, a tensão entre os terminais de um dos resistores representa uma fração da tensão total, permitindo a leitura de sinais de tensão elevados, que seriam perigosos ou incompatíveis diretamente com o dispositivo de medição.

**Figura 3.5.2.1.1 - Divisor Resistivo De Tensão.**



Fonte: Elaborado pelos autores com simulador de circuitos eletrônicos.

A Lei de Ohm ( $U = I \cdot R$ ) permite calcular a tensão em cada resistor. Dado o exemplo de circuito da figura 3.5.2.1.1; se tivermos uma tensão total  $U_{in} = 220V$  aplicada sobre resistores  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ , em série, a tensão  $U_{out}$  medida no terminal A, será dada pela fórmula:

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$

$$U_{out} = 220V \cdot \frac{3K3}{680K + 3K3 + 3K3 + 680K} \approx 531mV \quad (5).$$

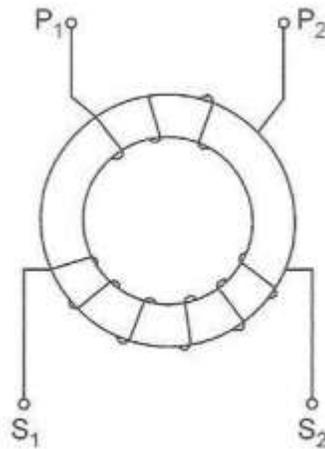
Esse método é amplamente utilizado em circuitos que requerem monitoramento de tensão, como em microcontroladores, onde é necessário adaptar tensões altas para níveis seguros para o sistema, mantendo a integridade dos componentes.

### 3.5.2.2 Sensor de corrente TC

Um sensor de corrente do tipo TC (ou transformador de corrente) é um dispositivo que mede a corrente elétrica utilizando o campo eletromagnético gerado por uma corrente alternada que passa por um condutor. Funcionando de maneira semelhante a um transformador, ele consiste em um enrolamento de espiras em torno de um núcleo de material ferromagnético. Esse núcleo concentra o campo eletromagnético criado pela corrente, induzindo uma FEM proporcional em um segundo enrolamento de espiras, sem contato direto com a corrente que está sendo medida.

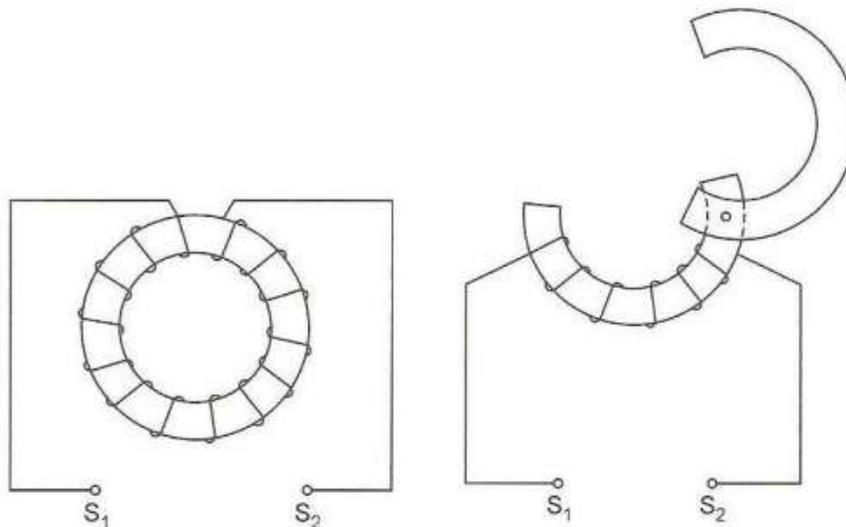
Os TC invasivos precisam ser conectados diretamente ao condutor, muitas vezes inseridos em série com o circuito. Já os não-invasivos, envolvem o condutor sem a necessidade de desconexão, geralmente na forma de pinças ou sondas de corrente. Esses são bastante comuns para medições temporárias ou em situações onde o acesso direto ao condutor não é viável. Estes dois tipos de TC são exemplificados pelas figuras 3.5.2.2.1 e 3.5.2.2.2.

**Figura 3.5.2.2.1 - Sensor TC Do Tipo Enrolado.**



Fonte: THOMAZINI, ALBUQUERQUE. (2013, pg. 179)

**Figura 3.5.2.2.2 - TC Bucha E Núcleo Dividido.**



Fonte: THOMAZINI, ALBUQUERQUE. (2013, pg. 180)

### 3.6 Microcontroladores

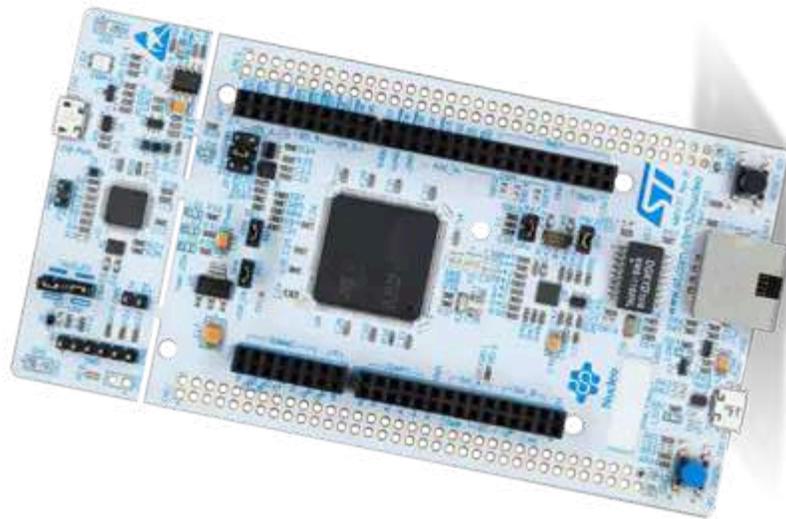
Segundo TANENBAUM e STRUTHER (2017), microcontroladores são computadores embutidos que não são comercializados como computadores convencionais. Esses dispositivos são

amplamente utilizados em uma variedade de aparelhos e geralmente possuem uma arquitetura simplificada, possuindo um preço menor em comparação a computadores comuns. Apesar de sua simplicidade, os microcontroladores apresentam uma vasta gama de modelos e configurações, com periféricos de entrada e saída(E/S) integradas, o que os torna capazes de realizar diferentes tarefas de acordo com as exigências dos equipamentos onde são instalados, proporcionando flexibilidade e adaptabilidade.

### 3.6.1 *Microcontrolador STM32F767ZI*

O STM32F767ZI é uma série de microcontroladores de alto desempenho da família STM32 da STMicroelectronics, baseada no núcleo ARM Cortex-M7. Essa série é voltada para aplicações que exigem grande poder de processamento e suporte a periféricos avançados, oferecendo uma combinação de velocidade, eficiência e recursos integrados, o que a torna ideal para sistemas embarcados complexos e sistemas de aquisição de dados.

**Figura 3.6.1.1 - STM32F767ZI.**



Fonte: MOUSER ELECTRONICS (2025).

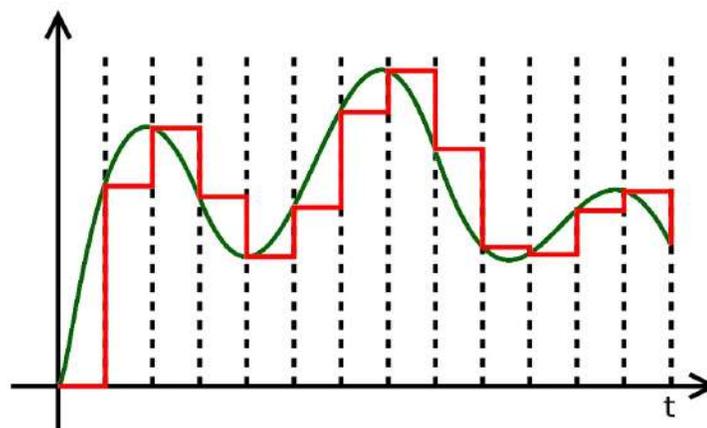
### 3.6.2 Conversores A/D

Os conversores A/D (ADC - Analog-to-Digital Converter) são componentes fundamentais em sistemas microcontrolados para a transformação de sinais analógicos em digitais. O ADC converte um sinal analógico contínuo em uma representação digital discreta.

Tais conversores operam com conceitos de resolução e taxa de amostragem, e estão sujeitos a erros decorrentes de ruídos e erros de quantização. O funcionamento desses dispositivos depende de uma faixa de valores (range) mínimo e máximo de sinal, conforme definido pelo microcontrolador.

A resolução de um conversor refere-se ao número de bits usados para representar o sinal convertido. Quanto maior a resolução em bits, maior será o número de valores que o ADC pode diferenciar, representado por  $2^{\text{bits}}$ . Por exemplo, um ADC com resolução de 8 bits pode diferenciar  $2^8 = 256$  níveis de sinal. Portanto, ao aumentar o número de bits, a conversão se torna mais precisa, permitindo uma representação mais fiel ao sinal original e reduzindo as perdas. Na Figura 3.6.2.1, é exemplificada a comparação entre o sinal original e o sinal convertido, mostrando o efeito da resolução sobre a qualidade do sinal. Vale ressaltar que quanto maior a resolução utilizada remete a um maior tempo para a conversão dos dados.

**Figura 3.6.2.1** - Saída De Um Circuito *Sample & Hold* Quando Estimulada Por Um Sinal Contínuo.



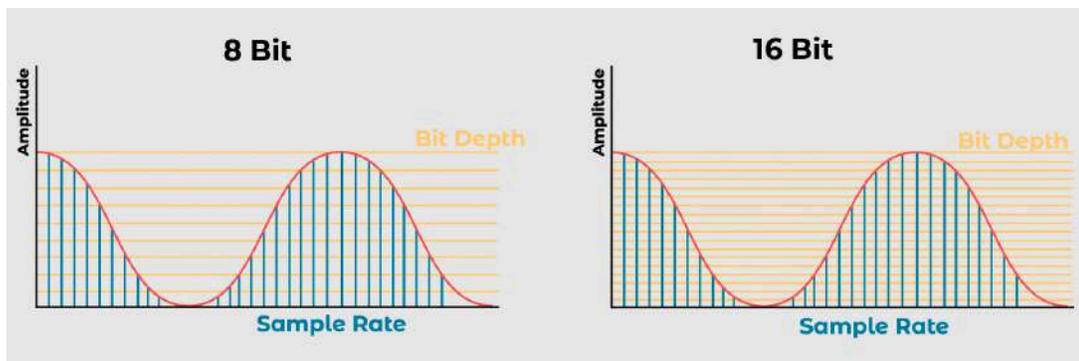
Fonte: Embarcados (2024).

A taxa de amostragem é a frequência (em Hz) com que o conversor coleta amostras do sinal analógico para realizar a conversão. Conforme o Teorema de Nyquist, a taxa de amostragem

deve ser pelo menos o dobro da maior frequência presente no sinal original para evitar *aliasing*, uma distorção que ocorre quando a frequência de amostragem é insuficiente para representar corretamente o sinal.

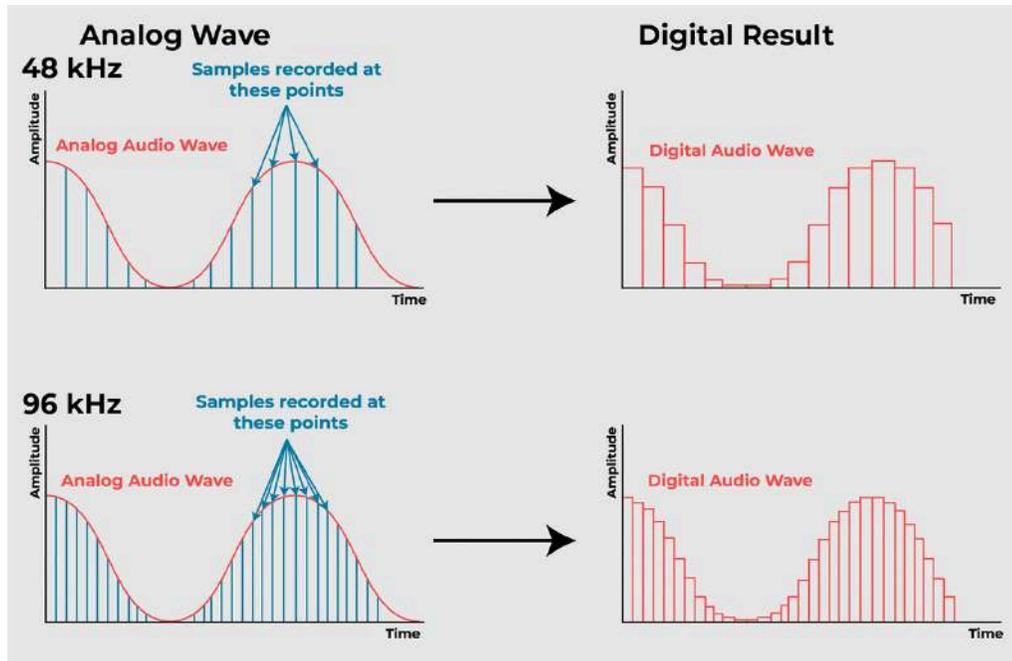
O erro de quantização resulta da limitação inerente da discretização em um conversor, onde o sinal analógico contínuo é mapeado para um conjunto finito de valores digitais. Esse erro é inevitável, pois valores próximos no sinal podem ser representados por um mesmo valor digital, especialmente em conversores com baixa resolução. Quanto maior a resolução, menor é o erro de quantização, desde que a taxa de amostragem seja suficiente para representar um sinal, a fim de evitar *aliasing*, como mostrado nas Figuras 3.6.2.2 e 3.6.2.3, sobre conversão de sinais de áudio.

**Figura 3.6.2.2** - Comparação Entre Sinais Quantizados Com Diferentes Resoluções.



Fonte: WOODANDFIRE STUDIO (2023).

**Figura 3.6.2.3 - Comparação Entre Sinais Quantizados Com Diferentes Taxas De Amostragem.**



Fonte: WOODANDFIRE STUDIO (2023).

Além do erro de quantização, os ruídos presentes no sinal também afetam a precisão da conversão. Ruídos podem introduzir variações inesperadas, comprometendo a integridade do sinal convertido e, por consequência, a exatidão dos dados em sistemas que dependem dessa informação para funcionar corretamente.

## 4 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste projeto foi estruturado em etapas sequenciais, abrangendo desde a concepção do sistema até sua validação prática. O objetivo central foi projetar e implementar um analisador de tensão e corrente que utilizasse um microcontrolador STM32 para realizar medições em tempo real, com alta precisão e confiabilidade, assegurando a compatibilidade com redes elétricas convencionais e a capacidade de identificar anomalias, como surtos e quedas de tensão.

### 4.1 Materiais

A tabela 1 a seguir apresenta os componentes utilizados no desenvolvimento do projeto.

Tabela 1 - Lista de componentes.

Referências	Componente	Valor	Quantidade
STM32F767ZI	Microcontrolador	-	1
C1-C4, C6, C8, C10, C18	Capacitor	100nF	8
C5, C7, C9, C11, C12, C14, C16, C17	Capacitor	10uF	8
C13	Capacitor	100uF	1
R1, R2	Resistor	680K $\Omega$	2
R3, R4	Resistor	3.3K $\Omega$	2
R5, R6	Resistor	27 $\Omega$	2
R7-R9, R12	Resistor	10K $\Omega$	4
R10-R11, R14-R15	Resistor	10K $\Omega$	4
R16	Resistor	12K $\Omega$	1
R17	Resistor	9.1K $\Omega$	1
U1, U3, U6	CI	LM6132A	3
U2	CI	LM1117T-3, 3	1

U4	CI	HLKPM01	1
U5	CI	ICL7660	1
D1, D2	Diodo Zener	1N4728A	2
D3-D6	Diodo	1N4148	4
FUS	Fusível	1A/250V	1
J1-J4	Conector fêmea	TBLOCK-I2	4
L1-L2	Indutor	27R	2
VR2	Varistor	S07275	1

Fonte: Elaborado pelos autores.

## 4.2 Desenvolvimento do Circuito de condicionamento de sinais de tensão e corrente

A medição da tensão é feita com base na leitura dos sinais de entrada, obtidos através da divisão de tensão onde a combinação de resistores em série é usada, os quais são posteriormente processados por meio de um circuito de condicionamento para atingir níveis adequados antes de serem enviados ao microcontrolador.

### 4.2.1 Divisor resistivo de tensão

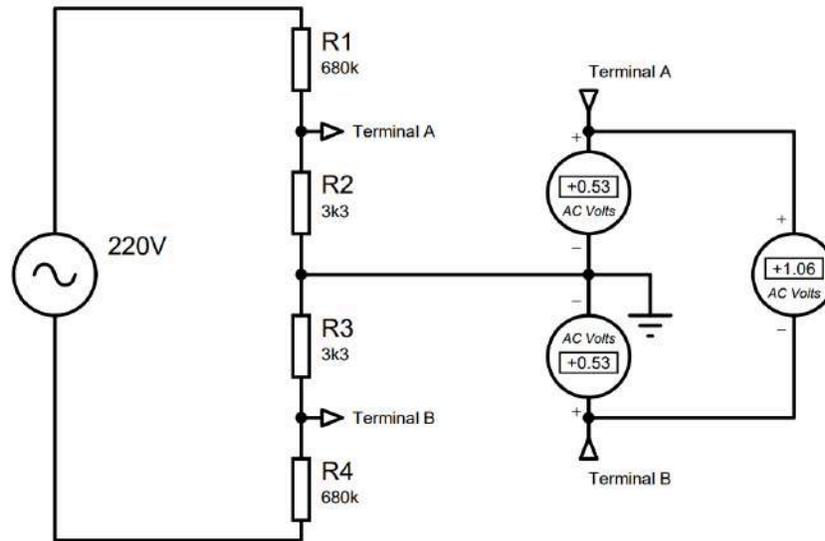
Na elaboração do projeto, foi necessário, primeiramente, reduzir a tensão da rede elétrica para níveis adequados à leitura pelo microcontrolador STM32F767ZI. A tensão típica da rede elétrica (~220 V RMS ou ~311 V de pico) precisava ser ajustada para um intervalo seguro entre 0 V e 3,3 V, valores correspondentes aos limites das entradas ADC do microcontrolador. Na elaboração do projeto foi necessário reduzir a tensão de 220V para os níveis adequados para o microcontrolador.

Para atingir esse objetivo, foi implementado um divisor de tensão resistivo como etapa inicial do circuito. Essa configuração utiliza resistores em série e, estrategicamente, em paralelo ao restante do circuito. A escolha dos valores dos resistores considerou tanto a divisão proporcional da tensão quanto o controle da potência dissipada em cada componente, minimizando riscos térmicos. Além disso, foi levada em conta a corrente resultante, que foi ajustada para garantir segurança durante o manuseio do circuito, especialmente em relação ao contato humano.

Um conjunto de resistores associados em série em um circuito elétrico constitui um divisor de tensão, no qual cada resistor dissipa uma fração da potência total do circuito, resultando em uma queda de tensão proporcional em cada um deles. Neste projeto, foi implementado um divisor de tensão para obter uma fração específica da tensão fornecida pela fonte de energia. A definição dos valores das resistências foi baseada na aplicação das Leis de Ohm e de Kirchhoff, garantindo que as especificações iniciais fossem atendidas. Dessa forma, foi possível alcançar valores adequados para as tensões de pico e vale, mantendo-as dentro do intervalo permitido pelo microcontrolador após a operação de offset. Além disso, foram considerados critérios de segurança, como a dissipação de potência limitada em cada resistor, para evitar o excesso de calor, e uma corrente reduzida, segura para o manuseio humano.

A amplitude do sinal a ser lido pelo microcontrolador também foi levada em consideração na definição dos resistores. O microcontrolador utilizado opera com uma faixa de leitura de 0 V a 3,3 V, sendo necessário que a tensão de pico do divisor de tensão fosse inferior à metade do valor máximo de leitura. Isso ocorreu para acomodar o aumento da tensão de pico causado pelo deslocamento positivo do sinal após a operação de offset, que transforma a parte negativa em positiva. Após análise dos valores comerciais disponíveis, foram selecionados resistores de 680 k $\Omega$  e 3,3 k $\Omega$  para compor o divisor de tensão, permitindo atender às especificações do projeto. Essa configuração foi escolhida devido à sua compatibilidade com a tolerância, potência de dissipação e características comerciais dos resistores. A implementação final do divisor de tensão está ilustrada na Figura 4.2.1.1.

Figura 4.2.1.1 - Circuito divisor de tensão implementado.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A potência dissipada em cada resistor, nesta fase inicial, é importante de ser considerada, pois vai permitir que o projeto evite emissão desnecessária de calor e o circuito trabalhe de forma segura.

Dadas as relações matemáticas da Lei de Ohm, é possível encontrar a corrente circulante em um resistor por meio da equação (1), já apresentada anteriormente, sendo ela:

$$i = \frac{U}{R}.$$

Já para o cálculo da potência de uma carga em um circuito, pode-se utilizar a equação (2), também apresentada anteriormente, sendo ela:

$$P = U \cdot i \text{ ou } P = \frac{U^2}{R}.$$

Dados os valores propostos pelo projeto, para tensão de entrada e corrente, e as fórmulas de equação da lei de Ohm e potência, inicialmente devemos obter o valor da corrente do circuito, que devido às suas características, como circuito resistivo em série, se mantém a mesma para todos os resistores. Para se obter o valor da corrente na carga, utilizamos da lei de Ohm, onde realizamos as seguintes operações:

$$i = \frac{U}{R}$$

$$i = \frac{220V}{(680k\Omega \cdot 2) + (3.3k\Omega \cdot 2)}$$

$$i \approx 160,98\mu A$$

Dado o valor obtido para a corrente, o valor de tensão para cada resistor teve de ser calculado para que pudesse ser obtida a potência em cada um, e para isso foi utilizado a fórmula de para diferença de potencial da lei de Ohm:

$$U = R \cdot i$$

Dada a fórmula matemática anterior, foi possível obter os valores da tensão para cada valor de resistência no circuito, da seguinte maneira:

- **Resistores de 680k Ohm:**

$$U = R \cdot i$$

$$U = 680k\Omega \cdot 160,98\mu A$$

$$U \approx 109,47V$$

- **Resistores de 3.3k Ohm:**

$$U = R \cdot i$$

$$U = 3.3k\Omega \cdot 160,98\mu A$$

$$U \approx 531,2mV$$

Dadas as tensões em cada resistor, a potência pôde ser calculada com a fórmula de potência:

- **Resistores de 680k Ohm:**

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$P = \frac{109,47V^2}{680k\Omega}$$

$$P \simeq 17.62mW$$

- **Resistores de 3.3k Ohm:**

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$P = \frac{53.12mV^2}{3.3k\Omega}$$

$$P \simeq 85.50\mu W$$

Como cada resistor escolhido pode dissipar uma potência de no máximo 1/8W (Watts) ou 0,125W, podemos concluir que os resistores estão operando bem abaixo de sua capacidade máxima. Isso garante uma operação estável e confiável do circuito, mesmo em condições de uso prolongado ou em situações de variação de temperatura.

#### 4.2.2 Amplificação Diferencial

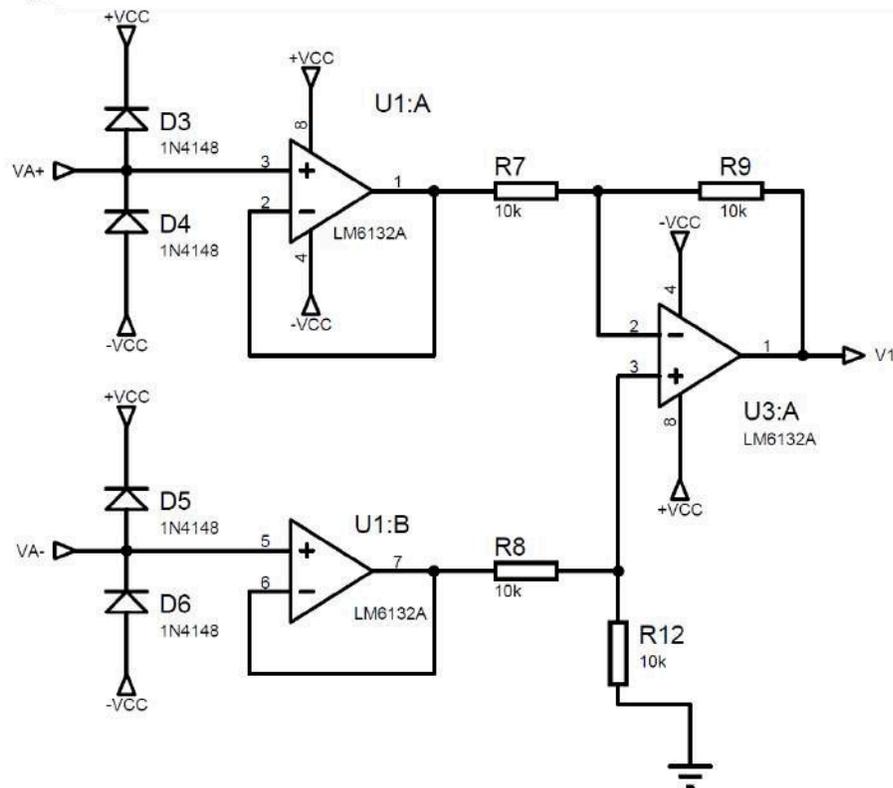
Um amplificador diferencial é um circuito baseado em um AmpOp, configurado para amplificar a diferença entre duas tensões de entrada, enquanto rejeita sinais comuns às duas entradas. Sendo que para sua configuração é necessário adicionar resistores em suas entradas, como o circuito abordado por esse trabalho é um divisor de tensão resistivo, ao adicionar esses resistores, o sinal seria alterado, fazendo assim a necessidade de usos de buffers.

Um buffer é um circuito eletrônico, geralmente baseado em um AmpOp, configurado como seguidor de tensão. Sua principal função é isolar circuitos, garantindo que as características do sinal de entrada sejam preservadas ao longo do circuito, sem interferências causadas por carga ou impedância.

A implantação de um buffer no projeto, veio da necessidade de isolar o amplificador diferencial do divisor de tensão. O divisor de tensão possui uma impedância de saída relativamente alta, e o buffer isola o divisor de tensão do circuito de amplificação diferencial, garantindo que a impedância de saída do divisor não interfira no funcionamento do amplificador diferencial. Com alta impedância de entrada e baixa impedância de saída, o buffer preserva a integridade do sinal, evitando distorções ou alterações indesejadas.

O buffer implementado no projeto é mostrado na Figura 4.2.2.1, onde os amplificadores U1:A e U1:B são os buffers, um para fase e outro para neutro, já o amplificador U3:A com os resistores R7,R8 e R9 implementam o circuito para a amplificação diferencial :

Figura 4.2.2.1 - Amplificador diferencial com buffer.



Fonte: Elaborado pelos autores.

#### 4.2.3 Circuito de offset

O circuito de *offset* é uma parte fundamental para a construção deste projeto, pois ele realiza o condicionamento de sinal, necessário para a leitura do ADC do microcontrolador. No desenvolvimento deste circuito foi utilizado um circuito grampeador, utilizando o amplificador operacional LM6132. A escolha do amplificador operacional LM6132 no desenvolvimento do analisador de tensão e corrente elétrica deve-se às suas características que atendem diretamente às necessidades do projeto. Este componente, com operação *rail-to-rail* nas entradas e saídas, permite

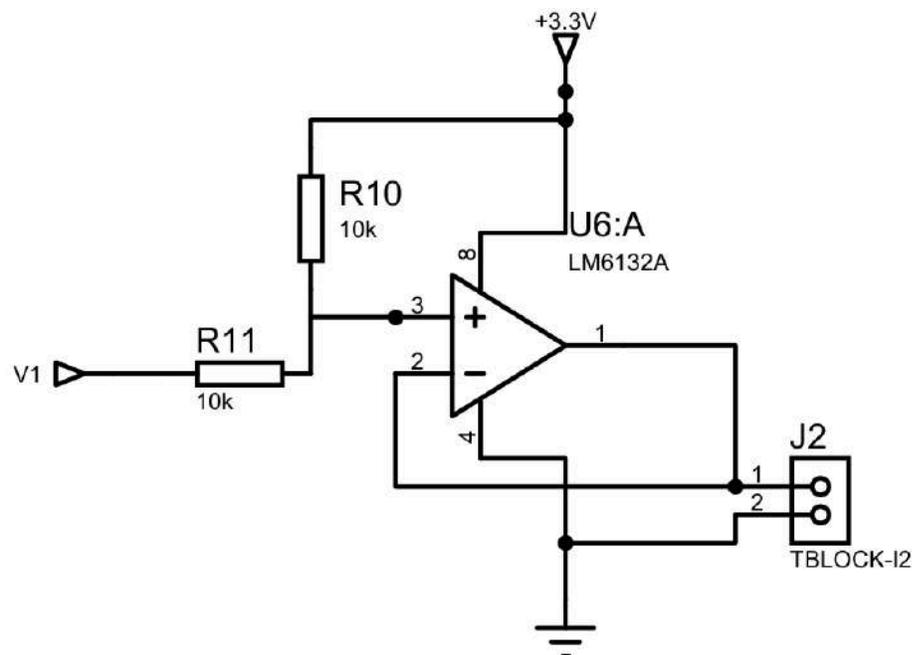
o condicionamento de sinais com máxima utilização do intervalo de tensão disponível, essencial para a leitura precisa pelo microcontrolador STM32.

Com uma largura de banda de 10 MHz e taxa de variação de 12 V/ $\mu$ s, o LM6132 oferece resposta rápida às variações dos sinais da rede elétrica, garantindo a captura confiável de valores de pico e vale. Sua compatibilidade com tensões de alimentação de 2,7 V a 24 V proporciona flexibilidade no design do circuito, enquanto o baixo consumo de 360  $\mu$ A por amplificador contribui para a eficiência energética do sistema.

Além disso, a alta imunidade a ruídos e variações de alimentação torna o LM6132 ideal para aplicações que demandam estabilidade e precisão. Por essas razões, o LM6132 é uma escolha estratégica para o sucesso do projeto.

A configuração do AmpOp escolhida foi a de grampeador, onde é utilizado para remover a parte negativa do sinal original de entrada, para esta configuração são necessários 1 AmpOp e 2 resistores com os valores de 10K Ohm. O circuito grampeador é mostrado na figura 4.2.3.1 abaixo:

Figura 4.2.3.1 - Circuito Grampeador.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O sinal do buffer de entrada é então encaminhado ao grampeador, que realiza a operação de ajuste do nível DC do sinal (offset). Essa etapa é fundamental para transformar um sinal alternado (AC), que varia entre valores positivos e negativos, em um sinal unipolar. Após o grampeador, o sinal está pronto para ser processado pelo ADC do microcontrolador.

### **4.3 Sensor de corrente**

Durante a segunda metade do processo de desenvolvimento, foi identificada a necessidade de ampliar o escopo inicial do projeto. A proposta original era focada exclusivamente na coleta de dados de tensão, com o objetivo de verificar anomalias e avaliar a qualidade do sinal disponível na rede elétrica. No entanto, para fornecer uma análise mais completa e permitir a inferência sobre o consumo de energia, tornou-se imprescindível incluir a capacidade de analisar a potência dissipada pelas cargas conectadas à rede interna da localidade. Essas cargas correspondem aos equipamentos e dispositivos em uso no ambiente monitorado.

Para realizar essa análise de potência, foi necessário coletar dados de corrente, além dos dados de tensão já disponíveis. Optou-se por um método não invasivo para a medição da corrente, garantindo maior praticidade e segurança na instalação do sistema.

O componente escolhido foi um sensor de corrente não-invasivo do tipo TC dividido (Transformador de Corrente dividido). Esse sensor é baseado em um indutor com núcleo ferromagnético seccionado, que permite medir a corrente alternada que passa pelo condutor sem a necessidade de desconectá-lo. O princípio de funcionamento do sensor baseia-se no fenômeno da indução magnética: a corrente que flui pelo condutor cria um campo magnético, e o sensor, ao envolver o condutor, captura esse campo e converte-o proporcionalmente em um sinal elétrico utilizável.

Essa adaptação no projeto possibilitou a obtenção de medições simultâneas de tensão e corrente, fundamentais para o cálculo da potência dissipada pelas cargas. Dessa forma, o sistema ampliou sua funcionalidade, permitindo não apenas identificar anomalias de tensão, mas também monitorar o consumo de energia elétrica, oferecendo informações valiosas para análises mais detalhadas e tomadas de decisão sobre eficiência energética.

O sensor TC escolhido foi o TC SCT 013 30A/1V, mostrado na figura 4.3.1, a seguir.

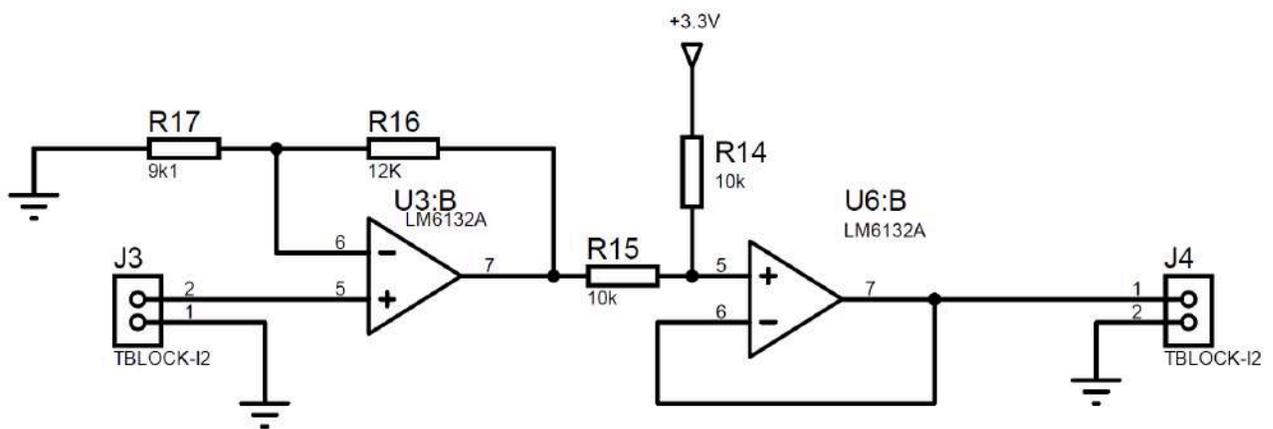
**Figura 4.3.1 - Sensor de corrente TC.**



Fonte: Elaborado pelos autores.

Assim, como no sinal obtido pelo condicionamento das fases, se faz necessário que o sinal gerado pelo TC passe por um circuito de offset, vindo que o mesmo gera uma onda senoidal na qual possui valores negativos e positivos. O circuito é demonstrado na figura 4.3.2. Onde J3 é a entrada do TC e J4 a saída do sinal.

**Figura 4.3.2 - Circuito do sensor de corrente TC.**



Fonte: Elaborado pelos autores.

#### 4.4 Integração com o Microcontrolador

Após o condicionamento do sinal de tensão, realizado pela etapa primária do projeto, o sinal foi ajustado para níveis adequados à leitura pelo microcontrolador STM32F767ZI. Para capturar os dados de forma eficiente, foram configuradas duas portas ADC do microcontrolador, operando simultaneamente. Uma porta é responsável pela leitura do sinal de tensão condicionado pelo grampeador, enquanto a outra realiza a leitura do sinal proveniente do sensor de corrente não-invasivo (TC). Ambas operam com uma frequência de amostragem de 25 kHz, correspondente a uma amostra a cada 40 microsegundos.

As amostras coletadas por cada porta são armazenadas em um buffer duplo, configurado para comportar até 5000 amostras cada. Essa abordagem assegura que o sistema seja capaz de processar os dados coletados em tempo real, sem interrupções ou perdas de informações. O tempo necessário para o preenchimento completo do buffer é de 200 ms, permitindo uma análise contínua e detalhada dos sinais de tensão e corrente monitorados. Isso torna o sistema apto a identificar flutuações, surtos de tensão, variações na corrente e a calcular a potência dissipada pelas cargas conectadas à rede elétrica.

Essa integração, combinando os sinais de tensão e corrente, permite que os dados sejam processados com precisão e eficiência pelo microcontrolador. As informações coletadas são enviadas para uma api rest por meio de requisições http, no qual salva os dados em um banco de dados de séries temporais e em uma planilha para um banco de dados, possibilitando o armazenamento para análises futuras, e exibidas em tempo real em um dashboard interativo. Esse sistema oferece uma visão abrangente e detalhada do comportamento da rede elétrica, auxiliando no monitoramento do consumo e na detecção de anomalias. Nas figuras 4.4.1 e 4.4.2 estão, respectivamente, um exemplo de requisição realizada pelo micro e os dados que são enviados. Já na figura 4.4.3 temos o STM32F407 conectado a internet via a sua porta ethernet e conectado aos circuitos de condicionamento.

**Figura 4.4.1** - Exemplo de dados enviados pelo microcontrolador.

```
[{'measurement': 'energia', 'fields': {'tensao': 220.0, 'corrente': 5.0, 'potencia': 1100.0}}]
127.0.0.1 - - [05/Feb/2025 11:14:57] "POST /voltage_current HTTP/1.1" 200 -
```

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4.4.2 - Dados coletados por segundo.

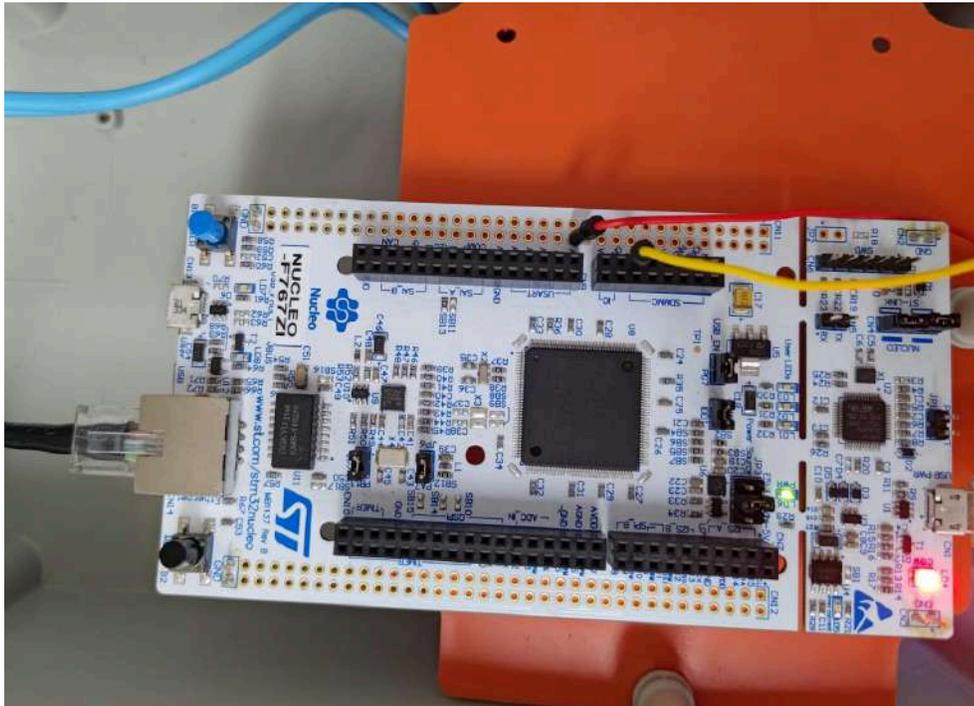
```

200.129.71.139 - - [05/Feb/2025 11:17:44] "POST /voltage_current HTTP/1.1" 200 -
200.129.71.139 - - [05/Feb/2025 11:17:45] "POST /voltage_current HTTP/1.1" 200 -
200.129.71.139 - - [05/Feb/2025 11:17:46] "POST /voltage_current HTTP/1.1" 200 -
200.129.71.139 - - [05/Feb/2025 11:17:47] "POST /voltage_current HTTP/1.1" 200 -
200.129.71.139 - - [05/Feb/2025 11:17:48] "POST /voltage_current HTTP/1.1" 200 -
200.129.71.139 - - [05/Feb/2025 11:17:49] "POST /voltage_current HTTP/1.1" 200 -
200.129.71.139 - - [05/Feb/2025 11:17:50] "POST /voltage_current HTTP/1.1" 200 -
200.129.71.139 - - [05/Feb/2025 11:17:51] "POST /voltage_current HTTP/1.1" 200 -
200.129.71.139 - - [05/Feb/2025 11:17:52] "POST /voltage_current HTTP/1.1" 200 -
200.129.71.139 - - [05/Feb/2025 11:17:53] "POST /voltage_current HTTP/1.1" 200 -
200.129.71.139 - - [05/Feb/2025 11:17:54] "POST /voltage_current HTTP/1.1" 200 -
200.129.71.139 - - [05/Feb/2025 11:17:55] "POST /voltage_current HTTP/1.1" 200 -
200.129.71.139 - - [05/Feb/2025 11:17:56] "POST /voltage_current HTTP/1.1" 200 -

```

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4.4.3 - STM32F767ZI conectado.



Fonte: Elaborado pelos autores.

## 4.5 Exibição dos dados

A exibição de dados em tempo real desempenha um papel essencial em sistemas de monitoramento, como o analisador de tensão e corrente desenvolvido neste projeto. Através de uma interface visual, os usuários podem interpretar facilmente os valores medidos, identificar

padrões de comportamento e detectar anomalias, como surtos de tensão ou quedas inesperadas. A apresentação clara e acessível de informações promove tomadas de decisão mais rápidas e assertivas, seja para manutenção preventiva, análise de eficiência energética ou ajuste de sistemas.

No contexto deste projeto, a integração com uma ferramenta de visualização como o Grafana é especialmente vantajosa. O Grafana é uma plataforma de código aberto amplamente utilizada para criar dashboards interativos e personalizados. Ele permite visualizar, monitorar e analisar grandes volumes de dados de forma intuitiva. Sua compatibilidade com diversas fontes de dados, como bancos de dados SQL, séries temporais (ex.: InfluxDB) e APIs, torna-o ideal para projetos de monitoramento em tempo real. O banco de dados de série temporal InfluxDB foi o escolhido para este projeto. Sua vantagem em relação aos outros foi o fato dele possuir integração nativa com o grafana, podendo assim fazer acessos diretos ao banco de dados, inclusive queries personalizadas. Com isso podem ser feitos cálculos, como média, consumo durante o dia, mês ou ano. Foi implementado um dashboard inacabado para os primeiros testes com o circuito, como mostrado na figura 4.5.1.

**Figura 4.5.1** - Dashboard incompleto de exibição de dados com Grafana.



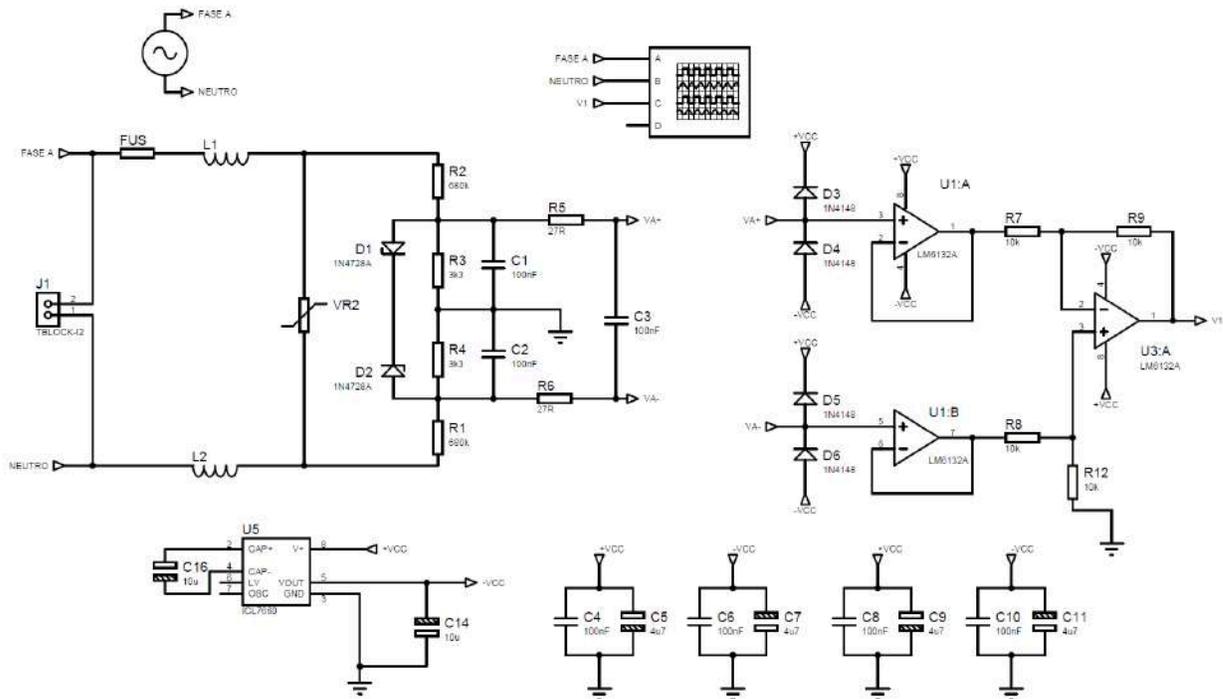
Fonte: Elaborado pelos autores.

## 4.6 Prototipagem

O processo de prototipagem é uma etapa essencial no desenvolvimento de novos produtos ou aplicações, permitindo a realização de testes e validações para garantir que o projeto atenda às expectativas e requisitos definidos. Essa fase é fundamental para assegurar o sucesso da solução dentro da área em que será aplicada.

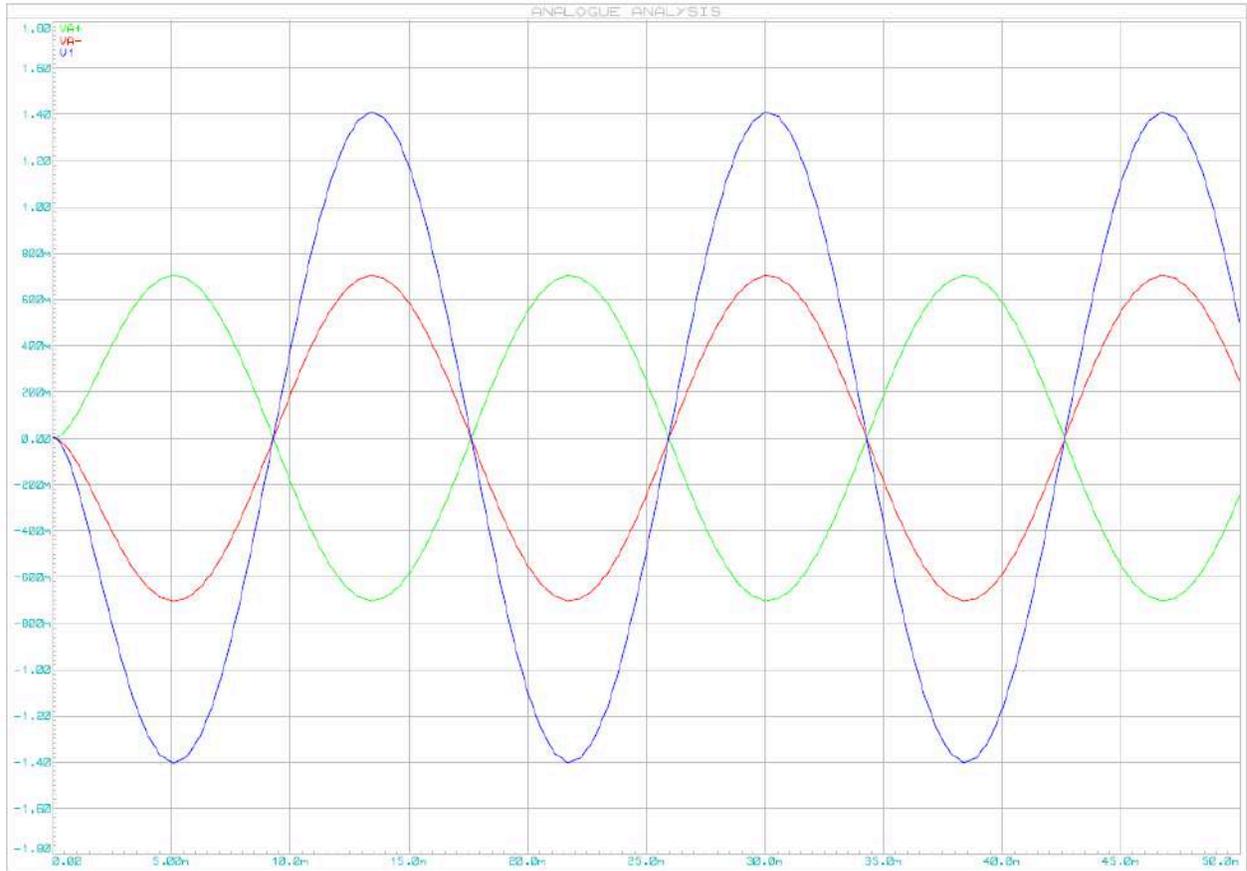
A prototipagem deste projeto iniciou-se com a implementação do circuito em ambiente virtual, utilizando um simulador de circuitos eletrônicos. No software, foi montada a primeira versão do circuito, possibilitando a realização de simulações preliminares para validar o funcionamento e identificar eventuais ajustes antes da implementação prática. Como mostrado nas figuras 4.6.1 e 4.6.2

**Figura 4.6.1 - Circuito divisor de tensão com amplificação diferencial.**



Fonte: Elaborado pelos autores.

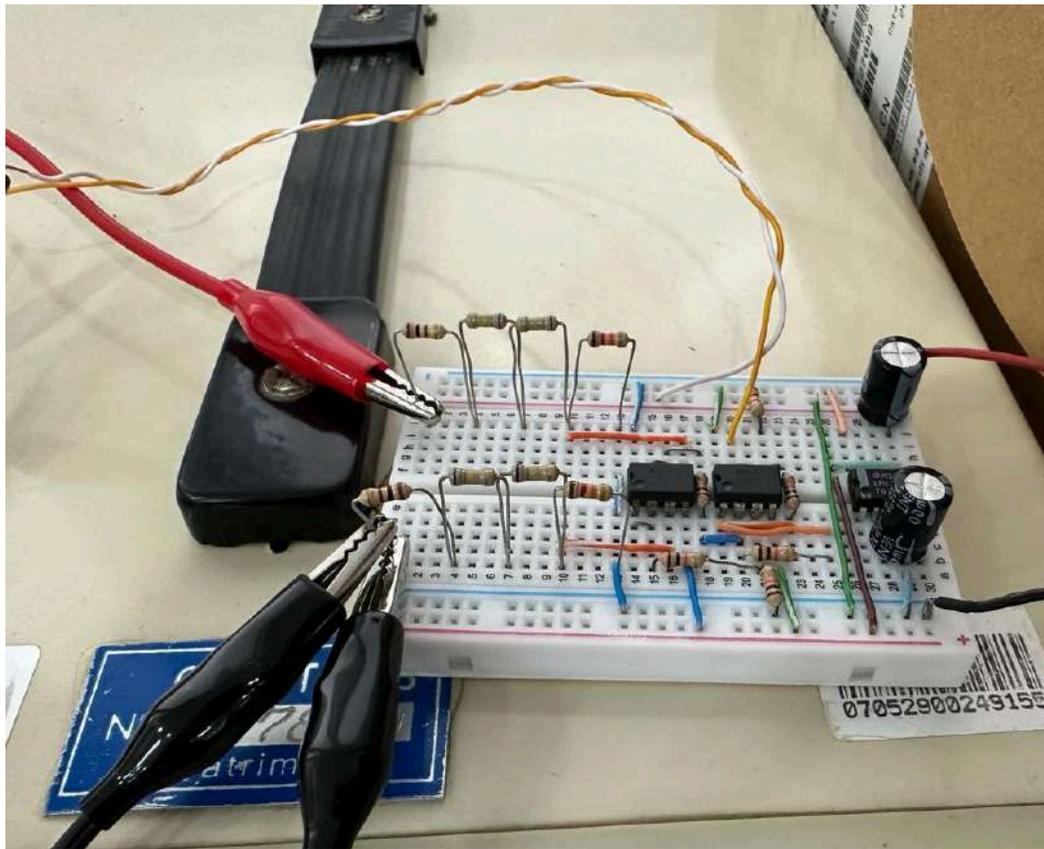
**Figura 4.6.2** - Sinais obtidos após a queda de tensão e amplificação diferencial.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Com o circuito operando corretamente no ambiente virtual, avançou-se para a fase de testes em laboratório. Nesse estágio, o circuito foi montado em uma protoboard como mostrado na figura 4.6.3, facilitando a realização de modificações e ajustes sem a necessidade de uma placa de circuito impresso (PCB). Essa abordagem permitiu validar o funcionamento do sistema em um ambiente físico controlado antes da fabricação de uma PCB definitiva.

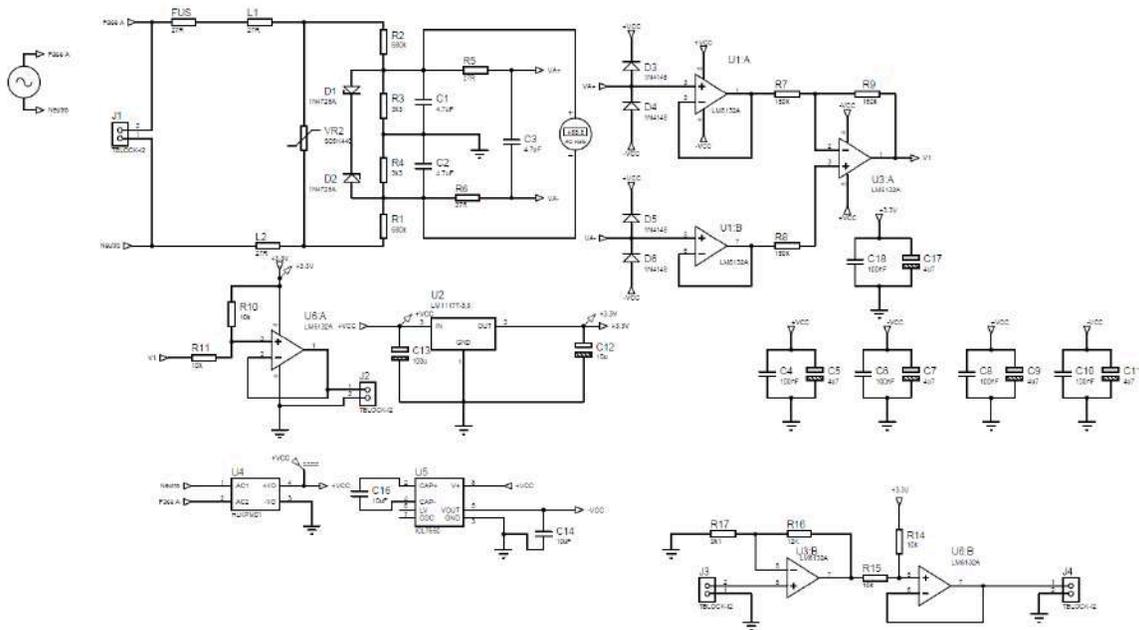
Figura 4.6.3 - Montagem do circuito em Protoboard.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Com a modificação para anteder a nova especificação, o esquema do projeto foi atualizado para incluir o novo componente, como mostrado na figura 4.6.4.

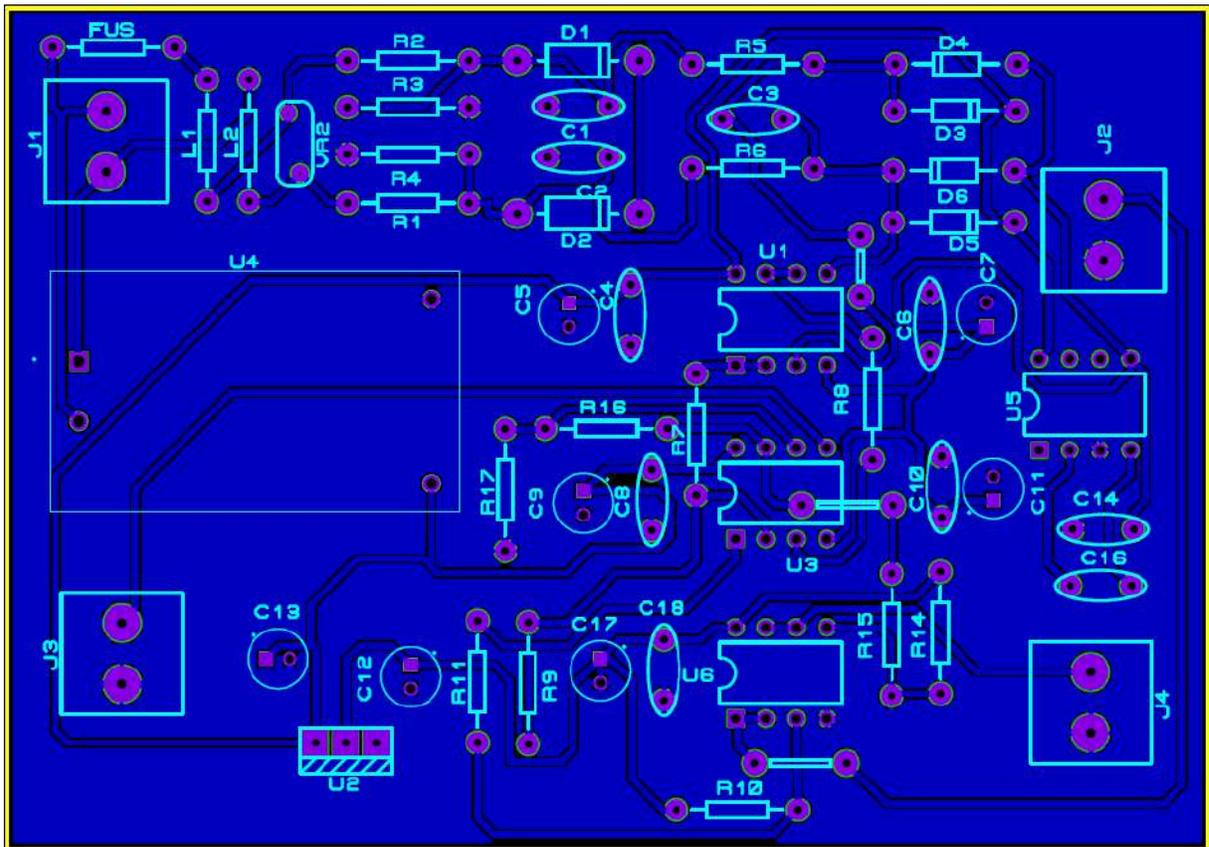
Figura 4.6.4 - Esquemático do circuito inicial.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Com o circuito aprimorado, iniciou-se a aquisição dos componentes, considerando a precisão e as especificações de cada elemento. Paralelamente, foi realizado o roteamento da primeira versão da PCB no simulador de circuitos eletrônicos, garantindo um layout otimizado para a montagem final do sistema, como mostrado na figura 4.6.5.

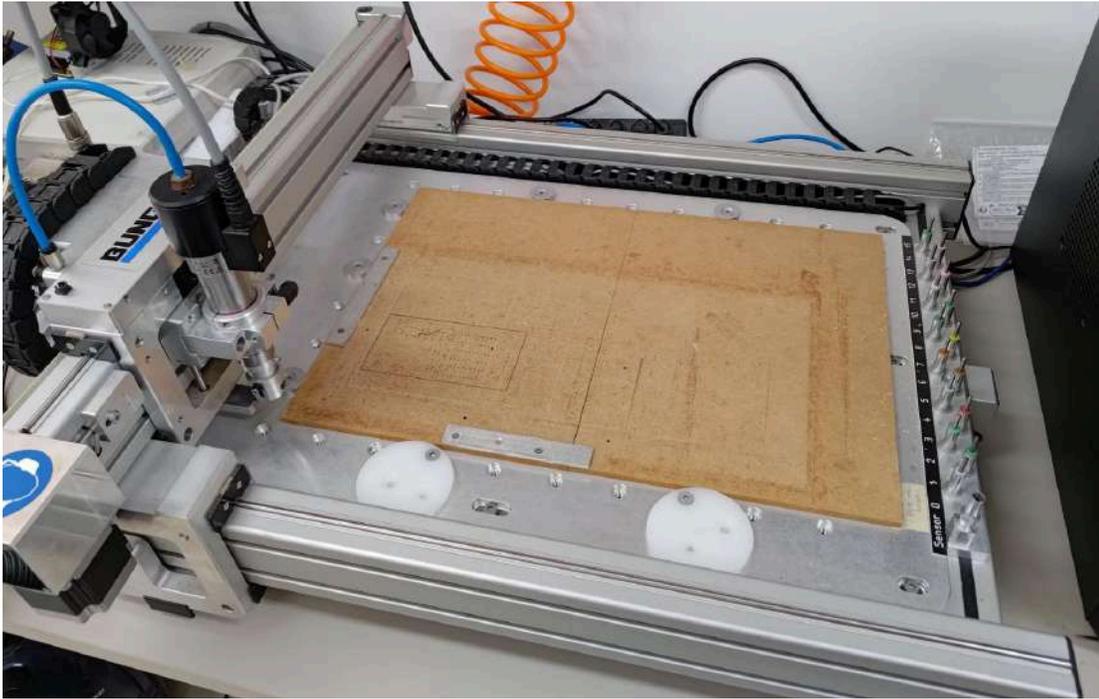
Figura 4.6.5 - Roteamento da primeira versão do PCB.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para a fabricação da primeira versão da placa, foi utilizada uma fresa CNC Bungard, que emprega brocas para fresar o material bruto de fenolite de uma camada. Esse processo remove seletivamente o cobre, criando as trilhas condutoras e realizando a furação de acordo com o roteamento gerado no simulador de circuitos eletrônicos. A placa final possuía dimensões de 10 cm × 7 cm.

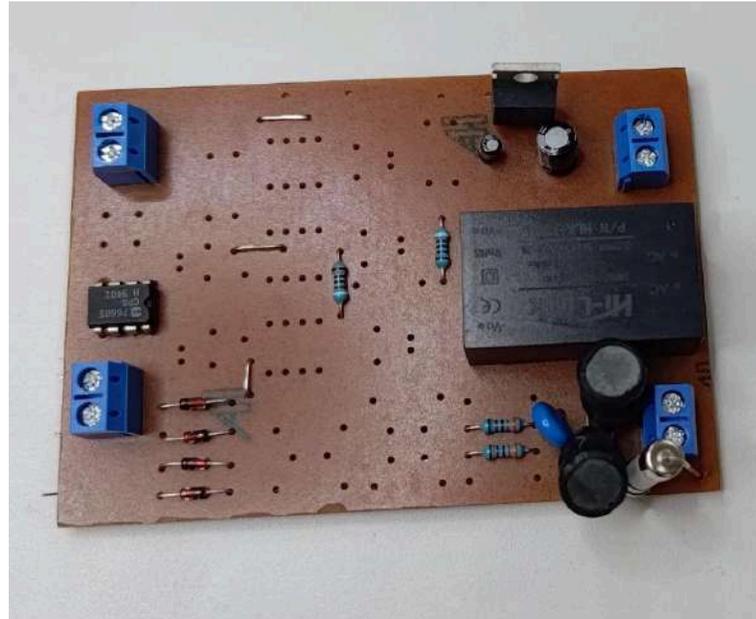
**Figura 4.6.6 - CNC Bungard.**



Fonte: elaborado pelos autores.

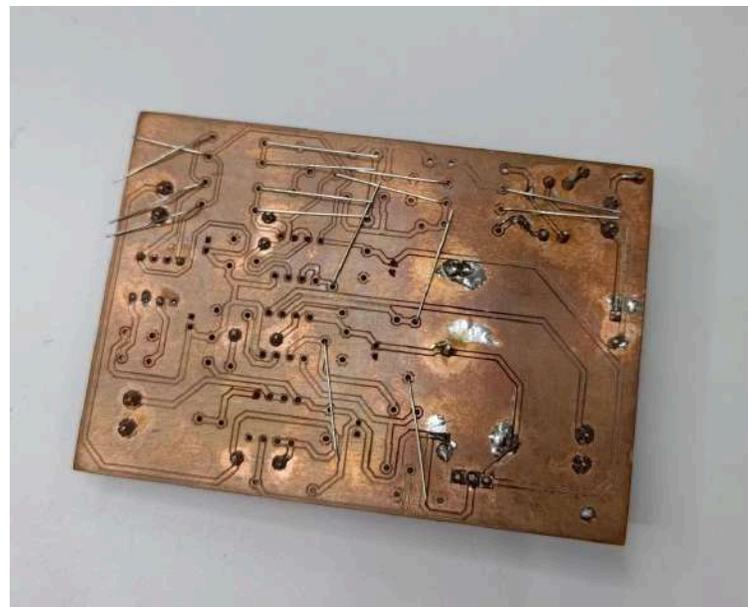
Durante essa primeira fabricação, foram detectados erros iniciais no processo de furação. Todas as perfurações foram feitas com um único tamanho de broca, maior do que o necessário para alguns componentes, o que resultou em danos às ilhas de conexão e a algumas trilhas. Para corrigir esse problema, foi feita uma segunda versão da PCB, mantendo as mesmas dimensões, porém utilizando brocas de tamanhos apropriados para cada tipo de componente.

**Figura 4.6.7** - Vista superior da primeira prototipagem da PCB.



Fonte: Elaborado pelos autores.

**Figura 4.6.8** - Vista inferior da primeira prototipagem da PCB.

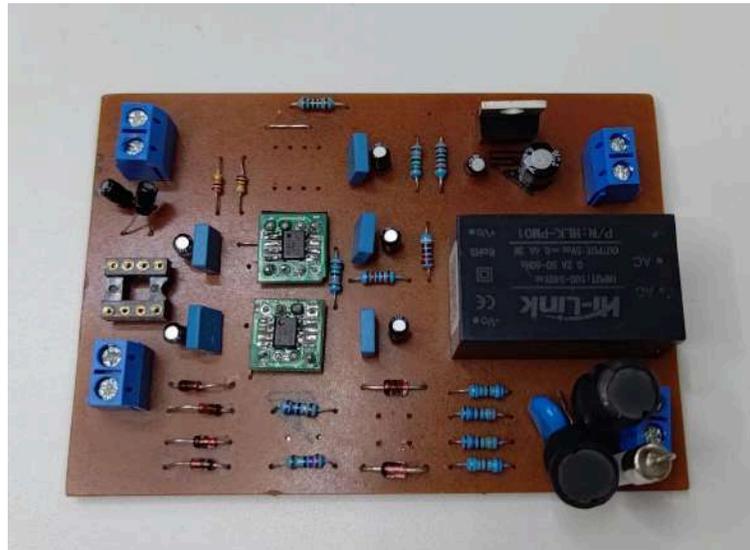


Fonte: Elaborado pelos autores.

Com a segunda versão da placa concluída, foi realizada a primeira soldagem dos componentes. Entretanto, surgiram desafios inesperados. O material da PCB mostrou-se frágil para trilhas e ilhas pequenas, devido ao processo de fresagem, que comprometeu a aderência do cobre à

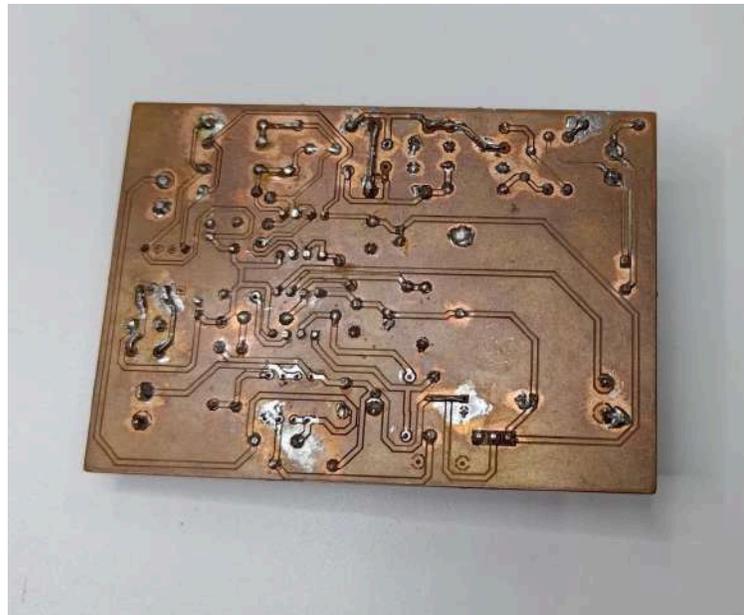
superfície. Além disso, a falta de experiência inicial na soldagem de trilhas muito pequenas dificultou o processo, exigindo cuidados extras na limpeza da placa para evitar curtos e na restauração de trilhas danificadas, o que resultou em atrasos na montagem do circuito.

**Figura 4.6.9** - Vista superior da segunda prototipagem da PCB.



Fonte: Elaborado pelos autores.

**Figura 4.6.10** - Vista inferior da segunda prototipagem da PCB.



Fonte: Elaborado pelos autores.

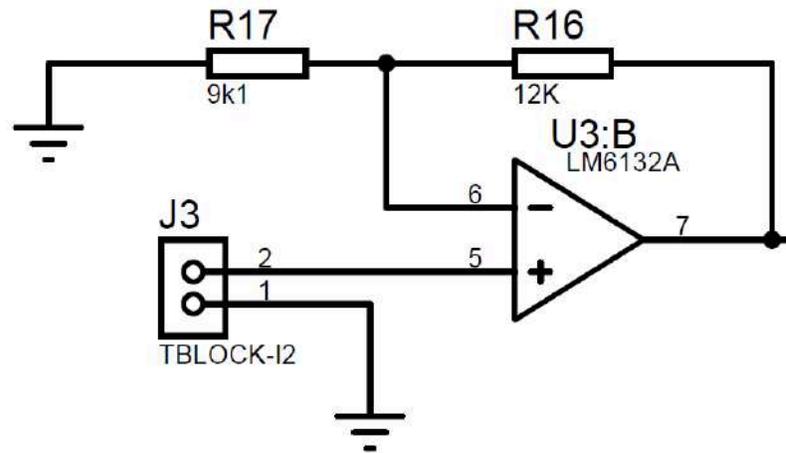
Mesmo após a montagem, o circuito apresentou problemas de funcionamento, impedindo a obtenção de uma saída de dados condizente com os testes realizados no ambiente virtual. Diante dessas dificuldades, optou-se por realizar um novo roteamento da PCB, visando melhorias na integridade do circuito. As principais alterações incluíram o aumento da espessura das trilhas e ilhas, reduzindo a fragilidade observada na versão anterior. Além disso, foi adicionada uma saída de alimentação para o microcontrolador, permitindo que ele fosse alimentado diretamente pela placa, eliminando a necessidade de uma fonte externa adicional.

Após a finalização do novo roteamento, a placa foi fabricada e submetida a um novo processo de soldagem dos componentes. Dessa vez, com trilhas mais robustas e melhor aderência do cobre, o procedimento foi realizado com maior precisão. Concluída a soldagem, foram iniciados novos testes de funcionamento. Com a estrutura aprimorada, a montagem apresentou maior confiabilidade, e os testes iniciais indicaram um desempenho mais estável, sem os problemas encontrados nas versões anteriores.

Inicialmente, o circuito utilizava três resistores de 150 k $\Omega$ , configuração funcional para o INA333, mas incompatível com o LM6132A, utilizado neste projeto. A configuração correta exigia quatro resistores de 10 k $\Omega$ , o que tornou necessário um ajuste no hardware. Devido à falta de tempo hábil para a fabricação de uma nova PCB, optou-se por uma adaptação técnica, onde o quarto resistor foi soldado na parte superior da placa, enquanto os demais substituíram os resistores originais de 150 k $\Omega$ . Com essa correção, o excesso de ruído foi eliminado, permitindo medições mais precisas.

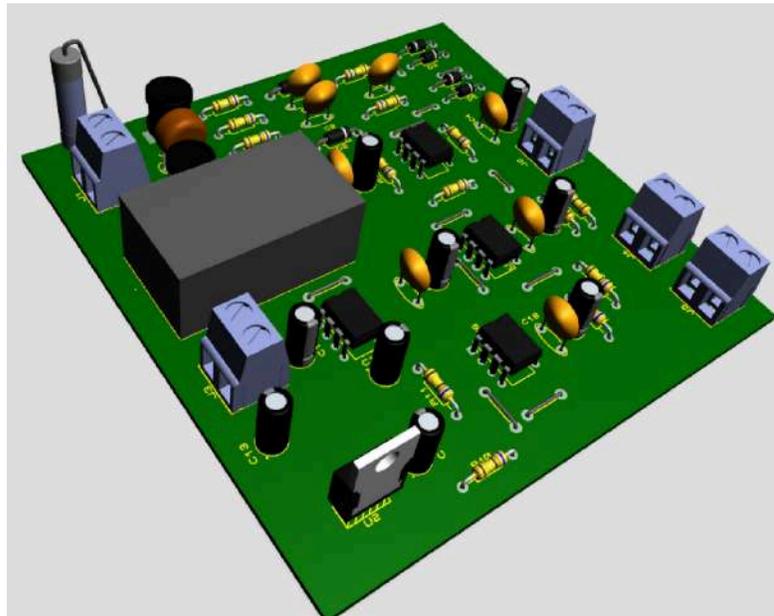
Na etapa seguinte da prototipagem, foi realizada a integração do circuito com o sensor de corrente TC, conectado ao conector de entrada J3. Após medições iniciais para validar seu funcionamento, o sensor foi integrado ao circuito, passando por um estágio de amplificação de aproximadamente  $1,31\times$  em relação ao sinal original, mostrado no esquemático que está referenciado como figura 4.6.11.

Figura 4.6.11 - Entrada do do sensor de corrente com o amplificação de 1,31X.



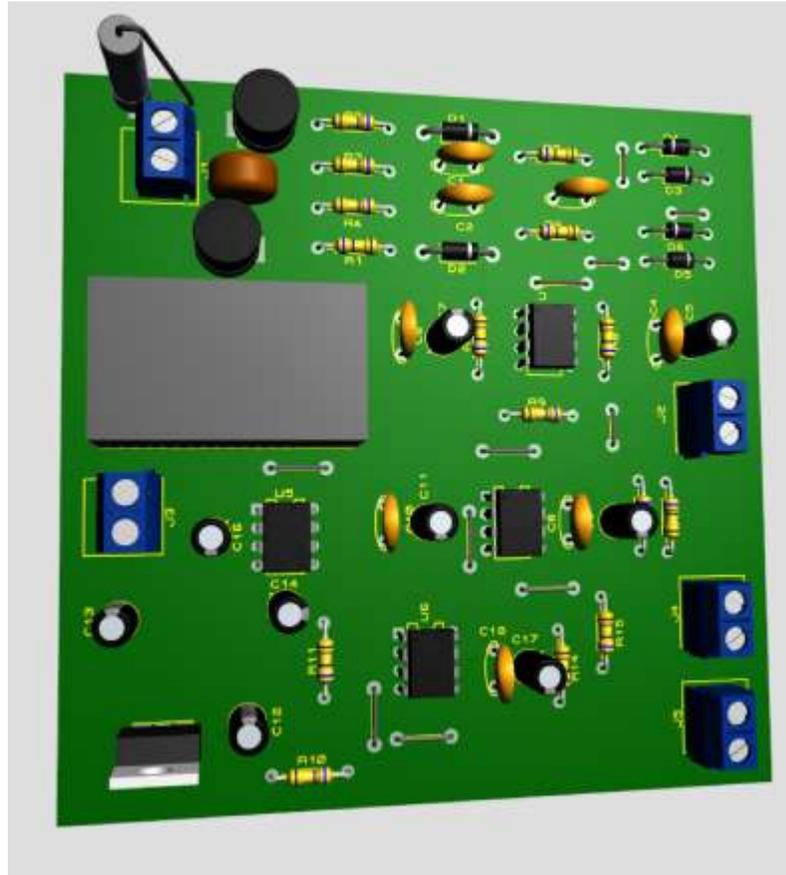
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4.6.12 - Representação 3D do protótipo final - vista isométrica.



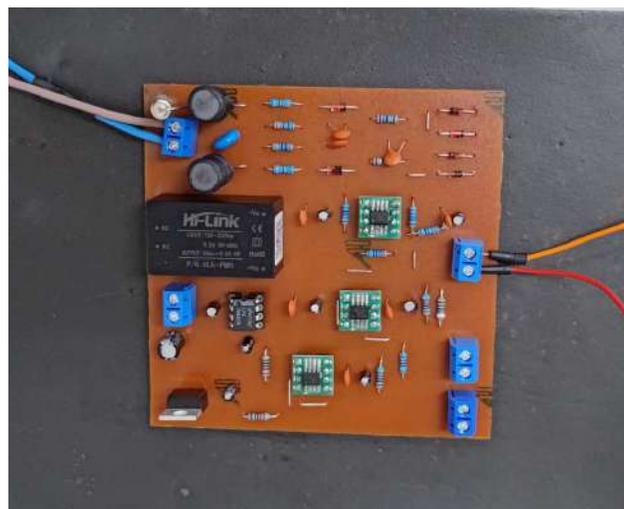
Fonte: Elaborado pelos autores.

**Figura 4.6.13** - Representação 3D do protótipo final - vista superior.



Fonte: Elaborado pelos autores.

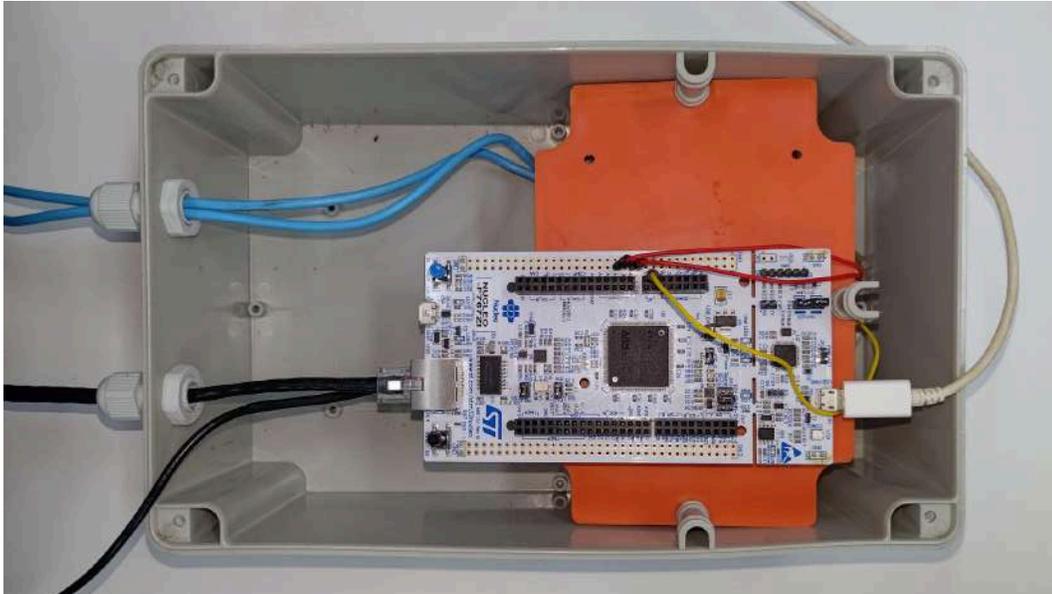
**Figura 4.6.14** - Vista Superior da terceira prototipagem da PCB pós soldagem de componentes.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Nas figura 4.6.12 e 4.6.13 acima, vemos um render 3d da terceira prototipagem e na figura 4.6.14 está a terceira prototipagem já com os componentes soldados e testados. Após a montagem, foi realizada a integração com o microcontrolador, onde ambos foram alocados em uma caixa plástica onde estarão fixos e seguros, como mostrado na figura 4.6.15 logo abaixo.

**Figura 4.6.15** - Circuito e STM32F767ZI alocados na caixa.



Fonte: Elaborado pelos autores.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção tem como objetivo apresentar os resultados obtidos a partir dos testes realizados no protótipo desenvolvido. Além de apresentar os resultados, também serão discutidos os desafios encontrados na elaboração do projeto e as possíveis melhorias.

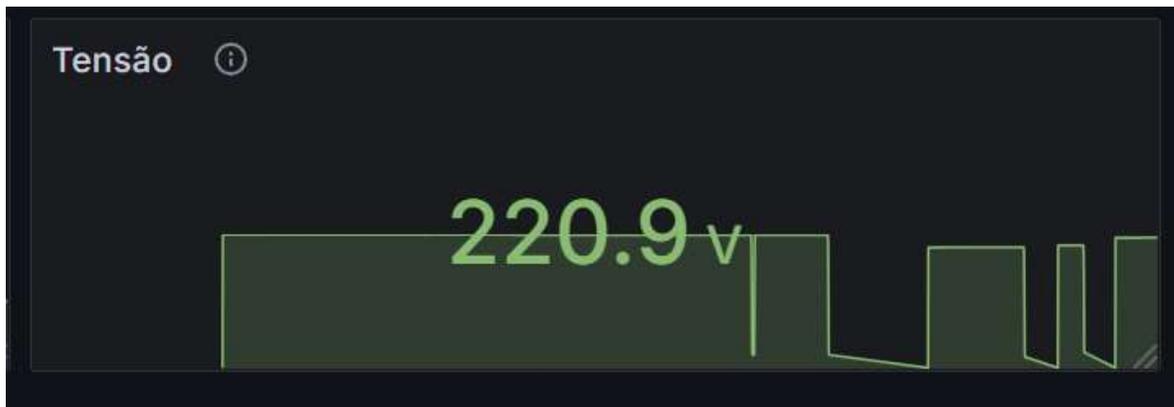
### 5.1 Testes e validação

Os testes indicaram que as faixas de tensão obtidas estavam dentro dos valores esperados, sugerindo um funcionamento inicial adequado do circuito. No entanto, esses mesmos testes revelaram um excesso de ruído na saída, impossibilitando medições precisas da tensão da rede elétrica. A origem do problema foi identificada como um erro na configuração do amplificador de instrumentação.

Para validar a leitura do sensor de corrente, foram realizados testes com cargas de diferentes potências. Primeiramente, um ferro de solda de 60 W foi conectado, seguido por uma fonte de notebook de 135 W. Durante esses testes, foi observado que cargas chaveadas introduzem ruído na medição, exigindo um tratamento adicional para garantir maior precisão nas leituras.

As figuras 5.1.1, 5.1.2, e 5.1.3 mostram as leituras de tensão realizadas, respectivamente pelo STM32F767ZI que foi enviada ao dashboard, a leitura realizada por um multímetro de bancada, da marca KEITHLEY e a leitura realizada por um multímetro portátil da marca Minipa ambos foram utilizados como instrumentos para comparação das medidas efetuadas pelo protótipo.

**Figura 5.1.1** - Tensão enviada pelo STM32F767ZI ao dashboard.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 5.1.2 - Tensão da rede elétrica medida pelo multímetro de bancada.



Fonte: Elaborado pelos autores.

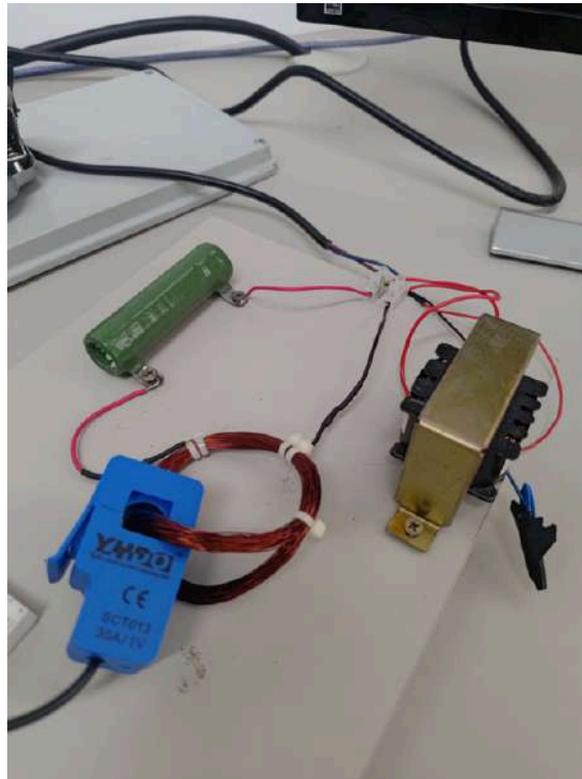
Figura 5.1.3 - Tensão da rede medida pelo multímetro portátil.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Utilizando um circuito puramente resistivo como mostrado na figura 5.1.4, se pode efetuar medidas mais precisas e comparadas com um alicate amperímetro da marca fluke, como são mostrados nas figuras 5.1.5 e 5.1.6.

**Figura 5.1.4** - Circuito resistivo para medição de corrente.



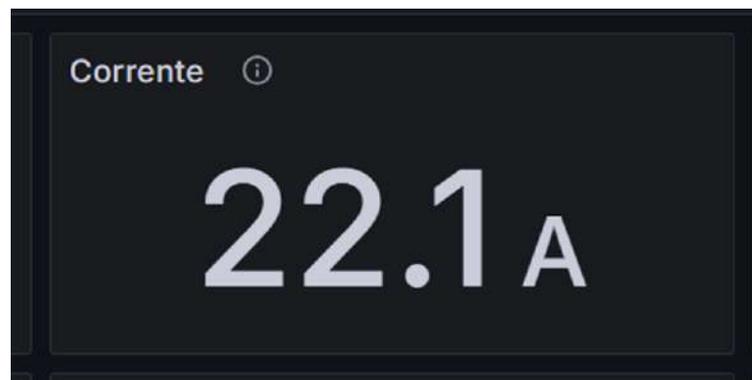
Fonte: Elaborado pelos autores.

**Figura 5.1.5** - Medição da corrente.



Fonte: Elaborado pelos autores.

**Figura 5.1.6** - Corrente enviada pelo STM32F767ZI ao dashboard.



Por fim, foram realizados mais testes para as leituras de corrente, que foram integradas ao projeto geral. As leituras foram coletadas e exibidas, além disso os valores foram multiplicados aos valores de tensão, para obtenção da potência aparente, dada em Volt-Ampère(VA). O dashboard com os dados processados está presente na figura 5.1.7.

**Figura 5.1.7** - Exibição de dados em dashboard.



Fonte: Elaborado pelos autores.

## 6 CONCLUSÃO

A montagem do modelo inicial teve como contratempos: problemas de calibração no sensor de corrente e falhas técnicas pontuais, mas nada que comprometesse o projeto. Durante os testes, ajustes no circuito foram feitos para melhorar a captação de dados e garantir uma transmissão contínua. Esses ajustes aumentaram a precisão das medições e facilitaram a integração dos componentes.

Os resultados obtidos demonstraram que os objetivos propostos foram alcançados com sucesso. O sistema desenvolvido apresentou um baixo custo de implementação, utilizando componentes eletrônicos acessíveis e de fácil aquisição. Além disso, as medições realizadas foram comparáveis às obtidas por instrumentos comerciais, validando a precisão do dispositivo e sua aplicabilidade em análises de qualidade da rede elétrica.

A partir dos resultados alcançados, diversas melhorias podem ser implementadas para expandir a aplicabilidade do projeto. Algumas sugestões incluem:

- Miniaturização da placa, utilizando componentes SMD, reduzindo o tamanho do dispositivo e melhorando sua eficiência na montagem.
- Desenvolvimento de uma PCB otimizada, projetada para encaixe em uma caixa padrão comercial menor, facilitando sua instalação e tornando o dispositivo mais acessível para o uso residencial e industrial.
- Expansão para monitoramento trifásico, permitindo a análise de redes elétricas industriais e comerciais, com a adição de novos módulos de medição de tensão e corrente para cada fase.
- Desenvolvimento de um serviço de medição e diagnóstico de falhas, que permitiria a análise contínua da rede elétrica, identificando anomalias, surtos de tensão e problemas de consumo energético.
- Aplicação de inteligência artificial (IA) para previsão de manutenções preventivas e corretivas, utilizando modelos de aprendizado de máquina para detectar padrões de falhas e prever falhas futuras, oferecendo uma solução inovadora para empresas e estabelecimentos comerciais.

Dessa forma, o trabalho desenvolvido não apenas valida a viabilidade do sistema proposto, mas também abre espaço para futuras melhorias e aplicações mais amplas, tornando-se uma base para projetos mais avançados na área de monitoramento e análise de redes elétricas.

## REFERÊNCIAS

ALIBABA. **Electronic Components 64mA Magnetic Drum Core**. [Imagem]. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/Electronic-Components-64mA-magnetic-drum-core-1600493490914.html>. Acesso em: 1 nov. 2024.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **ANEEL aprova novas tarifas da Light (RJ)**. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/aneel-aprova-novas-tarifas-da-light-rj>. Acesso em: 1 jul. 2024.

AUTOCOREROBÓTICA. **1N4007 - Diodo - Pacote 10pcs**. [Imagem]. Disponível em: <https://www.autocorerobotica.com.br/produto/diodo-1n4007-pacote-x10-pcs>. Acesso em: 3 Fev. 2025.

AUTOCOREROBÓTICA. **741 CI Amplificador Operacional**. [Imagem]. Disponível em: <https://www.autocorerobotica.com.br/741-ci-amplificador-operacional>. Acesso em: 8 nov. 2024.

AUTOCOREROBÓTICA. **Capacitor Eletrolítico 100uF 50V**. [Imagem]. Disponível em: <https://www.autocorerobotica.com.br/capacitor-eletrolitico-100uf-50v>. Acesso em: 8 nov. 2024.

AUTOCOREROBÓTICA. **Varistor 10D391K 250V 10mm**. [Imagem]. Disponível em: <https://www.autocorerobotica.com.br/varistor-10d391k-250v-10mm>. Acesso em: 8 nov. 2024.

ELT GERAL. **Resistência elétrica: o que é um resistor**. [Imagem]. Disponível em: <https://eltgeral.com.br/resistencia-eletrica-o-que-e-um-resistor/>. Acesso em: 8 nov. 2024.

Eletronica PT. **Diodo Zener - Esquemas**. [Imagem]. Disponível em: <https://www.eletronica-pt.com/diodo-zener>. Acesso em 3 Fev. 2025.

ELETRORASTRO. **Fusível de vidro grande 2A, 1 unidade, 6x30mm – Arsolcomp**. [Imagem]. Disponível em: <https://www.eletrorastro.com.br/produto/fusivel-de-vidro-grande-2a-1-unidade-6x30mm-arsolcomp-87345>. Acesso em: 8 nov. 2024.

EMBARCADOS. **Conversor A/D: o que é e como funciona**. [Imagem]. Disponível em: <https://embarcados.com.br/conversor-a-d/>. Acesso em: 8 nov. 2024.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Resenha Mensal: O consumo nacional de energia elétrica foi de 42.837 GWh em janeiro de 2023, crescimento de 0,6% em comparação com mesmo mês de 2022**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/resenha-mensal-o-consumo-nacional-de-energia-eletrica-foi-de-42-837-gwh-em-janeiro-de-2023-crescimento-de-0-6-em-comparacao-com-mesmo-mes-de-2022#:~:Resenha%20Mensal%3A%20consumo%20de%20eletricidade,registra%20consumos%20recordes%20de%20eletricidade>. Acesso em: 31 out. 2024.

**GUSSOW, Milton.** *Eletricidade Básica*. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2009. (Coleção Schaum).

INFOESCOLA. **Ilustração de um átomo, com os prótons e nêutrons compondo o núcleo atômico, e os elétrons na eletrosfera.** [Imagem]. Disponível em: <https://www.infoescola.com/quimica/electron/>. Acesso em: 08 nov. 2024.

MakerHero. **Diodo Zener 2V.** [Imagem]. Disponível em: <https://www.makehero.com/produto/diodo-zener-2v/>. Acesso em: 3 Fev. 2024

Monolithic Power Systems. **Exemplo de saída de sinal analógico.** [Imagem]. Disponível em: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/analog-vs-digital-signal>. Acesso 20 Jan. 2025.

Monolithic Power Systems. **Exemplo de saída de sinal digital.** [Imagem]. Disponível em: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/analog-vs-digital-signal>. Acesso em: 2 Fev. 2025.

MOUSER ELECTRONICS. **STM32F767ZI.** [Imagem]. Disponível em: <https://br.mouser.com/new/stmicroelectronics/stm-nucleo-f767zi-board/>. Acesso em : 15 Dez. 2024.

**PELEGRIN, Matheus Chrispim.** *Monitoramento de consumo de energia, utilizando arduino e sensor de tensão e corrente elétrica*. Santa Catarina: UNESC, 2020.

**SADIKU, Matthew N. O.; ALEXANDER, Charles K.** *Introdução aos Circuitos Elétricos*. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

**SANTOS, K. Vicente dos.** *Fundamentos de Eletricidade*. Manaus: Centro de Educação Tecnológica do Amazonas, 2011.

**TANENBAUM, A. S.; STRUCTHER, T.** *Organização e arquitetura de computadores*. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2017.

**THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. de.** *Sensores industriais: fundamentos e aplicações*. São Paulo: Érica, 2013.

Usinainfo. **Diodo retificador, Zener, 1n4007 e Outros.** [Imagem]. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/diodo-448>. Acesso em: 3 Fev. 2024.

WIKIPÉDIA. **Transformador.** [Imagem]. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Transformador>. Acesso em: 1 nov. 2024.

WOODANDFIRE STUDIO. **Sample Rate e Bit Depth: Como Funcionam e Qual Escolher.** [Imagem]. Disponível em: <https://woodandfirestudio.com/pt/sample-rate-bit-depth/>. Acesso em: 8 nov. 2024.

BRASIL ESCOLA. **Tensão elétrica.** Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/tensao-eletrica.htm>. Acesso em: 19 Dez. 2024.

	<b>INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA</b>
	Campus Campina Grande - Código INEP: 25137409
	R. Tranquílino Coelho Lemos, 671, Dinamérica, CEP 58432-300, Campina Grande (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0003-37 - Telefone: (83) 2102.6200

## Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

### Versão Final do TCC

<b>Assunto:</b>	Versão Final do TCC
<b>Assinado por:</b>	Ellisson Barbosa
<b>Tipo do Documento:</b>	Termo
<b>Situação:</b>	Finalizado
<b>Nível de Acesso:</b>	Ostensivo (Público)
<b>Tipo do Conferência:</b>	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Élisson da Silva Barbosa, ALUNO (201921250018) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO - CAMPINA GRANDE**, em 20/03/2025 13:43:16.

Este documento foi armazenado no SUAP em 20/03/2025. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1427640

Código de Autenticação: 1edf17473e

