



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA - CCET  
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA

Elpidio Rodrigues do Nascimento Neto

Luan Costa Ferro Alves

Nerval de Jesus Santos Junior

**Desenvolvimento de um Multímetro com  
Aplicação da Tecnologia de Internet das Coisas**

São Luís - MA

2023

Elpidio Rodrigues do Nascimento Neto

Luan Costa Ferro Alves

Nerval de Jesus Santos Junior

## **Desenvolvimento de um Multímetro com Aplicação da Tecnologia de Internet das Coisas**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Bacharelado Interdisciplinar em  
Ciência e Tecnologia da Universidade Federal  
do Maranhão como requisito para a obtenção  
do grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia

Universidade Federal do Maranhão

Orientador: Prof. Ms. Adriano Mendes Magalhães

São Luís - MA

2023

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Costa Ferro Alves, Luan.

Desenvolvimento de um Multímetro com Aplicação da  
Tecnologia de Internet das Coisas / Luan Costa Ferro  
Alves, Elpidio Rodrigues do Nascimento Neto, Nerval de Jesus  
Santos Junior. - 2023.

66 f.

Orientador(a): Adriano Mendes Magalhães.

Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do  
Maranhão, São Luís, 2023.

1. ESP32. 2. FFT. 3. Internet das Coisas. 4.  
Medição de Tensão e Corrente Alternados. 5. Valor RMS. I.  
de Jesus Santos Junior, Nerval. II. Mendes Magalhães,  
Adriano. III. Rodrigues do Nascimento Neto, Elpidio. IV.  
Título.

Elpidio Rodrigues do Nascimento Neto  
Luan Costa Ferro Alves  
Nerval de Jesus Santos Junior

## **Desenvolvimento de um Multímetro com Aplicação da Tecnologia de Internet das Coisas**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Bacharelado Interdisciplinar em  
Ciência e Tecnologia da Universidade Federal  
do Maranhão como requisito para a obtenção  
do grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Trabalho de Conclusão de Curso. São Luís - MA, 13 de Julho de 2023

---

**Prof. Ms. Adriano Mendes Magalhães**  
Orientador  
Universidade Federal do Maranhão

---

**Prof. Ms. Márcio Mendes Cerqueira**  
Examinador Interno  
Universidade Federal do Maranhão

---

**Prof. Dr. Paulo Fernandes da Silva  
Júnior**  
Examinador externo  
Universidade Estadual do Maranhão

---

**Prof. Ms. Rayanne Maria Cunha  
Silveira**  
Examinadora Interna  
Universidade Federal do Maranhão

São Luís - MA  
2023

# Agradecimentos

Primeiramente, gostaríamos de agradecer aos nossos familiares por todo apoio e, principalmente a Deus por conceder toda sabedoria, amor, bondade infinita e bênção pela oportunidade de poder apresentar tal trabalho, e ao orientador por toda paciência, preocupação, e toda atenção com o trabalho dos seus orientandos. A todos estes nosso sincero agradecimento.

*"Estamos aqui para fazer alguma diferença no universo, se não, por que estar aqui?"*

(Steve Jobs)

# Resumo

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema que mede duas grandezas elétricas, tensão e corrente, utilizando módulos sensores e tecnologia *IoT*. A obtenção dos valores *RMS* de tensão e corrente alternados foi realizada mediante a leitura dos sensores e processamento dos dados com o microcontrolador ESP32 LoRa. Para isso, os conhecimentos de Série de Fourier, Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Eletrônica de Potência, foram utilizados. Como resultados, gráficos instantâneos dos sinais de tensão e corrente alternados e da FFT foram obtidos. Após analisar os resultados com um osciloscópio, ajustes no sensor corrigiu as distorções do sinal de tensão, resultando em um gráfico com de uma senoidal pura. As distorções no sinal de corrente são inerentes ao tipo de carga que é conectada ao multímetro. A conclusão comenta aspectos da metodologia empregada e dos principais resultados obtidos. Como proposta de trabalhos futuros, pretende-se implementar os resultados obtidos com os fundamentos teóricos relacionados ao cálculo das potências, ativar o módulo de atuadores (*SSR* e relé), fabricar uma placa *PCB* e aprimorar a calibração dos sensores a fim de melhorar a precisão e viabilizar a análise da qualidade de energia.

**Palavras-chave:** Medição de Tensão e Corrente Alternados. Valor RMS. FFT. ESP32. Internet das Coisas.

# Abstract

In this work, a system was developed that measures two electrical quantities, voltage and current, using sensor modules and IoT technology. Obtaining the RMS values of alternating voltage and current was performed by reading the sensors and processing the data with the ESP32 LoRa microcontroller. For this, knowledge of Fourier Series, Fast Fourier Transform (FFT) and Power Electronics were used. As a result, instantaneous graphs of alternating voltage and current and FFT signals were obtained. Adjustments to the sensor corrected the voltage signal distortions, resulting in a graph of a pure sine wave. Distortions in the current signal are inherent to the type of load that is connected to the multimeter. In conclusion, aspects of the methodology employed and the main results obtained are commented. As a proposal for future work, it is intended to implement the results obtained with the theory of power calculation, activate the actuator module (SSR and relay), manufacture a PCB board and improve the calibration of sensors in order to improve accuracy and enable analysis of power quality.

**Keywords:** Measurement of Alternating Voltage and Current. RMS Value. FFT. ESP32. Internet of Things.

# Listas de ilustrações

Figura 1 – Esquemática do Impacto Social da IoT . . . . .	21
Figura 2 – Diagrama - exemplificação da TDF calculada pelo algoritmo FFT . . . . .	24
Figura 3 – Sensor de corrente ACS712 . . . . .	30
Figura 4 – Pinagem de entrada e saída do sensor ACS712 . . . . .	31
Figura 5 – Circuito de aplicação do sensor ACS712 . . . . .	32
Figura 6 – Módulo ZMPT101b . . . . .	33
Figura 7 – Diagrama esquemático do ZMPT101B . . . . .	33
Figura 8 – Relé Eletromecânico . . . . .	35
Figura 9 – Relé Eletroestático . . . . .	36
Figura 10 – Circuito do relé de estado sólido. . . . .	37
Figura 11 – Circuito do relé de estado sólido. . . . .	37
Figura 12 – ESP32 . . . . .	40
Figura 13 – Diagrama em blocos do circuito utilizado. . . . .	44
Figura 14 – Protótipo do circuito montado . . . . .	45
Figura 15 – Arquitetura da aplicação desenvolvida . . . . .	46
Figura 16 – Organização de pastas da <i>WebPage</i> . . . . .	48
Figura 17 – Organização de pastas do código Arduino. . . . .	50
Figura 18 – Digital I/O Sinais . . . . .	52
Figura 19 – Analog Discovery (Legacy) . . . . .	53
Figura 20 – <i>Discrete Fourier Transformation</i> . . . . .	53
Figura 21 – Página Web para Controle e Visualização . . . . .	54
Figura 22 – Ferramentas de Desenvolvedor do navegador mostrando a requisição de dados . . . . .	55
Figura 23 – Ferramentas de Desenvolvedor do navegador mostrando a requisição do relé . . . . .	55
Figura 24 – Gráficos visualizados no Arduíno IDE . . . . .	56
Figura 25 – . . . . .	57
Figura 26 – FFTv em relação ao tempo . . . . .	58
Figura 27 – <i>Serial Monitor</i> do Arduino IDE com o código incluindo FFT . . . . .	59
Figura 28 – Senoide da tensão medida no osciloscópio . . . . .	59
Figura 29 – FFT da tensão . . . . .	60
Figura 30 – Senoide da corrente medida no osciloscópio . . . . .	60
Figura 31 – Protótipo ligado . . . . .	61

# **Lista de Códigos**

1	Código React responsável pela obtenção dos dados . . . . .	49
2	Código C++ da função que retorna a tensão . . . . .	50
3	Código C++ da função responsável devolver os dados . . . . .	50
4	Código para cálculo da FFT . . . . .	51
5	Código aplicando a biblioteca arduinoFFT . . . . .	57

# **Lista de tabelas**

Tabela 1 – Lista de Pinagens do Sensor ACS712 . . . . .	32
Tabela 2 – Especificações da placa ESP32 . . . . .	41
Tabela 3 – Equipamentos utilizados para montagem do protótipo . . . . .	44

# Lista de abreviaturas e siglas

IOT	A Internet das Coisas
QEE	Qualidade de energia elétrica
THD	Distorção Harmônica Total
THDv	Distorção Harmônica Total de tensão
THDi	Distorção Harmônica Total de corrente
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i> - Raiz Média Quadrática
CI	Círculo Integrado
AC	Corrente Alternada
OTA	<i>Over The Air</i>
NR10	Norma Regulamentadora 10
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
TDF	Transformada Discreta de Fourier
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
SF	Série de Fourier
DC	Corrente Contínua
UI	<i>User Interfaces</i>
DOM	<i>Document Object Model</i>
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
MQTT	<i>MQ Telemetry Transport</i>
mA	Miliampere
V	Volts

RAM	<i>Random Access Memory</i>
HTTP	<i>HyperText Transfer Protocol</i>
USB	<i>Universal Serial Barrage</i>
CLI	<i>Command Line Interface</i>
CSS	<i>Cascading Style Sheets</i>
URL	<i>Uniform Resource Locator</i>
NPM	<i>Node Package Manager</i>
M2M	<i>Machine-to-machine</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
SSR	<i>Solid-State Relay</i>
IHM	Interface Homem-Máquina

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	Problemática	15
1.2	Justificativa	16
1.3	Objetivos	16
1.3.1	Específicos	17
1.4	Estrutura do trabalho	17
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b>	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E COMPONENTES TECNOLÓGICOS</b>	<b>20</b>
3.1	Internet das Coisas (IoT)	20
3.2	Harmônicos em um Sistema Elétrico	21
3.2.1	Série de Fourier para tempo contínuo	21
3.2.2	Transformada Discreta de Fourier – TDF	23
3.2.3	Teorema de Parseval para Sinais e Potência	25
3.2.4	Tratamento das Distorções Harmônicas Totais (DHT)	27
3.2.4.1	Cálculo De Distorções	28
3.3	Atuadores e Sensores	30
3.3.1	Módulo Sensor de Corrente (ACS712)	30
3.3.2	Módulo Sensor de Tensão (ZMPT101b)	32
3.3.3	Módulo Relé Eletromecânico	34
3.3.4	Módulo Relé Eletroestático	35
3.4	Microcontroladores	39
3.4.1	ESP32	39
3.5	Linguagens de Programação	41
3.5.1	C++	41
3.5.1.1	Biblioteca C++ arduinoFFT	41
3.5.2	Javascript	42
3.5.2.1	Biblioteca Javascript React	42
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>43</b>
4.1	Ferramentas e Recursos Utilizados	43
4.2	Circuito	44
4.3	Arquitetura do Programa	45
4.3.1	Aplicação Web	47
4.3.2	Programação no Microcontrolador	49

4.4	<b>Testes do Projeto</b>	51
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	54
5.1	<b>Aplicação Web</b>	54
5.2	<b>Programa do Microcontrolador</b>	55
5.3	<b>Calibração e análise dos sinais obtidos</b>	59
5.4	<b>Protótipo Montado</b>	60
6	<b>CONCLUSÃO</b>	62
6.1	<b>Trabalhos Futuros</b>	62
	<b>REFERÊNCIAS</b>	63

# 1 Introdução

A Internet das Coisas (*Internet of Things - IoT*) é o termo que tem expressado a crescente utilização da comunicação da tecnologia de máquinas e dispositivos pela Internet (M2M, ou *machine-to-machine*), o desenvolvimento de utensílios, desde os exemplos das geladeiras ou torradeiras ligadas à Internet, além de dispositivos transdutores, como sensores e atuadores, os quais tornam-se partes integrantes da rede que compõe a Internet (MAGRANI, 2018; PREMSANKAR; FRANCESCO; TALEB, 2018; OLIVEIRA, 2017).

Desde a década de 1980, as empresas de energia e seus clientes vem identificando aspectos e grupos mais afetados por problemas decorrentes da falta de qualidade de energia elétrica (SANTOSO et al., 2012). Isso fica claro quanto ao número crescente de estudos publicados acerca deste tema (DECKMANN; POMILIO, 2017; SUSLOV; SOLONINA; GERASIMOV, 2018; BIRYULIN; KUDELINA; LARIN, 2020; RAJESH et al., 2022).

Isto posto, o foco deste trabalho é propor o desenvolvimento de um sistema de medição de parâmetros elétricos associados com as grandezas de potência e a energia consumida por uma carga simples, como a de um eletrodoméstico. Este sistema é equipado com dispositivos para atuação por interrupção da passagem da corrente elétrica de forma voluntária ou involuntária, em caso de falhas da rede elétrica. Uma aplicação *web* coleta e processa os dados dos parâmetros de potência e energia medidos e disponibiliza através de gráficos temporais dinâmicos. Estes dados compõem um conjunto de informações que podem ser utilizados para realizar uma análise simplificada de aspectos de qualidade de energia fornecida à carga ligada à rede elétrica local, por meio do respectivo sistema proposto.

## 1.1 Problemática

Problemas associados a qualidade de energia são definidos como qualquer interrupção ou diferença nos níveis de variação de tensão, corrente ou frequência na energia fornecida. Podem resultar em problemas com equipamentos conectados ao sistema de energia, como instalações de consumo ou sistemas de distribuição (HADDAD, 2004; SANTOSO et al., 2012).

Os distúrbios detectados na qualidade de energia, podem ser analisados por meio das distorções dos sinais de tensão e corrente provocadas pela presença de harmônicos dispostos com bastante frequência em sistemas de energia de corrente (IEEE, 2009). Ocasionados na maioria dos equipamentos eletrônicos com características não-lineares, sua interação com outros dispositivos conectados no mesmo sistema elétrico pode causar

problemas quando atinge uma magnitude suficiente (ALSHAHRANI et al., 2015). Logo, em alguns casos, pode ocorrer o desligamento de cargas quando os relés detectam um valor alterado nos sistemas de potência, erros de frequência, níveis elevados de tensão entre neutro e terra e indução de campos magnéticos em transformadores e disjuntores.". (LOPEZ, 2001).

Como uma solução para a medida de qualidade de energia, neste trabalho é proposto o desenvolvimento de um sistema, similar aos oferecidos pelo produto popularmente chamado "tomada inteligente", que também seja capaz de verificar medidas relacionadas à qualidade de energia, além de incluir também controles comuns em dispositivos de Internet das Coisas, como controle de estado, ligado ou desligado, e interfaces para monitoramento e controle.

## 1.2 Justificativa

No contexto da Internet das Coisas, as tomadas inteligentes se integram a outros dispositivos, como *smartphones* e notebooks, permitindo o acesso remoto e o controle de aparelhos elétricos. Essa integração possibilita a automação de processos e a criação de ambientes onde os usuários podem gerenciar o consumo de energia de maneira mais eficiente e sustentável (MORAES et al., 2020). Além disso, a qualidade da energia elétrica é um aspecto importante a ser considerado, uma vez que a presença de distúrbios harmônicos e variações de tensão podem afetar o desempenho dos aparelhos e a eficiência energética (BORGES et al., 2019).

Portanto, um sistema IoT que permita o monitoramento de grandezas elétricas e controle do acionamento de forma remota contribuirá para experimentar métodos que possibilitem mensurar qualidade de energia e as grandezas relacionadas a ela, como a Distorção Harmônica Total, Fator de Potência, além de trazer essas informações para uma interface *web*.

## 1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema para medição das grandezas elétricas (tensão e corrente) utilizando módulos sensores, microcontrolador ESP32 LoRa e tecnologia IoT, além de mostrar esses dados medidos em um servidor *web*. Em trabalhos futuros pretende-se realizar os seguintes passos: correção das distorções nos sinais de tensão, bem como implementar o cálculo de potências, ativação dos atuadores (SSR e relé) e aprimoramento da calibração dos sensores para análise da qualidade de energia elétrica.

### 1.3.1 Específicos

A pesquisa apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Pesquisar trabalhos relacionados;
- Projetar um sistema inteligente com a Internet das Coisas;
- Selecionar os equipamentos, componentes e as tecnologias necessários;
- Desenvolver um protótipo do sistema inteligente com conexão via servidor Web;
- Avaliar os resultados e submeter o trabalho para eventos acadêmicos.

## 1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho é composto por mais cinco partes além desta Introdução:

- No Capítulo 2, é exposto o panorama atual de estudos correlatos que envolvam abordagens da Qualidade de Energia, e da Internet das Coisas com o uso de microcontroladores, sensores e atuadores;
- No Capítulo 3 é realizada uma revisão dos estudos acadêmicos relacionados aos temas a serem abordados no trabalho, incluindo Internet das Coisas, Sistema De Distribuição De Energia Elétrica, Harmônicos em um Sistema Elétrico, atuadores, sensores e o microcontrolador aplicados, ademais das bibliotecas das linguagens de programação escolhidas;
- No Capítulo 4 aborda-se o experimento realizado para avaliação da viabilidade do sistema proposto, a metodologia, recursos e ferramentas, bem como arquitetura do software e testes no protótipo do circuito;
- No Capítulo 5 são descritos resultados obtidos do experimento, problemas encontrados, e também comentado o que era esperado em contraste com os resultados;
- No Capítulo 6 são discutidas as conclusões decorrentes da pesquisa e desenvolvimento do projeto, além de apresentar sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Estado da Arte

Nesta seção, serão explorados estudos correlatos que se dedicam ao tema em questão, nos quais são empregados microcontroladores IoT para obter informações de sensores, com o objetivo de propor sistemas voltados para a medição relacionados de grandezas elétricas.

O trabalho desenvolvido por ([SANTIAGO; MARIANO, 2020](#)) abordou a implementação de um protótipo de medidor de qualidade de energia elétrica em baixa tensão, considerando o aumento da distorção harmônica na rede elétrica. O sistema foi dividido em duas partes complementares: A primeira parte envolveu o desenvolvimento do hardware responsável por validar a inicialização, funcionamento e conexões dos componentes, garantindo a montagem adequada do protótipo; A segunda parte consistiu na emulação em um software de simulação para validar a conversão de dados em dados decimais reais e o funcionamento do código proposto.

O trabalho de ([FERREIRA; ALMEIDA, 2022](#)) apresenta um estudo realizado com o objetivo de utilizar um sistema supervisório e o microcontrolador Arduino para monitorar disjuntores manobrados sob carga em subestações blindadas. Para isso, foi escolhido um supervisório para implementação e simulação dos disjuntores. Além disso, foi realizada a programação no Arduino, permitindo a comunicação da Interface Homem-Máquina (IHM) do supervisório com o processo, possibilitando o controle dos equipamentos e o monitoramento das operações realizadas pelo operador no supervisório. Dessa forma, foi possível realizar a contagem de manobras de abertura e fechamento sob carga desses disjuntores, contribuindo para um melhor controle e manutenção desses equipamentos em subestações blindadas

No trabalho de ([CARVALHO, 2013](#)) o autor desenvolveu um sistema para análise de medidas da rede elétrica utilizando dois *microchips* do tipo dsPIC de modelo dsPIC33FJ16GS502 em que cada um realiza o cálculo das medidas do Distorção Harmônica Total (THD) e corrente com um sensor de Efeito Hall para medida de corrente, necessitando também de um módulo ADC para conversão do sinal para digital e um módulo UART para transmissão dos dados do microcontrolador ao controlador do display utilizado no projeto. Fazendo a conexão dos componentes e ligando ao display, o autor conseguiu ter sua medida de corrente RMS em Amperes mostrada no display, e a THD em porcentagem também mostrada no display com margens de erro de até 4% na placa de circuito confeccionada, pois, os testes na protoboard tiveram níveis altos de ruídos.

O trabalho de ([SALUNKHE; KANSE; PATIL, 2022](#)) foi desenvolvido um sistema de monitoramento de consumo de energia elétrica usando tecnologia *IoT* e análise de dados. O sistema utiliza um medidor inteligente instalado na indústria para calcular os

dados de consumo. O monitoramento contínuo de parâmetros elétricos é feito por meio de comunicação RS 485 e interface com o medidor. Os dados são apresentados em um site com gráficos e podem ser baixados em formato Excel. Essa abordagem proporciona rastreamento e monitoramento online, reduzindo erros humanos e oferecendo uma solução econômica e eficiente para o registro de consumo de energia.

Isto posto, conforme os trabalhos citados, observa-se que a abordagem com microcontroladores utiliza modelos diversos para cada caso de acordo com suas necessidades, desde modelos mais simples como *microchips* até os mais atuais e completos, como o popular Arduíno. Quanto ao protocolo de comunicação, não está presente em todos devido a alguns trabalhos apenas utilizarem os dados não tratados ou usarem um programa específico, como o ScadaBR, mas um dos trabalhos fez uso do protocolo *HTTP* com servidor *web*. Quanto ao uso de sensores e atuadores, constatou-se o uso de sensores de corrente, como o HMCT103C, de um circuito integrado do tipo CS5463 atuando também como sensor, e de módulo relé.

# 3 Fundamentação Teórica e Componentes Tecnológicos

Nesse capítulo será abordado sobre o sistema físico e os seus componentes constituintes, e como se dá funcionamento de cada um deles. Similarmente, demonstra-se como pode ser estruturada todo à análise matemática posterior ao estudo do conteúdo referente às distorções harmônicas e aos distúrbios de energia elétrica.

## 3.1 Internet das Coisas (IoT)

O conceito de "Internet das Coisas"(IoT) surgiu pela primeira vez em 1999, quando o pioneiro britânico em tecnologia Kevin Ashton o utilizou para descrever um sistema no qual objetos do mundo físico poderiam ser conectados à Internet por meio de sensores. Ashton introduziu o termo para demonstrar o potencial de conectar etiquetas de identificação por radiofrequência (RFID) utilizadas em cadeias de suprimentos corporativas à Internet, permitindo a contagem e o rastreamento de mercadorias sem a necessidade de intervenção humana. Atualmente, a expressão "Internet das Coisas" se popularizou para descrever cenários nos quais a conectividade à Internet e a capacidade de computação se estendem a diversos objetos, dispositivos, sensores e itens do cotidiano. ([ROSE; ELDRIDGE; CHAPIN, 2015](#)).

De acordo com ([SANTOS et al., 2016](#)), a Internet das Coisas também pode ser descrita como uma ampliação da internet que permite que objetos do cotidiano, dotados de capacidade computacional e de comunicação, se conectem à rede mundial de computadores. Essa conexão viabiliza o controle e o acesso a tais objetos como provedores de serviços, abrindo caminho para uma variedade de aplicações tanto no âmbito acadêmico quanto no industrial. No entanto, essas oportunidades também trazem consigo desafios técnicos e sociais, especialmente relacionados à privacidade, que demandam uma atenção cuidadosa para o crescimento dessa tecnologia. Na Figura 1 é ilustrado o esquema do impacto social do IoT.

Figura 1 – Esquemática do Impacto Social da IoT.



Fonte: Autores, 2023.

## 3.2 Harmônicos em um Sistema Elétrico

No sistema elétrico, há uma ampla variedade de fontes que geram harmônicos, provenientes de diversos equipamentos das concessionárias e dos consumidores, especialmente os industriais, que representam uma parcela significativa da carga fornecida. (HART, 2012) Nesta seção, são apresentados indicadores relacionados ao estudo das componentes harmônicas em sistemas elétricos. Além disso, abordam-se detalhadamente as principais cargas responsáveis pela geração de harmônicos em ambientes industriais, visando a compreensão de suas características. Após identificar as fontes de harmônicos e suas intensidades, será realizada uma avaliação dos efeitos desses harmônicos no sistema elétrico e na operação dos equipamentos.

### 3.2.1 Série de Fourier para tempo contínuo

Sinais de tensão e corrente alternados são naturalmente periódicos. Porém ruídos de frequências distintas podem interferir na forma de onda, causando distorções nestes sinais. Para poder analisar o impacto que estas distorções podem causar na potência fornecida para uma carga, é necessário decompor os sinais de tensão e corrente alternados em séries de Fourier.

Seja uma função periódica  $f(t) \in \mathbb{R}$ , de período fundamental  $T_0$ , com frequência fundamental  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$  (em rad/s). Assim, a função  $f(t)$  pode ser decomposta como:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n e^{jn\omega_0 t} \quad (3.1)$$

onde  $n \in \mathbb{Z}$  é o índice da harmônica de frequência multipla de  $\omega_0$ . Essa decomposição é conhecida como série de Fourier no modo exponencial (LATHI, 2008).  $D_n \in \mathbb{C}$  é o coeficiente da série de Fourier no modo exponencial, e é calculado como (LATHI, 2008):

$$D_n = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (3.2)$$

A decomposição de  $f(t)$  da Eq. (3.1) está matematicamente relacionada com a Transformada Discreta de Fourier (TDF) (LATHI, 2008). Porém esta forma não apresenta similaridade com as aplicações associadas a teoria de circuitos elétricos. (DORF; SVOBODA, 2016; ALEXANDER; SADIQU, 2013; HART, 2012). Para isso, utiliza-se a forma trigonométrica compacta da série de Fourier.(LATHI, 2008). Decompondo  $f(t)$  novamente tem-se:

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t + \theta_n) \quad (3.3)$$

onde  $C_n$  e  $\theta_n$  são os coeficientes de amplitude e fase associados respectivamente.

Posto que  $f(t)$  é um sinal real, as formas exponencial e trigonométrica compacta da série de Fourier são relacionáveis entre si através das seguintes equações (LATHI, 2008):

$$C_0 = D_0 \quad (3.4)$$

$$C_n = 2|D_n| \quad \forall n \geq 1 \quad (3.5)$$

$$\theta_n = \angle D_n = \arctan \left( \frac{\text{Im}\{D_n\}}{\text{Re}\{D_n\}} \right) \quad (3.6)$$

onde  $C_0$  é o valor médio do sinal  $f(t)$  que representa a componente DC dos sinais de tensão ou corrente em aplicações elétricas. Cada harmônica está associada a um cosseno, o qual pode ser representado por um fasor, cuja a amplitude é  $C_n$  e a fase é  $\theta_n$ . Dessa forma, o impacto de cada harmônica de ruído causado por interferências é observado na análise fasorial dos sinais de tensão e corrente alternados. Essa é uma característica da

forma trigonométrica compacta de série de Fourier que resulta em várias aplicações na teoria de circuitos elétricos e de eletrônica (i.e. análise de circuitos elétricos CA, filtros elétricos, circuitos condicionadores de sinais, circuitos para comunicação, conversores CC-CC, etc.) (ALEXANDER; SADIQU, 2013; DORF; SVOBODA, 2016; HART, 2012; BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013; SEDRA; SMITH, 2011).

### 3.2.2 Transformada Discreta de Fourier – TDF

Em termos de processamento digital de sinais, os coeficientes  $D_n$  podem ser obtidos a partir das componentes do espectro de frequência discreta por meio da Transformada Discreta de Fourier (TDF). Neste trabalho, a TDF é computacionalmente calculada pelo algoritmo denominado Transformada Rápida de Fourier (do inglês *Fast Fourier Transform* – FFT), o qual apresenta um custo computacional  $\mathcal{O}[N \log(N)]$  (COOLEY; TUKEY, 1965; LATHI, 2008).

A TDF é executada a partir de amostras obtidas de forma periódica de um sinal de tempo contínuo. O período de tempo que determina a amostragem é denominado de período de amostragem  $T$ . Portanto, para que um sinal amostrado tenha o mínimo de perdas de informações quando for recuperado para o domínio do tempo contínuo, a estimativa da frequência de amostragem  $f_s = \frac{1}{T}$  deve obedecer o critério da taxa de Nyquist, tal que (LATHI, 2008)

$$f_s > 2B \quad (3.7)$$

onde  $B$  é a largura de banda ou faixa essencial do sinal (em Hz).

Seja o sinal  $f(kT)$  a versão discreta de um sinal periódico  $f(t)$ , o qual é amostrado em períodos de  $T$  segundos. Define-se o sinal  $f_k$  como sendo:

$$f_k = T f(kT) \quad (3.8)$$

Portanto, a TDF é obtida como (LATHI, 2008):

$$F_r = \sum_{k=0}^{N_0-1} f_k e^{-j r \Omega_0 k} \quad \forall \Omega_0 = \omega_0 T = \frac{2\pi}{N_0} \quad (3.9)$$

onde  $r \in \mathbb{Z}$  é o índice da amostra do espectro discreto de frequência,  $\Omega_0$  (em radianos) é a frequência discreta do sinal periódico que foi amostrado do tempo contínuo.  $F_r = F(r\omega_0)$  é a  $r$ -ésima amostra de frequência discreta obtida pela TDF e  $\omega_0$  é a resolução da

amostragem do espectro de frequência.  $N_0$  é o número de amostras que o sinal tem dentro de um período de repetição  $T_0$ . Além disso, dentro do intervalo de frequências de  $1f_0$  a  $f_s = N_0 f_0$  existem  $N_0$  amostras. Logo o número de amostras  $N_0$  pode ser obtido como sendo (LATHI, 2008):

$$N_0 = \frac{T_0}{T} = \frac{f_s}{f_0} \quad (3.10)$$

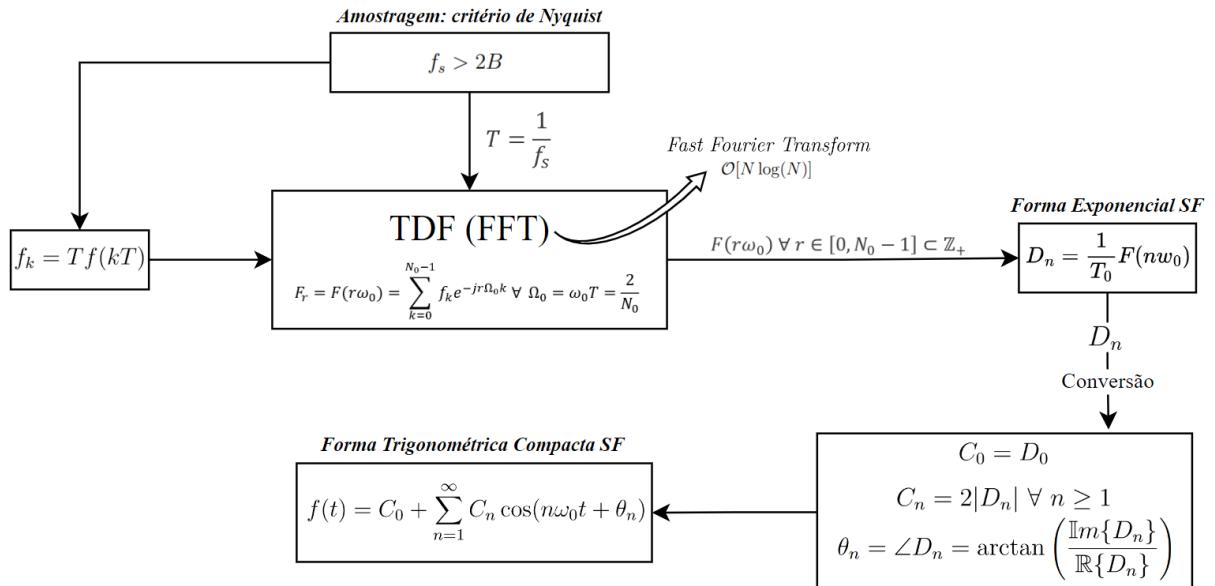
com  $f_0 = \frac{1}{T_0}$  (em Hz) sendo a frequência fundamental do sinal periódico  $f(t)$ .

No caso de discretização temporal de senoides, observa-se que a frequência fundamental  $f_0$  é numericamente igual a resolução  $f_0$  do espectro de frequência discreto. Por isso, a TDF se relaciona com a série de Fourier no modo exponencial como sendo (LATHI, 2008):

$$D_n = \frac{1}{T_0} F(r\omega_0) \quad (3.11)$$

onde as componentes  $F(r\omega_0)$  são calculadas por meio da FFT para todo  $r \in [0, N_0 - 1] \subset \mathbb{Z}$ , a partir de  $N_0$  amostras do sinal  $f(t)$ , conforme a Eq. (3.8).

Figura 2 – Diagrama - exemplificação da TDF calculada pelo algoritmo FFT.



Fonte: Autores, 2023.

A Figura 2 trata de forma resumida o que acontece com o sistema da TDF quando é calculada pelo algoritmo computacional FFT. Inicialmente tem-se um sinal de entrada dado por  $f_k = T f(kT)$  que representa o sinal  $f(t)$ , porém no formato discretizado, no

sinal  $f_k$  tem-se um período de amostragem  $T = \frac{1}{f_s}$  definido pelo critério de Nyquist, onde  $f_s > 2B$ . Por conseguinte, após a definição do critério citado, o sistema da TDF é calculado pela *Fast Fourier Transform* onde como sinal de saída obtém-se o  $F(rw_0)$ . A partir da saída é possível encontrar o valor do coeficiente  $D_n$  na forma exponencial da Série de Fourier (SF). Dado  $D_n$  realiza-se conversões e encontra-se os valores de  $C_0$ ,  $C_n$  e  $\theta_n$  utilizados na forma trigonométrica compacta da SF.

Após a realização das conversões tem-se a possibilidade de obter os valores RMS relacionados com os sinais de tensão, corrente e potência, bem como a obtenção dos fatores de potência e distorção a partir da forma trigonométrica compacta de Fourier e sua aplicabilidade dentro Teorema de Parseval.

### 3.2.3 Teorema de Parseval para Sinais e Potência

O Teorema de Parseval diz que o termo do lado direito Eq. (3.3) é um sinal de potência (LATHI, 2008). A potência do sinal  $x(t)$  é igual a soma das potências de todas as componentes senoidais do lado direito, ou seja:

$$P_f = C_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_n^2 \quad (3.12)$$

Conforme (HART, 2012), o valor *RMS* de um sinal periódico  $f(t)$  pode ser obtido pelas componentes da série trigonométrica compacta de Fourier, como sendo:

$$F_{RMS} = \sqrt{P_f} = \sqrt{C_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{C_n}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (3.13)$$

Realizando-se algumas operações matemáticas nota-se que o valor de dentro da raiz de  $F_{RMS}$  acima mostra-se semelhante aquele obtido pelo Teorema de Parseval. Dessa forma, pode-se encontrar o valor *RMS* de tensão ( $V_{RMS}$ ) e corrente ( $I_{RMS}$ ) e consequentemente o valor potência do sinal. A potência instantânea para um dispositivo qualquer é calculada pela tensão aplicada nele e pela corrente que por ele circula. A potência instantânea é:

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (3.14)$$

- Potência média (carga linear)

Se as formas de ondas periódicas de tensão e corrente representadas pelas séries de Fourier:

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega_0 t + \theta_n) \quad (3.15)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n) \quad (3.16)$$

São de um dispositivo ou circuito, então a potência média é calculada pela equação.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t) dt \quad (3.17)$$

A média dos produtos da tensão e da corrente na mesma frequência é dada por:

$$P = V_{RMS} I_{RMS} \cos(\theta - \phi) \quad (3.18)$$

onde  $V_{RMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$ ,  $I_{RMS} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$  e  $(\theta - \phi)$  é o ângulo de fase entre a tensão e a corrente. Já o  $\cos(\theta - \phi)$  é determinado como o fator de potência. Sendo a média dos produtos da tensão e corrente de frequências distintas igual a zero. Consequentemente, a potência média para tensão e corrente com formas de ondas periódicas não senoidais é

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P_n = V_0 I_0 + \sum_{n=0}^{\infty} V_{n,RMS} I_{n,RMS} \cos(\theta_n + \phi_n) \quad (3.19)$$

simplificando

$$P = V_0 I_0 + \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{V_{n,max} I_{n,max}}{2} \right) \cos(\theta_n + \phi_n) \quad (3.20)$$

Nota-se que a potência média total é a soma das potências nas frequências nas séries de Fourier.

- Potência média (fonte senoidal e carga não linear)

Dada uma fonte de tensão senoidal aplicada a uma carga não linear, a forma de onda da corrente não será senoidal, mas poderá ser representada como uma série de Fourier. Sendo a tensão de formato senoidal, a tensão pode ser expressa por

$$v(t) = V_1 \sin(\omega_0 t + \theta_1) \quad (3.21)$$

E a corrente é representada conforme a série de Fourier

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega_0 t + \phi_n) \quad (3.22)$$

a potência média absorvida pela carga (ou fornecida pela fonte) é calculado pela equação de potência dada anteriormente, sendo

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P_n = V_0 I_0 + \sum_{n=0}^{\infty} V_{n,RMS} I_{n,RMS} \cos(\theta_n - \phi_n) \rightarrow \quad (3.23)$$

$$= (0)(I_0) + \frac{(V_1 I_1)}{2} \cos(\theta_1 - \phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{(0)(I_{n,RMS})}{2} \cos(\theta_n - \phi_n) \rightarrow \quad (3.24)$$

$$= \left( \frac{V_1 I_1}{2} \right) \cos(\theta_1 - \phi_1) = V_{1,RMS} I_{1,RMS} \cos(\theta_1 - \phi_1) \quad (3.25)$$

Pode-se observar que apenas o termo diferente de zero está na frequência da tensão aplicada. Por conseguinte, dado o valor médio de potência, o fator de potência (fp) da carga é calculado por meio da razão da potência média pela potência aparente

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{V_{1,RMS} I_{1,RMS} \cos(\theta_1 - \phi_1)}{V_{1,RMS} I_{RMS}} \rightarrow fp = \frac{I_{1,RMS}}{I_{RMS}} \cos(\theta_1 - \phi_1) \quad (3.26)$$

Verifica-se também que para uma tensão senoidal e uma corrente senoidal, o  $fp = \cos(\theta_1 + \phi_1)$ , que é o termo do fator de potência comumente utilizado também em circuitos lineares, sendo chamado de deslocamento do fator de potência.

Tratando-se sobre o fator de distorção ( $FD$ ), tem-se que ele é dado pela razão do valor  $RMS$  da frequência fundamental para o valor  $RMS$  total,  $\frac{I_{1,RMS}}{I_{RMS}}$  ambos os valores obtidos da equação 3.27. Sendo assim, o FD é dado por

$$FD = \frac{I_{1,RMS}}{I_{RMS}} \quad (3.27)$$

Por conta das propriedades da corrente não senoidal, o fator de distorção (FD) representa a redução no fator de potência. Posto isto, o fator de potência também é expresso em

$$fp = \cos(\theta_1 - \phi_1) \cdot FD \quad (3.28)$$

### 3.2.4 Tratamento das Distorções Harmônicas Totais (DHT)

As distorções harmônicas referem-se ao fenômeno de distorção das ondas senoidais de tensão e corrente decorrentes harmônica inseridas por ruídos ou cargas elétricas não lineares no sistema elétrico. Tais harmônicos são múltiplos inteiros da frequência fundamental. Essas distorções podem ter efeitos prejudiciais nos sistemas de energia, incluindo o aumento de perdas, o envelhecimento prematuro dos equipamentos, a redução da capacidade dos componentes, mau funcionamento de dispositivos de proteção e medição, redução do fator de potência e menor eficiência do sistema de energia.(GHORBANI; MOKHTARI, 2015).

### 3.2.4.1 Cálculo De Distorções

Uma forma de medir o grau de distorção harmônica causada por um ataque violento de tensão fundamental é medir os níveis de distorção harmônica total e individual em um sistema elétrico ([LOPEZ, 2001](#)).

$$DITH\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (3.29)$$

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum V_h(\text{de } h=2 \text{ até } h_{\max})}}{V_1} \times 100 \quad (3.30)$$

A distorção harmônica da tensão é causada pela corrente harmônica que passa pela impedância linear em série do sistema elétrico. Harmônicos são fenômenos contínuos e não devem ser confundidos com fenômenos transitórios ([SANTOSO et al., 2012](#)). Tensões perfeitamente equilibradas e senoides são necessárias em um circuito elétrico ideal. Porém, na prática, os sinais de tensão e corrente são distorcidos. Este desvio é normalmente expresso em termos de distorções harmônicas da corrente e tensão, e é normalmente causado por cargas não lineares. Essas distorções podem ser facilmente substituídas por um filtro harmônico que possui um capacitor para correção do fator de potência em série com um indutor. A quantidade de distorção depende da impedância vista pela carga não linear, a fonte de corrente harmônica e a corrente fornecida por ela.

A natureza senoidal pura de uma corrente, com amplitude e frequência constantes, é necessária para garantir que a qualidade da energia esteja em oposição à distorção harmônica.

Para representar ondas distorcidas, a série de Fourier é usada. Sinais distorcidos podem ser decompostos usando a série de Fourier em sinais separados com várias frequências superiores à frequência fundamental.

Por meio dos valores de corrente, pode-se quantificar a propriedade não senoidal de uma forma de onda. Essa contagem é feita através da distorção harmônica total (DHT). Sendo ela a razão do valor *RMS* de todos os termos da frequência fundamental para o valor *RMS* da frequência fundamental. Para uma melhor compreensão basta uma análise da expressão dada a seguir.

$$DHT = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} I_{n,RMS}^2}{I_{1,RMS}^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} I_{n,RMS}^2}{I_{1,RMS}^2}} \quad (3.31)$$

Podendo ser expressa de forma equivalente por

$$DHT = \sqrt{\frac{I_{RMS}^2 - I_{1,RMS}^2}{I_{1,RMS}^2}} \quad (3.32)$$

O cálculo da distorção harmônica total é efetivo unicamente nas situações onde o termo DC é zero. Então, a DHT pode ser expressa como

$$DHT = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \quad (3.33)$$

Percebe-se que o FD tratado no tópico acima pode ser expresso por meio do valor DHT, sendo

$$FD = \sqrt{\frac{1}{1 + DHT^2}} \quad (3.34)$$

Com relação aos demais tipos de elétrica, retém-se que a potência reativa (Q) é caracterizada pela energia armazenada durante metade do ciclo e a energia é recuperada durante a outra metade. A potência reativa para uma tensão senoidal e uma corrente não senoidal pode ser calculada por uma relação análoga à equação 3.35. O único termo diferente de zero ( $V_0 = 0$ ) para a potência reativa é na frequência da tensão, sendo os valores de tensão dados de forma instantânea:

$$Q = \frac{V_1 I_1}{2} \sin(\theta_1 - \phi_1) \quad (3.35)$$

A partir do valor de potência ativa (P) e reativa (Q) definidas para o caso não senoidal, na potência aparente (S) realiza-se uma inserção de um termo a mais para considerar a corrente nas frequências que se distinguem da frequência da tensão. O termo da distorção volt-ampères (D) é habitualmente empregado ao realizar-se os cálculos referentes à potência aparente.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3.36)$$

dado que D obtém-se por

$$D = V_{1,RMS} \sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} I_{n,RMS}^2} = \frac{V_1}{2} \sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} I_n^2} \quad (3.37)$$

No contexto da qualidade da energia, essa relação é relevante porque permite analisar como esse tipo de sistema afeta as diferentes componentes de frequência presentes em um sinal de energia. Por exemplo, em sistemas de distribuição de energia elétrica, diferentes componentes de frequência podem estar associadas a harmônicas indesejadas ou distorções, que podem afetar a qualidade da energia fornecida aos consumidores.

Ao analisar as respostas do sistema a cada componente de frequência, é possível identificar distorções, desequilíbrios de carga ou outros problemas que afetam a qualidade

da energia. Com base nessas análises, podem ser implementadas medidas corretivas para melhorar a qualidade da energia, como filtros de frequência ou compensadores de distorção, por exemplo.

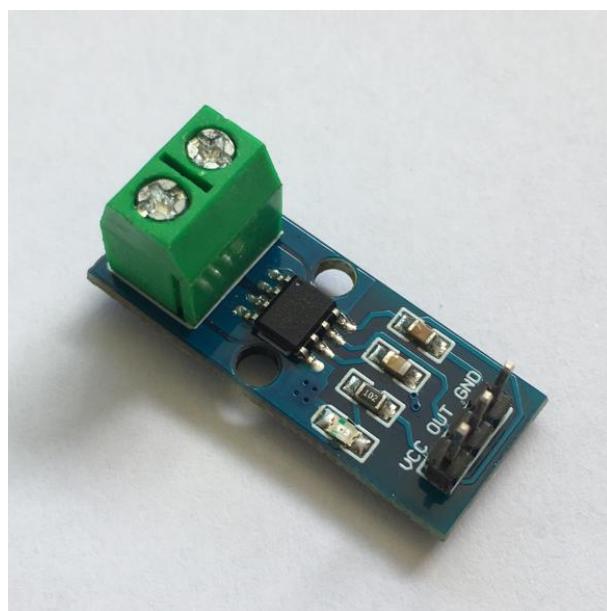
### 3.3 Atuadores e Sensores

Os atuadores desempenham o papel de alterar as condições físicas do ambiente em que estão inseridos, mediante o recebimento de um sinal elétrico. Exemplos desses dispositivos incluem motores, dispositivos de aquecimento, bombas de água, entre outros. Por outro lado, os sensores quantificam as variáveis presentes no ambiente, tais como níveis de iluminação, temperatura, pressão, entre outros. Adicionalmente, podem ser empregados para a detecção de tamanho, distância e características do material, sendo que existem inúmeras opções de sensores, dependendo da aplicação específica em que são utilizados (FRANCHI; CAMARGO, 2008).

#### 3.3.1 Módulo Sensor de Corrente (ACS712)

O sensor de corrente nesta aplicação se torna um componente fundamental na medição da corrente - necessária para o correto funcionamento dos dispositivos. A medição de tensão é uma tarefa passiva e pode ser feita sem afetar o sistema. Em contrapartida, a medição da corrente é uma tarefa intrusiva que não pode ser detectada diretamente como tensão. Na Figura 3 é possível ver o sensor de corrente, o qual é conectado em série com a carga.

Figura 3 – Sensor de corrente ACS712



Fonte: Autores, 2023.

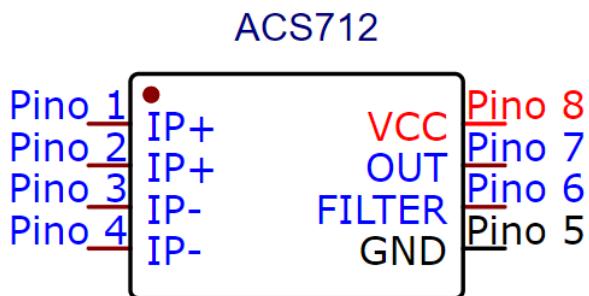
Para medir a corrente do circuito utilizou-se o sensor de corrente ACS712. Sendo um sensor que pode ser usado para medir e calcular a quantidade de corrente aplicada ao condutor sem afetar o desempenho do sistema. Esse sensor de corrente linear é baseado em efeito Hall totalmente integrado, possuindo um isolamento de tensão *RMS* de 2,1kV juntamente com um condutor de corrente de baixa resistência.

Em sua maioria, os sensores de correntes detectam a corrente em um fio ou condutor e gera um sinal proporcional à corrente detectada na forma de tensão analógica ou saída digital. A detecção de corrente é feita de duas maneiras - detecção direta e detecção indireta. Na detecção direta de corrente, a lei de Ohm é usada para medir a queda de tensão ocorrida em um fio quando a corrente flui através dele.

No sensor de Corrente ACS712 é usado o método de detecção indireta para calcular a corrente. Para detectar a corrente, um circuito de sensor Hall de baixo deslocamento é usado neste CI. Este sensor está localizado na superfície do CI em um caminho de condução de cobre. Quando a corrente flui através deste caminho de condução de cobre, ela gera um campo magnético que é detectado pelo sensor de efeito Hall. Uma tensão proporcional ao campo magnético detectado é gerada pelo sensor Hall, que é usado para medir a corrente.

A proximidade do sinal magnético ao sensor Hall determina a precisão do dispositivo. Quanto mais próximo do sinal magnético maior a precisão. O sensor de corrente ACS712 está disponível com um pequeno pacote SOIC8 de montagem em superfície. Neste CI, a corrente flui do Pino 1 e Pino 2 para o Pino 3 e Pino 4 conforme a figura 4. Isso forma o caminho de condução onde a corrente é detectada, tornando a implementação deste CI ainda mais simplificada.

Figura 4 – Pinagem de entrada e saída do sensor ACS712.



Fonte: Autores, 2023.

Outra característica desse sensor, é que ele pode ser usado em aplicações que requerem isolamento elétrico, pois os terminais do caminho de condução são eletricamente isolados dos condutores CI. Assim, este CI não requer nenhuma outra técnica de isolamento. A sua alimentação requer uma tensão de 5V. Onde sua tensão de saída é proporcional à

corrente CA ou CC ([INFO, 2023](#)). O ACS712 tem uma histerese magnética - quando o campo magnético é reduzido a zero e alguma magnetização persiste - quase zero.

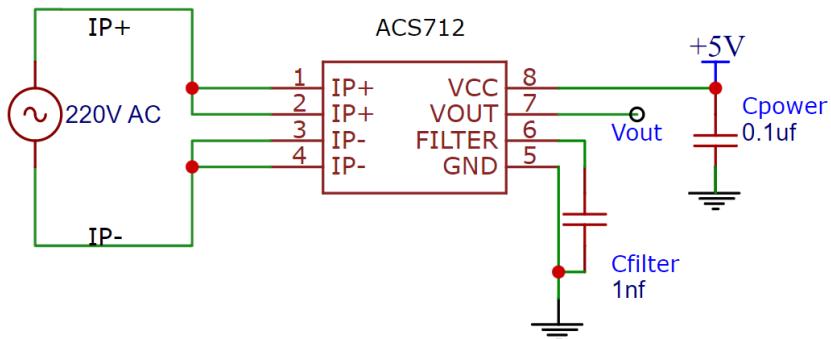
Enquanto do pino 1 ao 4 tem-se o caminho de condução, os pinos: 5, 6, 7 e 8 têm funções definidas de acordo com a Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 – Lista de Pinagens do Sensor ACS712

Pino	Nome	Descrição
1 e 2	IP+	Terminais para passagem da corrente de fase; fundidos internamente.
3 e 4	IP-	Terminais para passagem da corrente neutra; fundidos internamente.
5	GND	Aterramento do sinal.
6	FILTER	Filtro usado por um capacitor externo para definir a largura de banda.
7	OUT	Saída analógica.
8	VCC	Fonte de alimentação.

Na Figura 5 a seguir é possível observar as pinagens descritas na tabela 1 do sensor de corrente.

Figura 5 – Circuito de aplicação do sensor ACS712

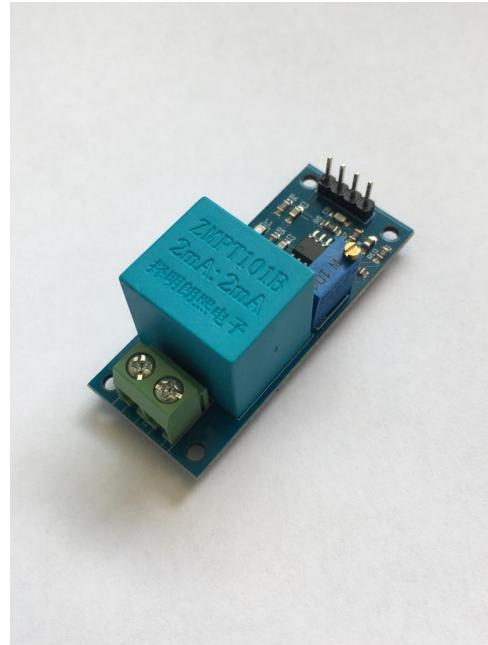


Fonte: Autores, 2023.

### 3.3.2 Módulo Sensor de Tensão (ZMPT101b)

O ZMPT101B é um transformador de tensão de alta precisão. Este módulo facilita o monitoramento da tensão de rede AC de até 1000 volts. Suporta até 4kV por tensão de ruptura, a proporção de voltas é de 1:1, mas este é um transformador de corrente de 2mA: 2mA. Seu funcionamento é dado da seguinte forma: ele é alimentado com uma corrente e logo após a alimentação remove-se a corrente. A corrente de entrada é definida pelo resistor em série  $R_1$  e usa-se um resistor de amostragem  $R_2$  em paralelo para obter a tensão de saída ([INNOVATORSGURU, 2022](#)). Além disso, o sensor também conta com um potenciômetro *trimmer* acoplado em seu circuito. Na Figura 6 é possível ver o sensor de tensão o qual é conectado em paralelo com a carga.

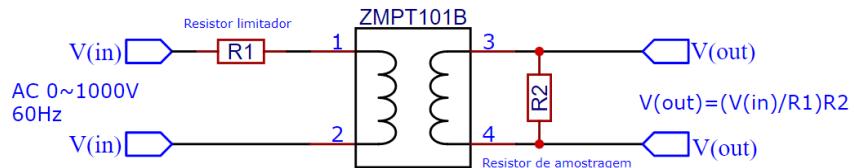
Figura 6 – Módulo ZMPT101b



Fonte: Autores, 2023.

Na figura 7 a seguir tem-se o modelo do circuito do sensor. A partir dele pode-se ter uma melhor compreensão de seu funcionamento.

Figura 7 – Diagrama esquemático do ZMPT101B



Fonte: Autores, 2023.

$$V_{\text{saída max}} = \frac{\text{tensão de pico}}{\sqrt{2}} \quad (3.38)$$

Exemplificando, como para  $\pm 5V$  ADC, a tensão *RMS* máxima do transformador:

$$V_{\text{saída max}} = \frac{\text{tensão de pico}}{\sqrt{2}} = \frac{5V}{\sqrt{2}} = 3.53 \text{ V} \quad (3.39)$$

Para ADC unipolar

$$V_{\text{saída max}} = \frac{\text{tensão de pico}}{2\sqrt{2}} \quad (3.40)$$

Por exemplo, como entre 0 e 3,3V ADC, a tensão *RMS* máxima do transformador:

$$V_{\text{saída max}} = \frac{\text{tensão de pico}}{2\sqrt{2}} = \frac{3,3V}{2\sqrt{2}} = 1.16V \quad (3.41)$$

Etapa 2: Determinação do resistor limitador de corrente de entrada R1

O resistor limitador de corrente

$$R_1 = \frac{V_{\text{entrada}}}{I} \quad (3.42)$$

Onde ( $V_{\text{entrada}}$ ) é a tensão nominal de entrada e ( $I$ ) é a corrente operacional nominal (quando a resistência da bobina é comparada com o resistor limitador de corrente ( $R_1$ ), ela pode ser ignorada).

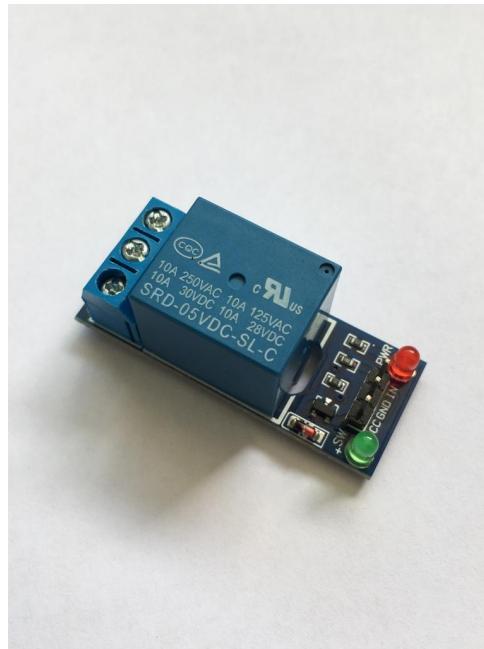
Lembrando que o ZMPT101B normalmente trabalha em corrente nominal:  $1 \sim 2$  mA. Quando a tensão nominal de entrada  $\leq 100$  V, geralmente escolhendo a corrente de operação  $I = 2$  mA; quando a tensão nominal de entrada  $\geq 200$  V, para reduzir a potência do resistor, geralmente escolhendo a corrente de operação  $1 \text{ mA} \leq I \leq 2 \text{ mA}$ .

### 3.3.3 Módulo Relé Eletromecânico

O relé é um dispositivo eletromagnético utilizado em diversas áreas e aplicações para controlar circuitos de alta corrente. Ele é compatível com a maioria dos sistemas eletrônicos comuns, pois consiste em uma bobina operando com tensão de controle de 5VDC. Além disso, sua estrutura é compacta, o que torna o relé eletromecânico eficiente nos circuitos quanto a sua durabilidade. Ele é composto por contatos móveis e contatos fixos que podem estar em um estado de normalmente aberto, normalmente fechado e contato comum. Ao ser aplicada uma certa tensão, o contato móvel é magnetizado atraindo os contatos fixos e mudando o estado do relé.

A seguir na Figura 8 é possível ver o relé eletromecânico utilizado para permitir o controle da alimentação da carga.

Figura 8 – Relé Eletromecânico



Fonte: Autores, 2023.

Algumas das aplicações comuns incluem:

- Automação residencial e industrial;
- Controle de motores elétricos;
- Acionamento de dispositivos eletrodomésticos;
- Controle de iluminação;
- Controle de temperatura e climatização;
- Sistemas de segurança e alarme.

É importante ressaltar que para o uso do relé SRD-05VDC-SL-C 10A, foi necessário consultar o *datasheet* e outras informações técnicas específicas do fabricante. Assim, é possível obter detalhes adicionais sobre as características e o uso correto deste componente.

Dessa forma, foi possível observar que o relé eletromecânico SRD-05VDC-SL-C 10A é um componente confiável e de fundamental importância para essa aplicação.

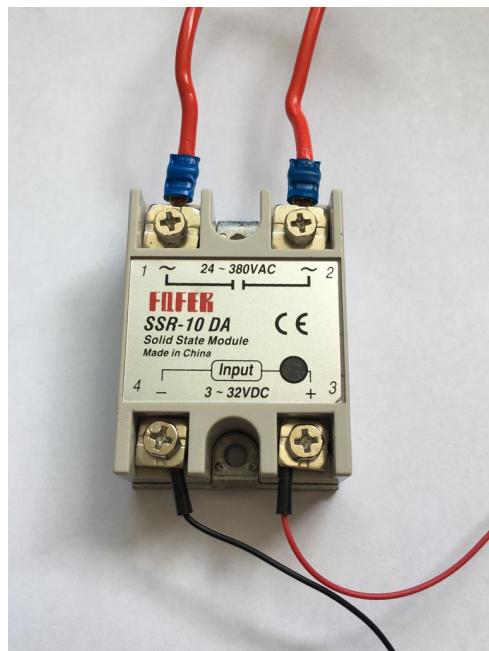
### 3.3.4 Módulo Relé Eletroestático

O princípio de funcionamento do relé de estado sólido é baseado: (1) na ação de comutação de semicondutores; (2) na ação de isolamento de um optoacoplador - componente que transfere sinais elétricos entre dois circuitos isolados utilizando luz -ou transformador

de alta frequência em SSRs baseados em transformador (EQUIPMENT, 2022). Para entender melhor o seu funcionamento, deve-se examinar brevemente os fundamentos desse tipo de relé e sua construção ou circuito interno.

Na Figura 9 a seguir é possível ver o relé Eletroestático utilizado.

Figura 9 – Relé Eletroestático



Fonte: Autores, 2023.

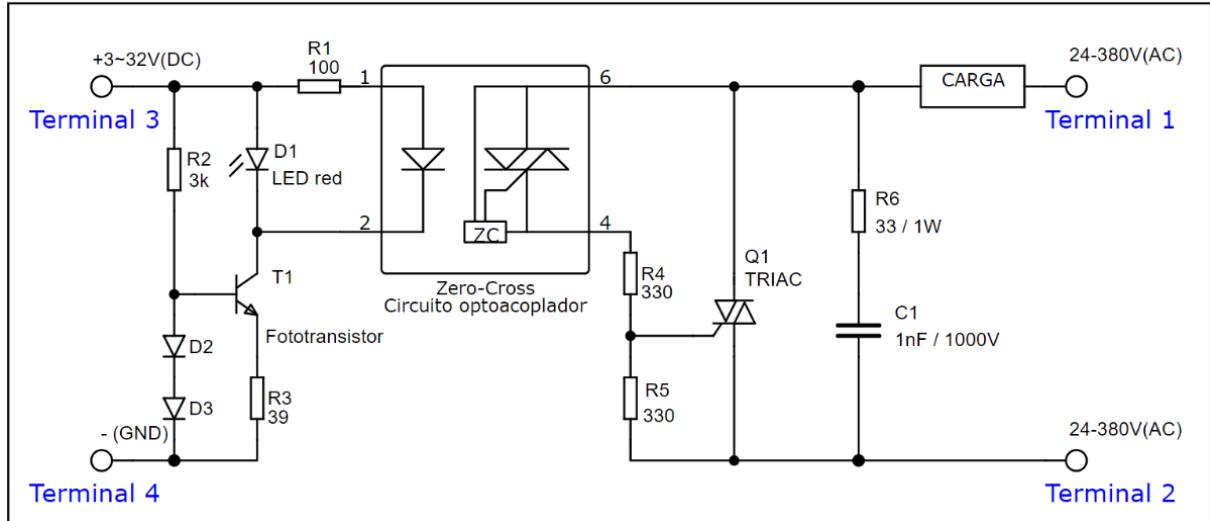
Os relés de estado sólido são definidos como dispositivos eletrônicos de comutação que ligam/desligam cargas quando pequenas tensões externas são aplicadas em seus terminais de controle. Seu funcionamento normalmente consiste em um interruptor de gatilho, que é acionado pela aplicação de tensão (AC ou DC), e o interruptor principal, que controla a corrente de carga.

Diferente dos relés eletromecânicos convencionais, os SSRs não possuem partes móveis e, portanto, não formam arco e são mais confiáveis. Eles também comutam mais rapidamente e podem se conectar a circuitos lógicos, podendo usar um optoacoplador para isolamento e um transformador. A combinação de ambos é normalmente conhecida como SSR de funcionamento híbrido.

- **Princípio de funcionamento**

Na Figura 10 a seguir é apresentado o circuito do relé de estado sólido.

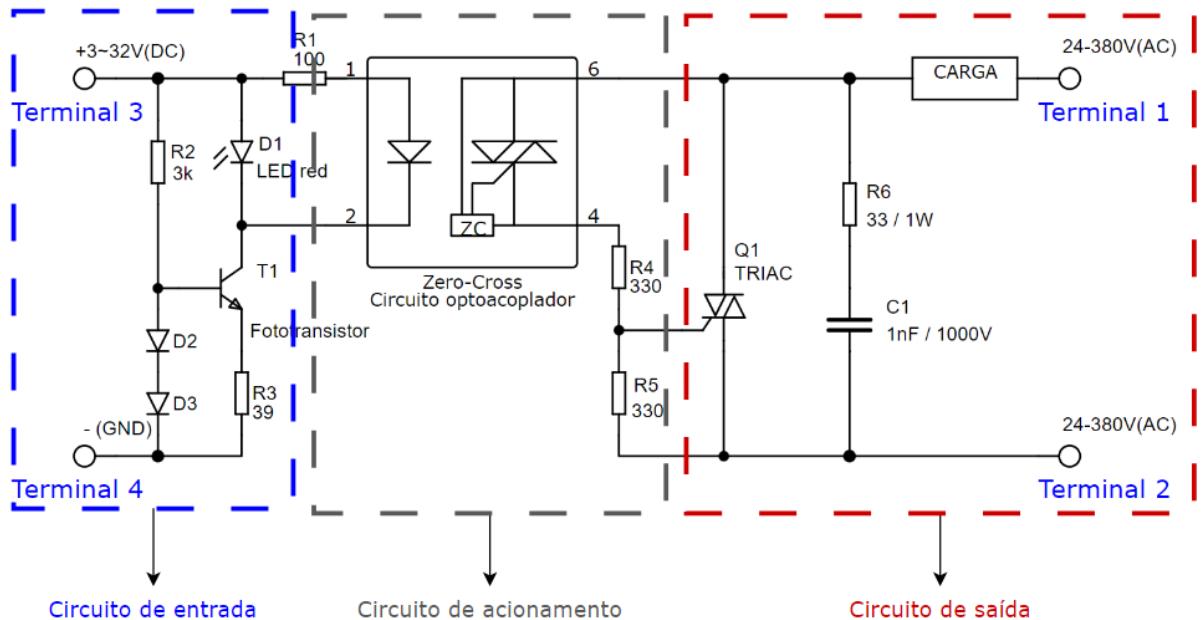
Figura 10 – Circuito do relé de estado sólido.



Fonte: Adaptado de (MARPIK, 2022) - EasyEDA open source hardware lab, 2017.

Para um melhor funcionamento desse tipo de relé, é importante conhecer como seu circuito e componentes estão dispostos. O circuito do relé de estado sólido é composto por um circuito de entrada ou controle, um circuito de acionamento e um circuito ou interruptor de saída, de acordo com Figura 11.

Figura 11 – Circuito do relé de estado sólido.



Fonte: Autores, 2023.

- Círculo de entrada

No circuito de entrada é onde a tensão de controle é aplicada. É também chamado de circuito de controle. A tensão pode ser AC ou DC ou uma combinação de ambas. Algumas especificações com relação ao funcionamento do relé são:

- ⇒ Quando não há tensão aplicada, o LED é desligado e não há corrente fluindo através dele. Isso significa que o transistor no circuito de saída também está desligado e não há corrente fluindo pela carga;
- ⇒ Quando a tensão de controle é aplicada, o LED é ligado, permitindo que a corrente flua através dele. Isso, por sua vez, ativa o fototransistor no lado de saída do circuito do relé;
- ⇒ Uma tensão de controle de relé de estado sólido pode ser AC ou DC, mas deve estar dentro da faixa operacional especificada do SSR. Isso geralmente está na faixa de 3V a 32V. Se a tensão for muito alta ou baixa, o SSR não funcionará corretamente.

- **Círculo de acionamento**

O circuito de acionamento é o que ativa o optoacoplador, que por sua vez, liga o transistor no circuito de saída. O transistor então controla a corrente de carga. Na sequência abaixo é detalhado o funcionamento do relé. Neste estágio:

- ⇒ O drive SSR normalmente consiste nos seguintes minicircuitos: o circuito de isolamento ou acoplamento, o circuito de função e, finalmente, o circuito de disparo;
- ⇒ O circuito de acoplamento de isolamento é usado para isolar eletricamente o lado de controle e carga do SSR. Isso é importante porque evita que qualquer tensão ou corrente flua entre os dois lados, o que poderia danificar o SSR;
- ⇒ O isolamento galvânico do relé de estado sólido, como também é chamado o circuito de isolamento, usa principalmente um LED ou diodo infravermelho para acoplar ou acionar o transistor no lado da carga. Observe que alguns relés usam isolamento de transformador ou transformador e LED;
- ⇒ O circuito de função pode incluir retificadores, proteção, detecção e vários outros circuitos. O circuito de disparo, como o próprio nome sugere, é usado para acionar o circuito de saída. A saída então, usando dispositivos semicondutores, controla a função liga/desliga da carga.

- **Círculo de saída**

O circuito de saída do relé de estado sólido é a parte encarregada em ligar/desligar as fontes de alimentação da carga. Consiste principalmente em um transistor ou chip de saída, um supressor de tensão transiente e também pode incorporar um circuito de realimentação. Seu comportamento é o seguinte:

- ⇒ Ao receber o sinal de disparo do circuito de acionamento, o transistor de saída de alta potência é ligado, permitindo que a corrente flua através da carga. Este circuito é, portanto, normalmente conectado diretamente à fonte de alimentação da carga especificada;
- ⇒ O controle de energia recebida é feito pelo TRIAC – componente eletrônico amplamente utilizado em aplicações de limitação de energia. Sendo capaz de alternar altas tensões e altos níveis de corrente, e em ambas as partes de uma forma de onda AC;
- ⇒ A saída do relé de estado sólido (quando nominal AC) pode ser do tipo monofásico ou trifásico. Eles também podem ser do tipo *zero-crossing* ou *random-turn-on*. Estes termos significam respectivamente cruzamento zero, e cruzamento aleatório, os quais se refere ao tempo de cruzamento do *SSR*. A diferença entre os dois é que, embora as juntas cruzadas de ângulo zero sejam adequadas para controlar cargas indutivas como motores e ventiladores, as juntas cruzadas de ângulo zero são mais especializadas para comutação de cargas resistivas.

## 3.4 Microcontroladores

Os microcontroladores apresentam características de um sistema computacional completo, integradas em um único chip, e estão presentes em uma ampla gama de dispositivos. Internamente, possuem um processador, uma memória para armazenamento temporário de dados, a memória *RAM*, uma memória para armazenamento do programa, a memória *EEPROM*, recursos de entrada e saída, capacidades de comunicação, um gerador de sinais de interrupção, um conversor analógico-digital, e outras características específicas que variam de acordo com o fabricante (ORDOÑEZ, 2003).

### 3.4.1 ESP32

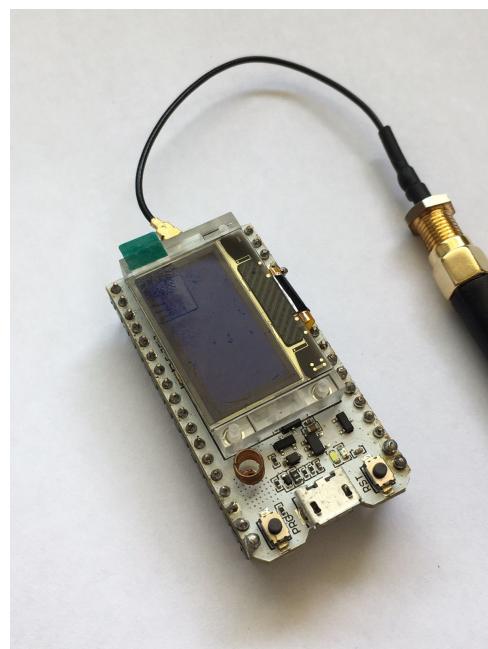
O microcontrolador *ESP32* é um dispositivo eletrônico altamente versátil e de baixo custo que desempenha um papel crucial no desenvolvimento de projetos de Internet das Coisas (IoT). Introduzido pela *Espressif Systems*, o *ESP32* é considerado uma evolução do seu antecessor, o *ESP8266*, devido às suas capacidades aprimoradas e recursos adicionais.

Nesse projeto utiliza-se o microcontrolador *ESP32*, ele nada mais é do que uma placa de desenvolvimento de código aberto que utiliza o chip *ESP32*. É muito semelhante

ao *Arduino Uno*, visto que ambos são microcontroladores. A vantagem de utilizar o *ESP32* é que ele possui *Wi-Fi* e *Bluetooth* nativo, dessa forma essa placa é ideal para projetos de automação residencial e implementação *IOT*.

Apresentando mais alguns detalhes relacionados à estrutura da *ESP32*, dado que esse dispositivo possui: 36 pinos digitais dos quais 16 podem ser utilizados como saída PWM (controle de dispositivos variando a intensidade). Outro diferencial é a possibilidade de fazer a programação da placa via OTA (*Over The Air*), assim, através do *Wi-Fi* é possível programar o *ESP32*. Além disso, é possível programar a placa com a linguagem C++ dentro da IDE do *Arduino*. Na Figura 12 é possível ver a *ESP32 LoRa* da fabricante Heltec.

Figura 12 – *ESP32*



Fonte: Autores, 2023.

O *ESP32* é baseado na arquitetura de processador *Xtensa LX6*, que oferece uma capacidade de processamento poderosa, tornando-o adequado para aplicações de *IoT* que exigem cálculos complexos. O microcontrolador é alimentado por um processador *dual-core*, o que permite a execução simultânea de múltiplas tarefas, otimizando o desempenho e a eficiência energética.

A Tabela 2 a seguir mostra as especificações técnicas

Tabela 2 – Especificações da placa ESP32

<b>CPU</b>	240MHz Tensilica LX6 dual-core+1 ULP, 600 DMIPS
<b>RAM</b>	520KB internal SRAM
<b>FLASH</b>	8MB(64M-bits) SPI FLASH
<b>Clock máximo</b>	240Mhz
<b>LoRa Chipset</b>	SX1276/SX1278

Fonte: Autores, 2023.

## 3.5 Linguagens de Programação

As linguagens de programação são ferramentas utilizadas para expressar instruções e algoritmos de forma que possam ser compreendidos e executados por um computador. Elas fornecem uma estrutura e um conjunto de regras que permitem aos programadores escreverem códigos que realizam tarefas específicas. Essas linguagens podem ser aplicadas em diversos contextos, abrangendo desde o controle de sistemas complexos, como usinas, até o desenvolvimento de jogos eletrônicos para dispositivos móveis. ([SEBESTA, 2012](#))

### 3.5.1 C++

Criada por Bjarne Stroustrup nos laboratórios Bell na década de 1980, a linguagem de programação C++ é uma extensão da linguagem C com recursos de programação orientada a objetos. Stroustrup desenvolveu o C++ com o intuito de fornecer aos programadores um ambiente flexível e eficiente para o desenvolvimento de software de sistemas complexos. O C++ combina os recursos de programação de baixo nível do C com as vantagens da orientação a objetos, como encapsulamento, herança e polimorfismo. ([STROUSTRUP, 1994](#))

#### 3.5.1.1 Biblioteca C++ arduinoFFT

A biblioteca arduinoFFT é uma biblioteca C++, projetada para uso em microcontroladores, que permitem o cálculo de uma Transformada de Fourier Rápida (FFT) em um microcontrolador como a ESP32 ou Arduino. A biblioteca foi criada por Enrique Condes e foi projetada para ser implementada com o Arduino IDE.

Ao popular o vetor de entrada com leituras do sensor, conforme orientado pelo guia de *API* do autor da biblioteca, configurada a função para o domínio do tempo, e chamada para sua execução, a função irá retornar a instância da classe da biblioteca com os resultados do processamento que então poderão ser usados para obter medidas como frequência, magnitude e o valor de pico que é buscado para o cálculo ([CONDES, 2021](#)).

### 3.5.2 Javascript

A linguagem de programação JavaScript foi criada por Brendan Eich em 1995, durante seu trabalho na Netscape Communications Corporation ([FLANAGAN; NOVAK, 1998](#)). Inicialmente, a linguagem foi desenvolvida para ser executada no navegador Netscape Navigator, permitindo a adição de interatividade e dinamismo às páginas da web ([FLANAGAN; NOVAK, 1998](#)). Com o tempo, o JavaScript evoluiu e se tornou uma das linguagens de programação mais populares, sendo adotada em diversos contextos, desde o desenvolvimento front-end de aplicações web até o desenvolvimento de aplicações server-side com o Node.js ([FLANAGAN; NOVAK, 1998](#)).

#### 3.5.2.1 Biblioteca Javascript React

Desenvolvida pelo Facebook, a biblioteca JavaScript React é uma ferramenta poderosa para a construção de interfaces de usuário em aplicações web. Criada por Jordan Walke, engenheiro de software do Facebook, a biblioteca foi lançada em 2013. O React utiliza uma abordagem baseada em componentes, em que a interface é dividida em elementos reutilizáveis, facilitando a construção de interfaces complexas e a manutenção do código. Além disso, o React adota um modelo de renderização virtual eficiente, que otimiza as atualizações no DOM para melhor desempenho. Com sua popularidade crescente, o React se tornou uma escolha comum para o desenvolvimento de aplicações web modernas. ([BANKS; PORCELLO, 2017](#))

O principal conceito subjacente ao React é a criação de uma representação virtual do DOM (Document Object Model) conhecida como "Virtual DOM". O DOM é uma estrutura que representa a hierarquia de elementos HTML em uma página da web ([MDN, 2023a](#)). Através do uso do Virtual DOM, o React é capaz de atualizar somente os elementos que foram modificados, ao invés de reconstruir toda a página, o que resulta em um desempenho otimizado e uma experiência do usuário mais fluída. Um dos principais benefícios do React é a sua abordagem baseada em componentes.

Os componentes no React são blocos isolados de código que encapsulam a lógica e a renderização da interface de usuário. Esses componentes podem ser facilmente reutilizados em diferentes partes da aplicação, o que promove a modularidade e a manutenção do código. Além disso, o React permite a criação de componentes compostos, onde um componente pode ser composto por outros componentes menores, formando uma hierarquia estruturada ([META, 2023](#)).

# 4 Metodologia

Com o propósito de determinar os materiais a serem utilizados na implementação do projeto em questão, foram considerados tanto o funcionamento dos componentes quanto o seu custo. Verificou-se a necessidade de um microcontrolador para processar os dados, um sensor de corrente, um sensor de tensão para coletar as informações sobre as grandezas elétricas, um duplo sistema de proteção com relés, sendo um eletroestático - acionado em casos de variação instantânea de tensão - e um outro eletromecânico - com um acionamento comutado após o primeiro.

## 4.1 Ferramentas e Recursos Utilizados

Durante a fase de projeto, foram escolhidas as tecnologias e ambientes de acordo com as necessidades requisitadas, vantagens oferecidas e a familiaridade prévia com aquele tipo de tecnologia, como linguagens de programação e *frameworks*, que são um conjunto de bibliotecas, módulos e classes prontas para uso, que definem uma estrutura e um conjunto de padrões para desenvolvimento (FOWLER, 2012).

Para a programação da interface do usuário, que terá acesso interface para visualizar informações das grandezas elétricas e enviar comandos de controle ao microcontrolador, foi utilizado o Visual Studio Code<sup>1</sup> na versão 1.80, que é um editor de texto de propósito geral, desenvolvido pela Microsoft, de código aberto e com suporte para uma grande diversidade de linguagens de programação e sistemas operacionais.

Para programação do software, destinado ao microcontrolador ESP32, foi utilizada a Arduíno IDE<sup>2</sup> em sua versão 2.1.1. É um Ambiente de Desenvolvimento Integrado desenvolvido pela Arduíno Software, de código aberto, compatível com Windows, Mac e Linux, e gratuito que permite programar, conectar e enviar o software compilado ao microcontrolador conectado.

Para desenvolvimento da aplicação *web* foi preciso configurar o ambiente de acordo com os pré requisitos para uso da biblioteca React<sup>3</sup>. A principal dependência é o NodeJS, que é um ambiente de execução para códigos em Javascript<sup>4</sup>, o gerenciador de pacotes npm<sup>5</sup> e a *framework* NextJS<sup>6</sup> para criar a pasta pré configurada com o React, bibliotecas básicas necessárias e estrutura de arquivos.

<sup>1</sup> <<https://code.visualstudio.com/>>

<sup>2</sup> <<https://www.arduino.cc/>>

<sup>3</sup> <<https://react.dev/>>

<sup>4</sup> <<https://www.ecma-international.org/publications-and-standards/standards/ecma-262/>>

<sup>5</sup> <<https://www.npmjs.com/>>

<sup>6</sup> <<https://nextjs.org/>>

Para montagem do protótipo do projeto apresentado foram utilizadas as peças na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Equipamentos utilizados para montagem do protótipo

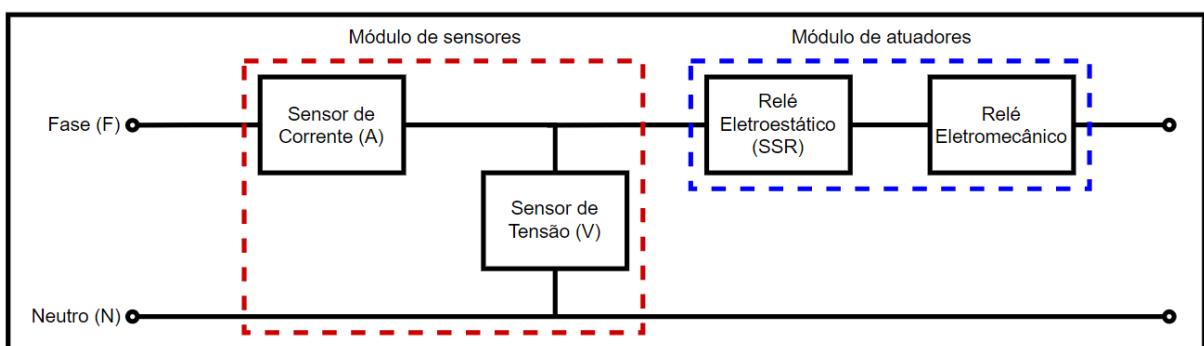
Descrição	Quantia	Valor
ESP32 LoRa Heltec	1	R\$ 175,96
Sensor de tensão ZMPT101b	1	R\$ 19,50
Sensor de corrente ACS712	1	R\$ 9,93
Relé Eletromecânico	1	R\$ 10,50
Relé Eletroestático SSR 10DA	1	R\$ 32,80
Protoboard 400 Pontos	1	R\$ 11,31
Jumpers	60	R\$ 17,00
<b>Total</b>		<b>R\$ 277,00</b>

Fonte: Autores, 2023.

## 4.2 Circuito

Após definição dos componentes do circuito, este foi ilustrado num diagrama de blocos. Na Figura 13 tem-se a divisão do circuito em dois módulos. O primeiro deles, o módulo de sensores, é responsável por realizar a captura de dados referentes à corrente e tensão. O segundo, referente aos atuadores, os dois relés, atuam nas ações mecânicas em resposta aos comandos recebidos pelo sistema de controle no microcontrolador, transformando uma requisição HTTP recebida pelo servidor em uma alteração do estado do relé.

Figura 13 – Diagrama em blocos do circuito utilizado.

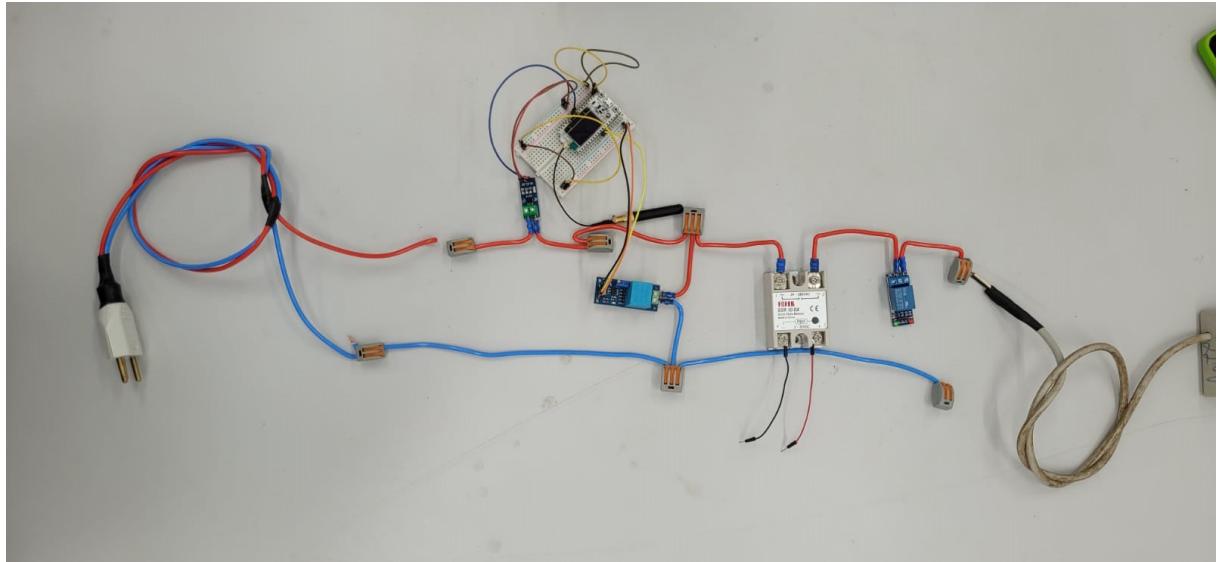


Fonte: Autores, 2023.

Para montagem do circuito, foram feitas as conexões dos sensores na linha de entrada de corrente alternada, que faz a alimentação do componente eletrônico conectado ao plug da tomada de entrada no circuito. Para as linhas de fase, neutro e terra foram utilizados os fios com cores de acordo com Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Na linha de fase foram utilizadas as cores vermelha e preta, onde foi conectado o

sensor de corrente em série com a linha de fase e o sensor de corrente em paralelo, ligando uma parte na linha de fase e a outra parte no neutro, cuja cor do fio é azul, e para o terra foi utilizada a cor verde. Além disso, depois de serem feitas as conexões dos sensores, foi colocada uma parte de módulos de atuadores, onde foram conectados o relé estático e o relé eletromecânico na linha de fase, e por fim, a conexão do dispositivo no qual será aplicada a medição. Na Figura 14 a seguir é ilustrado o protótipo do circuito montado.

Figura 14 – Protótipo do circuito montado

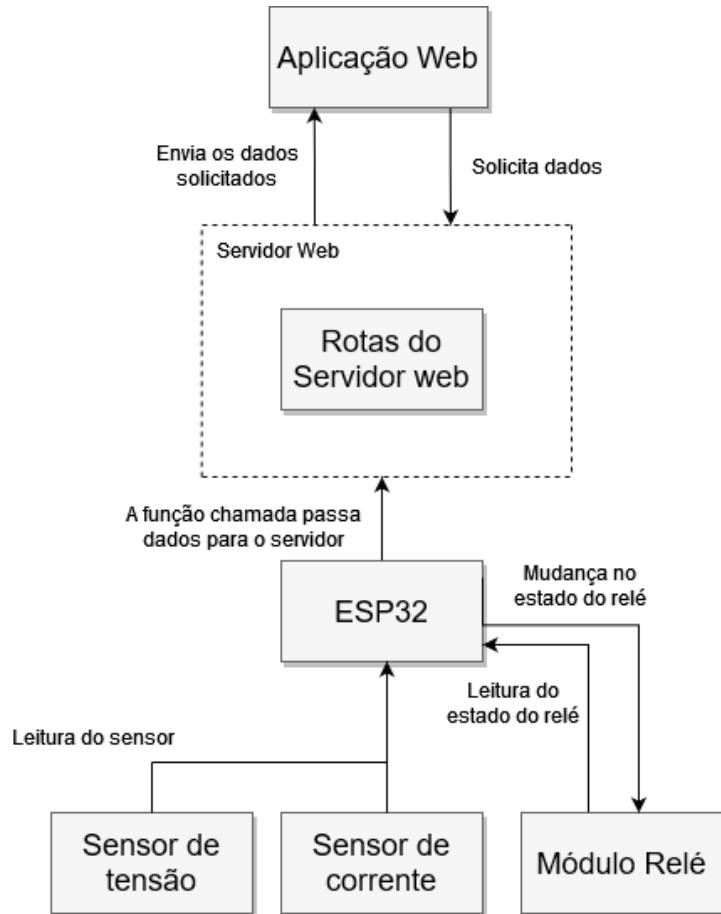


Fonte: Autores, 2023.

### 4.3 Arquitetura do Programa

O trânsito de dados de toda a aplicação pode ser dividido em 3 partes: aplicação *web*, servidor e o ESP32. A figura a seguir representa o diagrama do fluxo de informações. Cada elemento da aplicação tem uma responsabilidade que permite o funcionamento correto do sistema como um todo.

Figura 15 – Arquitetura da aplicação desenvolvida



Fonte: Autores, 2023.

O ponto de partida do fluxo ocorre mediante os sensores responsáveis por registrar as variáveis físicas, as quais abrangem categorias como tensão elétrica, corrente elétrica, e também controlar o acionamento do relé. Esses módulos encontram-se diretamente conectados ao ESP32, cujo papel é centralizar os dados e processá-los, a fim de transmiti-los posteriormente ao servidor em execução no próprio dispositivo.

A ligação entre o cliente *web* e o servidor é estabelecida por meio da rede WiFi, criada através do Access Point no código enviado a ESP32, utilizando-se um protocolo de transferência de hipertexto conhecido como HTTP, fazendo uso dos métodos GET e POST, de acordo com a etapa correspondente. O HTTP é um protocolo que viabiliza a obtenção de recursos através de requisições. Ele constitui a base para toda a troca de dados na *web*, sendo um protocolo cliente-servidor, no qual as requisições são iniciadas pelo destinatário (FIELDING; NOTTINGHAM; RESCHKE, 2022).

Neste software, a obtenção das informações dos sensores é feita através de uma requisição GET feita para o servidor na ESP32 e a mudança de estado do relé também através de um GET.

O destino final das informações é a aplicação *web*, cujo objetivo é receber as informações dos sensores e mostrar, no cliente *web*, ao usuário final, para monitorar as grandezas elétricas e controlar o relé ligado ao dispositivo no circuito.

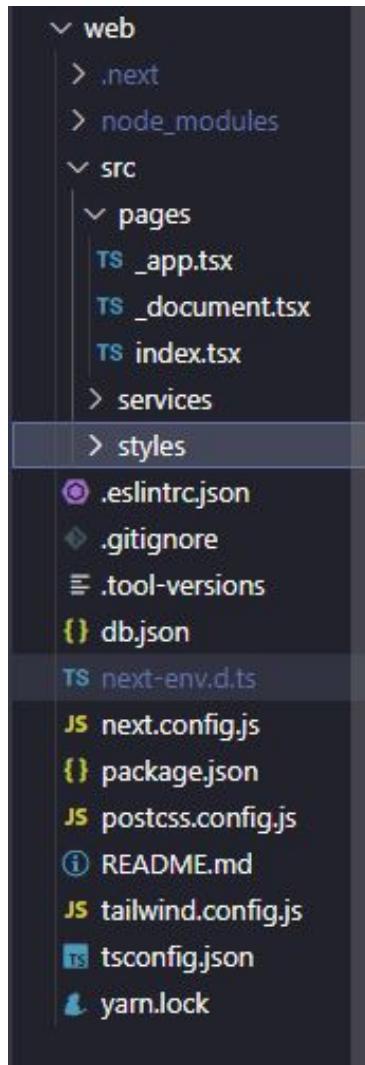
#### 4.3.1 Aplicação Web

Nesta etapa do desenvolvimento do software, destaca-se a programação da aplicação *web*. Empregou-se a biblioteca React com a *framework* Nextjs, para construção ágil de uma interface *web* moderna, de fácil manutenção e que pode ser acessada também em dispositivos móveis por se tratar de uma página *web*.

No gerenciamento do projeto React foi utilizada a ferramenta npm para gerenciar pacotes, executar scripts de configuração e executar comandos para o ambiente de desenvolvimento ser iniciado.

Para o desenvolvimento utilizando essas ferramentas, foi empregada a linguagem JavaScript. Essa linguagem de programação possibilita a criação de conteúdos que apresentam atualizações dinâmicas, controle de mídias, imagens em movimento e outros recursos ([MDN, 2023b](#)).

Durante o desenvolvimento do aplicativo, foram utilizados os recursos da *Command Line Interface* (CLI), fornecidos pelo próprio npm. Através dessa interface de comando, é possível criar um projeto com configurações prévias, o que resulta em economia de tempo e aumento da produtividade como é mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Organização de pastas da *WebPage*.

Fonte: Autores, 2023.

Foram feitas alterações na estrutura de arquivos para adequar o projeto a uma única página. Na criação e estilização da interface, foram utilizadas as bibliotecas Radix UI<sup>7</sup> e TailwindCSS<sup>8</sup>, na qual a primeira oferece componentes prontos que podem ser estilizados e a segunda permite inserir *CSS* de uma forma dinâmica e com classes pré programadas no código React.

A camada lógica do frontend é responsável por estabelecer a conexão entre os dados provenientes do servidor, e essa responsabilidade é atribuída aos arquivos em *JavaScript*. A estrutura de arquivos e os relacionamentos dentro da aplicação são estabelecidos pelos princípios do React.

O processo de inicialização do aplicativo é dado a partir do arquivo `_app.tsx`, localizado no diretório principal do projeto. Esse arquivo é responsável por determinar a

<sup>7</sup> <<https://www.radix-ui.com/docs/primitives/introduction>>

<sup>8</sup> <<https://tailwindcss.com/docs/installation>>

primeira tela a ser mostrada e lidar com aspectos de estilização, como a seleção da fonte utilizada nos textos.

A biblioteca Axios<sup>9</sup> lida com as chamadas HTTP e os dados vindos da API para transmitir esses ao resto da aplicação, e a lógica de programação da página assume a responsabilidade de atualizar a página, incluindo os gráficos, com os novos dados recebidos para serem visualizados pelo usuário final.

Através de uma chamada para o servidor com a URL para solicitar dados, a biblioteca Axios obtém uma lista com as informações dos sensores, onde cada índice da lista tem um número com a leitura do sensor para atualizar o valor na página, automaticamente também atualizando a página com os novos dados.

---

### Código 1 Código React responsável pela obtenção dos dados

---

```

1  async function handleGetData() {
2    try {
3      setIsLoading(true);
4
5      const response = await api.get("http://192.168.0.1:80/data");
6      const data: number[] = response.data;
7
8      let newArray: number[] = [...powerArray, data[0]];
9      setPowerArray(newArray);
10     let newArray: number[] = [...currentArray, data[1]];
11     setCurrentArray(newArray);
12     let newArray: number[] = [...voltageArray, data[2]];
13     setVoltageArray(newArray);
14   } catch (error) {
15     console.log(error);
16   } finally {
17     setIsLoading(false);
18   }
19 }
```

---

Ao executar o comando `npm run dev` no diretório do projeto, o npm é acionado para iniciar o servidor que serve o cliente *web* ao navegador. A página *web* pode ser compartilhada com a rede local para ser acessada em outros dispositivos na mesma rede.

Conforme novas funcionalidades são desenvolvidas, o código do aplicativo se torna cada vez mais complexo. Com o objetivo de lidar com essa escalabilidade, foi aplicado o conceito de controle de versão do código. O Git foi utilizado para esse fim, e o GitHub<sup>10</sup> foi selecionado como a plataforma para hospedar o código fonte. Em caso de necessidade, é possível retroceder para uma versão anterior, por exemplo, se ocorrer algum erro na implementação.

#### 4.3.2 Programação no Microcontrolador

No desenvolvimento da programação do código destinado ao ESP32, foi feito uso das bibliotecas `WebServer.h` e `WiFi.h` como principais componentes dessa parte do software,

---

<sup>9</sup> <<https://axios-http.com/>>

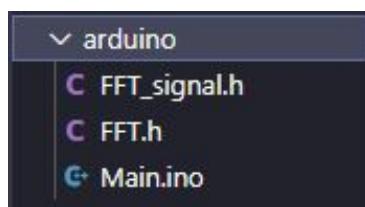
<sup>10</sup> <<https://github.com/>>

pois, providenciaram formas de iniciar um servidor e criar uma rede *WiFi* pelo controlador ESP32.

Para gerenciamento do projeto utilizou-se apenas do Arduino IDE para instalar bibliotecas, escrever o código e enviá-lo ao microcontrolador através da conexão *USB*, e também monitorar a saída *Serial* do controlador na *IDE*.

A estrutura de arquivos é gerada automaticamente pela *IDE*, as bibliotecas também são gerenciadas automaticamente e fica na pasta do projeto apenas o código principal e bibliotecas externas ao Arduino IDE conforme mostrado na Figura 17

Figura 17 – Organização de pastas do código Arduino.



Fonte: Autores, 2023.

A lógica do código foi implementada inicialmente pela leitura dos sensores, pela função `analogRead`, fornecida pela própria biblioteca básica, e criando próprias funções para o tratamento e retorno da grandeza medida pelo sensor como no exemplo abaixo onde `vref` é a voltagem de referência e `resolution` é a resolução do sensor.

### Código 2 Código C++ da função que retorna a tensão

```

1 float getVoltage()
2 {
3     int adc = analogRead(zmptPin);
4     float voltage = adc * vref / resolution;
5     return voltage;
6 }
```

E para cada rota definida no código do `setup` da programação é executada uma função que devolve a requisição com a informação definida na rota. No exemplo abaixo são devolvidas à requisição recebida as informações lidas pelos sensores através das suas respectivas funções de leitura criadas.

### Código 3 Código C++ da função responsável devolver os dados

```

1     void handle_OnConnect()
2 {
3     float c = getCurrent();
4     float v = getVoltage();
5     std::ostringstream string;
6     string << "[" << c << ", " << v << "]";
7     std::string output = string.str();
8     server.send(200, "text/plain", output.c_str());
9 }
```

Quanto ao cálculo da FTT, feito com a biblioteca de (CONDES, 2021), são inseridos os valores obtidos da leitura do sensor no vetor de entrada, iniciada a contagem do tempo, necessário para que a FTT seja calculada, até que o vetor seja preenchido com a quantidade definida de amostras e feita a chamada do construtor para então criar o objeto da classe da biblioteca, utilizando os métodos de cálculo para então obter a FFT. Um exemplo da execução desse código é demonstrado abaixo.

---

#### Código 4 Código para cálculo da FFT

---

```

1 const uint16_t samples = 128;
2 #define CHANNEL 25
3
4 void loop()
5 {
6     microseconds = micros();
7     for(int i=0; i<samples; i++)
8     {
9         vReal[i] = analogRead(CHANNEL);
10        vImag[i] = 0;
11        while(micros() - microseconds < sampling_period_us){
12            //empty loop
13        }
14        microseconds += sampling_period_us;
15    }
16    FFT = arduinoFFT(vReal, vImag, samples, samplingFrequency); /* Create FFT object */
17    FFT.Windowing(FFT_WIN_TYP_HAMMING, FFT_FORWARD);           /* Weigh data */
18    FFT.Compute(FFT_FORWARD); /* Compute FFT */
19    Serial.println("Computed Real values:");
20    PrintVector(vReal, samples, SCL_INDEX);
21    FFT.ComplexToMagnitude(); /* Compute magnitudes */
22    Serial.println("Computed magnitudes:");
23    double x = FFT.MajorPeak();
24    Serial.println(x, 6);
25 }
```

---

Ao ter o código finalizado, ele é enviado ao ESP32 clicando no botão de upload do Arduino IDE, fazendo com que o código seja compilado e, se não forem detectados erros de compilação, enviado ao controlador para que seja executado após ser reiniciado com o novo código carregado.

## 4.4 Testes do Projeto

Após a conclusão de todas as etapas relacionadas ao desenvolvimento do projeto, foram conduzidos testes para verificar a medida e funcionamento dos sensores, e a visualização dos dados na aplicação *web*.

Quanto à montagem e leitura dos sensores, foi aplicado um circuito com uma lâmpada como carga para testes das medidas dos sensores, onde as leituras foram lidas e escritas na porta *Serial* para que pudessem ser visualizadas no *console* do Arduino IDE e também criados gráficos na própria IDE com os dados captados em tempo real.

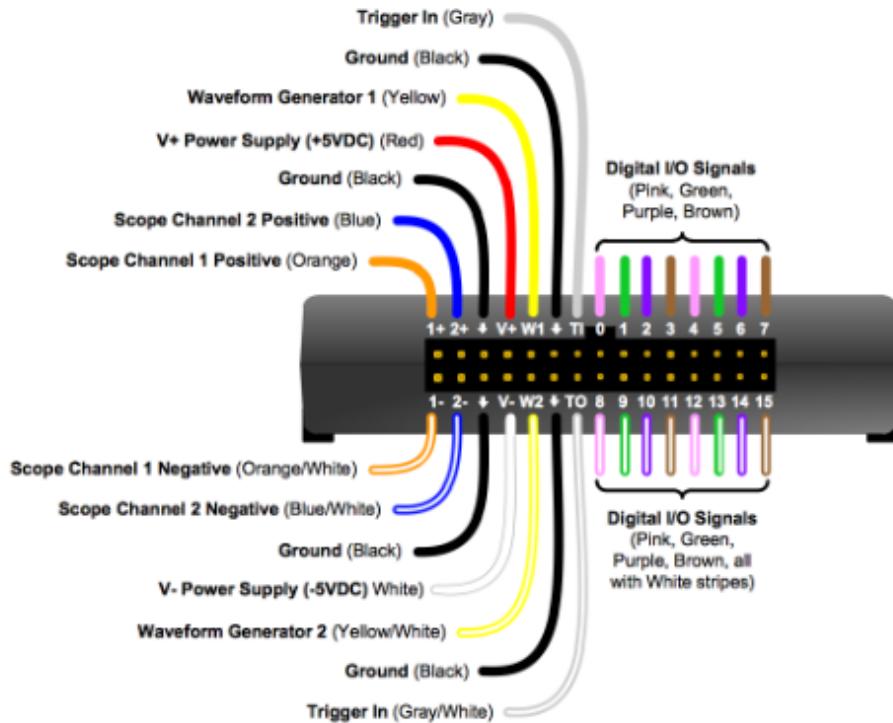
Para calibração dos sensores empregou-se o Analog Discovery (Legacy), que é um instrumento que permite medir, visualizar e analisar sinais analógicos e digitais.

Através do software WaveForms, criado para uso em conjunto com o Analog Discovery, foi manuseado como um Osciloscópio para capturar e analisar sinais analógicos. Com o software WaveForms, é possível realizar medidas de tensão, corrente, potência e até mesmo realizar análises de Fourier (FFT) ([DIGILENT, 2023a](#)).

Para uso do Osciloscópio, é necessário conectar uma sonda BNC ao Canal 1 do instrumento. Em seguida, o Canal 1 deve ser conectado para formar um circuito de loopback. Além disso, o Analog Discovery (Legacy) possui um filtro de banda de 20 MHz adicional que pode ser opcionalmente ativado para cada canal do osciloscópio ([DIGILENT, 2023a](#)).

Na Figura 18 é possível ver o tipo de cabo e as cores no dispositivo para facilitar a montagem.

Figura 18 – Digital I/O Sinais



Fonte: ([DIGILENT, 2023b](#))

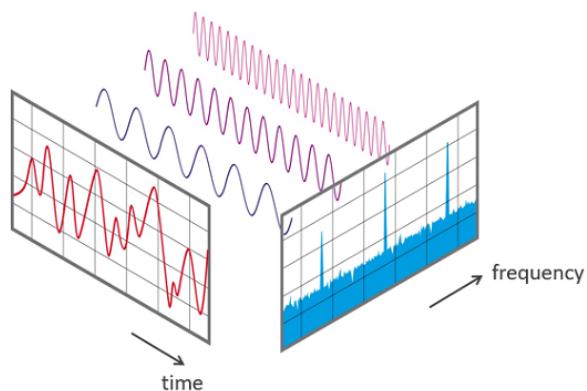
Na Figura 19 a seguir é ilustrado o instrumento Analog Discovery (Legacy).

Figura 19 – Analog Discovery (Legacy)



Fonte: ([DIGILENT, 2023a](#))

Em relação a FFT, na Figura 20 é ilustrado um sinal amostrado durante um período, dividido em seus componentes de frequência. Ao longo do período de tempo medido, é possível ver as frequências dominantes distintas.

Figura 20 – *Discrete Fourier Transformation*

Fonte: ([AUDIO, 2023](#))

# 5 Resultados e Discussões

Após a conclusão das fases de desenvolvimento e teste do protótipo, tornou-se viável realizar a análise e observação dos resultados obtidos, permitindo uma avaliação da aplicabilidade da solução proposta.

## 5.1 Aplicação Web

A aplicação web final, composta de uma página única com quatro painéis, onde três contém gráficos com valores de potência em Watts, corrente em Amperes, e tensão em Volts, e um possui controles para comunicar com o servidor executado no ESP32 e alterar valores ou estados de componentes como o relé eletromecânico.

Utilizando uma API simulada pela biblioteca JSON Server<sup>1</sup> foram simulados dados vindos do servidor para confirmar o funcionamento da lógica de obtenção de dados, atualização das informações em tela e mudança de estado do relé. O resultado pode ser visto na Figura 21.

Figura 21 – Página Web para Controle e Visualização

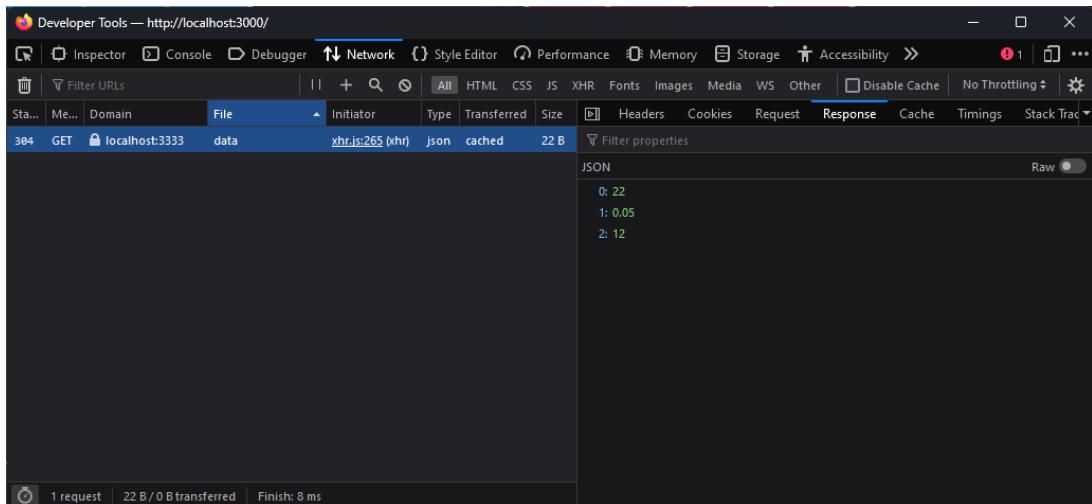


Fonte: Autores, 2023.

<sup>1</sup> <<https://github.com/typicode/json-server>>

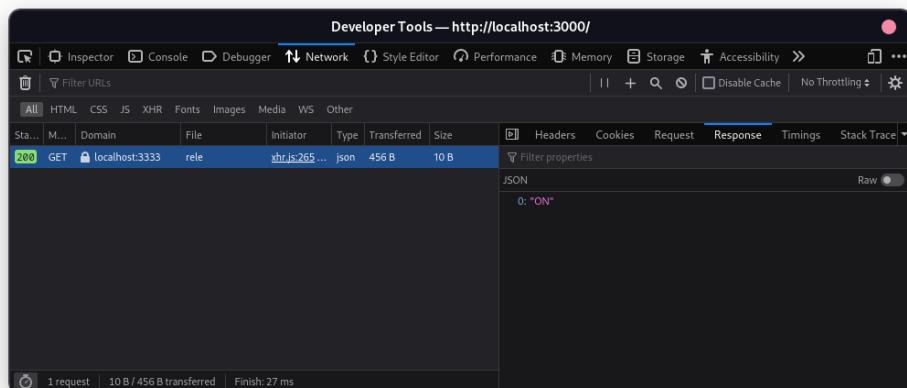
As requisições para obter os dados fictícios retornaram corretamente os dados e o estado do relé, conforme ilustrado nas Figuras 22 e 23 as requisições HTTP e as respostas recebidas.

Figura 22 – Ferramentas de Desenvolvedor do navegador mostrando a requisição de dados



Fonte: Autores, 2023.

Figura 23 – Ferramentas de Desenvolvedor do navegador mostrando a requisição do relé



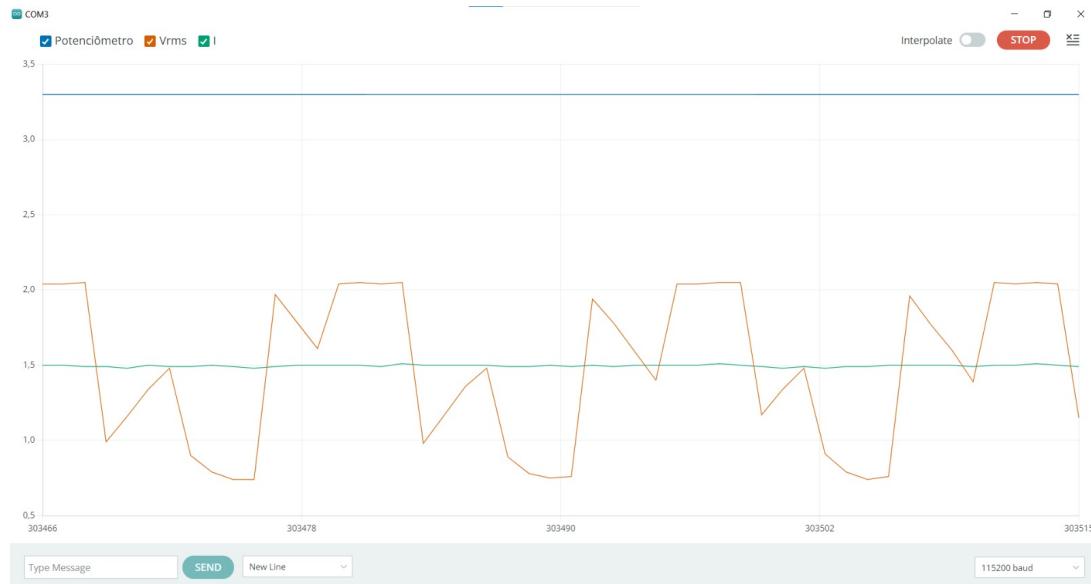
Fonte: Autores, 2023.

## 5.2 Programa do Microcontrolador

O microcontrolador escolhido, o ESP32, demonstrou-se competente ao administrar os dados e transmiti-los ao servidor de acordo com as expectativas estabelecidas.

Na Figura 24 são vistos os valores de tensão elétrica  $RMS$  e de corrente, calculados após a obtenção das medidas e tratadas pelas funções, representados como  $V_{rms}$ , a tensão eficaz, e  $I$  a corrente elétrica. Nessa Figura, é possível ver a saturação de obtenção de dados de tensão, antes de ser feito a correção com base nos dados do osciloscópio.

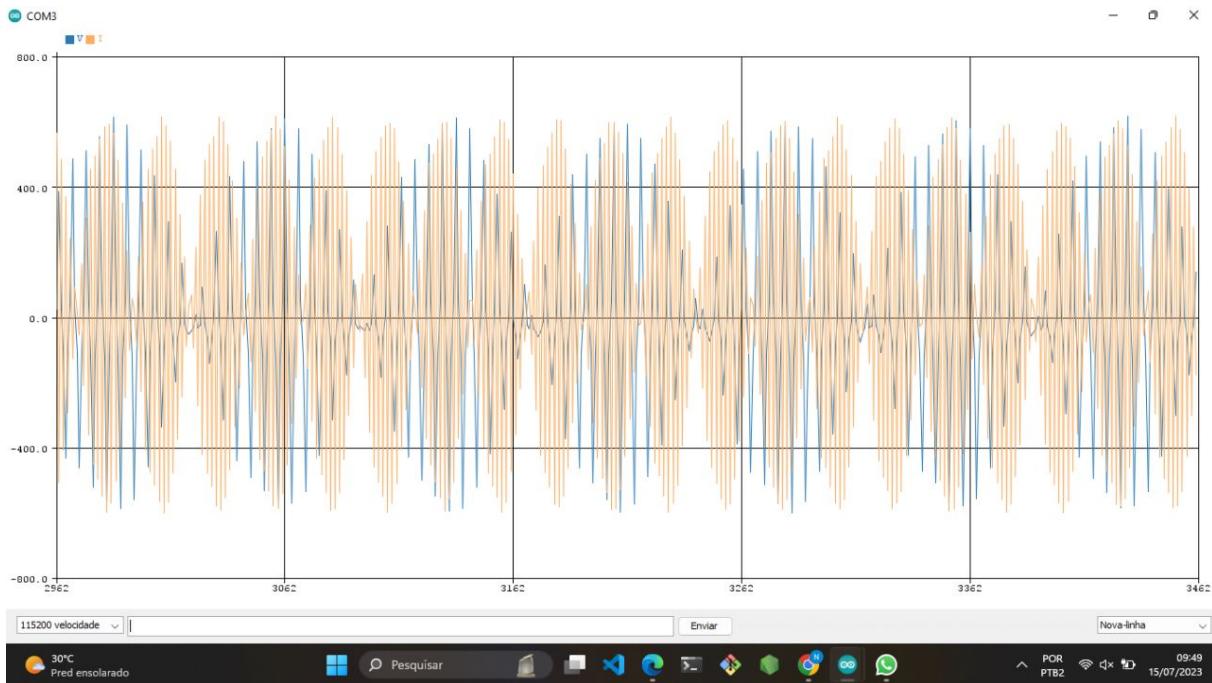
Figura 24 – Gráficos visualizados no Arduíno IDE



Fonte: Autores, 2023.

Para obtenção de dados, de acordo com o *datasheet* de cada sensor, foi necessário ser feito uma resolução, a qual o cálculo para ESP32 em especial, pois o conversor analógico para digital tem 12 bits de tamanho de dado da leitura, assim converte a entrada de 0 a 3,3 volts em um valor de 0 a 4095. Então, para manter a relação é feita a divisão de 3,3 volts por 4095 (DIGILENT, 2023c). Na Figura 25 é possível ver a senoide de corrente e tensão na IDE do Arduíno, sem o tratamento com a resolução, das leituras obtidos.

Figura 25



Fonte: Autores, 2023.

No Código 5 a seguir mostra o uso da biblioteca ArduinoFFT.h

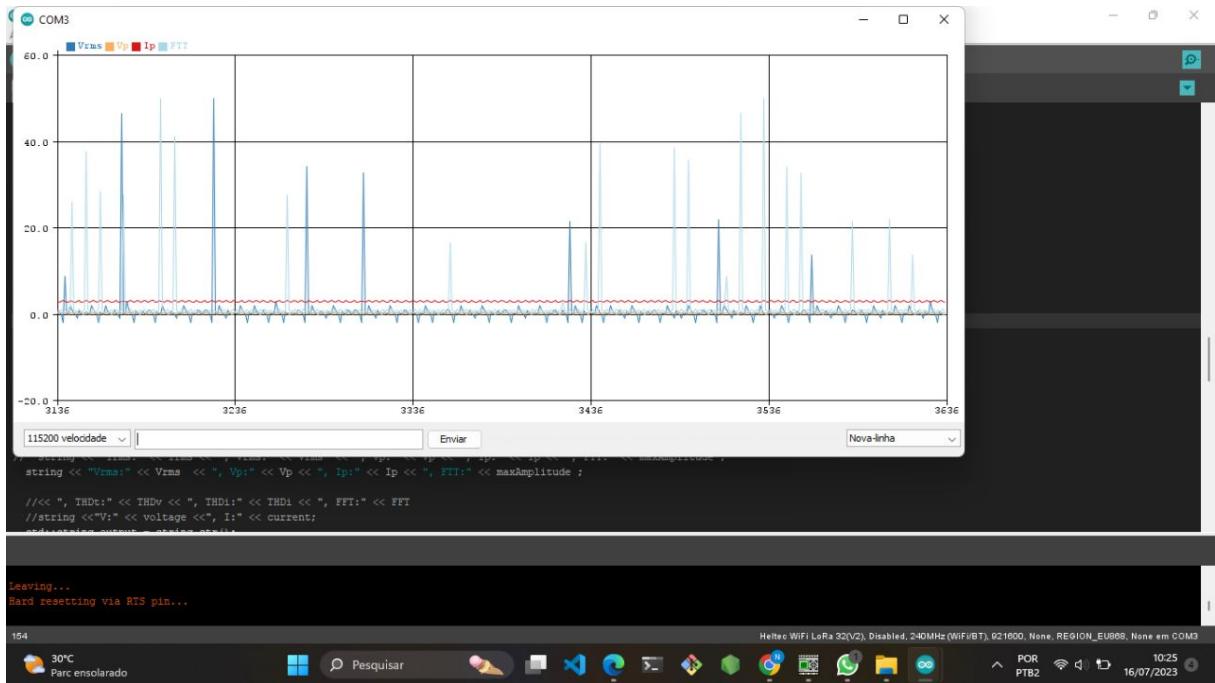
#### Código 5 Código aplicando a biblioteca arduinoFFT

```

1 FFT = arduinoFFT(vReal, vImg, samples, samplingFrequency);
2 FFT.Windowing(FFT_WIN_TYP_HAMMING, FFT_FORWARD);
3 FFT.Compute(FFT_FORWARD);
4
5 FFT.ComplexToMagnitude();
```

Na Figura 26 foi aplicada a FFT da tensão. Para a plotagem desse gráfico, como os valores estão em função do tempo, o gráfico da transformada é plotado várias vezes, não permanecendo constante, como ficaria se fosse em relação a frequência. Essa visualização é feita através do *plotter serial* do Arduíno, usando a função `delayMicroseconds()`, que permite controlar o período de amostragem.

Figura 26 – FFTv em relação ao tempo



Fonte: Autores, 2023.

A comunicação entre os dispositivos, entre o computador notebook e o ESP32, aconteceu sem complicações; a conexão ao *Acess Point* do microcontrolador ocorreu com sucesso e as requisições HTTP foram respondidas pelo servidor corretamente quando solicitadas pelo cliente web através da página acessada de forma local.

Embora as funções de *Access Point* tenham trabalhado corretamente antes, foi observado que, ao adicionar ao código o *loop* para inserir as medidas do sensor, no vetor de cálculo da biblioteca da FFT, um comportamento inesperado no ESP32 fazia com que as leituras dos sensores fossem zeradas constantemente, impossibilitando que as leituras reais dos sensores chegassem à aplicação web. Portanto, o envio das informações dos sensores foi feito sem incluir o cálculo de FFT durante os experimentos. Na Figura 27 a seguir, mostram-se as leituras incorretas enviadas à porta Serial pelo software.

Figura 27 – *Serial Monitor* do Arduino IDE com o código incluindo FFT

Output   Serial Monitor X

Message (Enter to send message to 'Heltec WiFi LoRa 32(V2)' on '/dev/ttyUSB0')

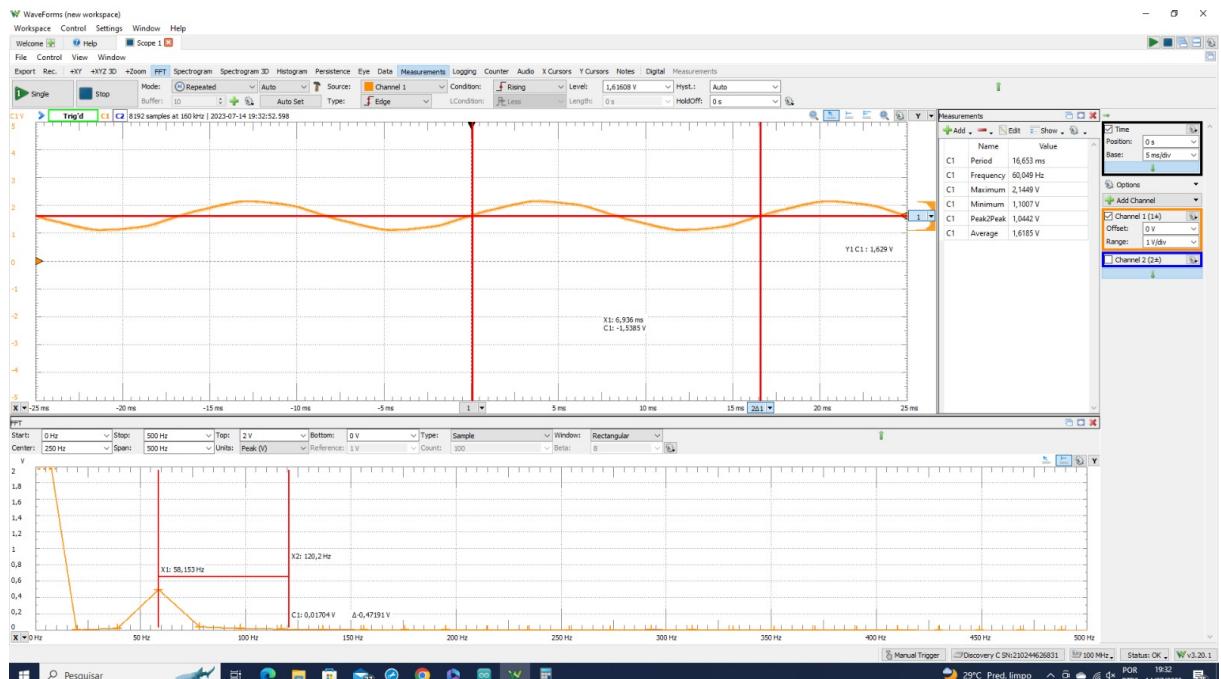
```
0 valor eficaz da corrente é: 0.00 amperes
o THD Corrente é: nan%
0 valor eficaz da tensão é: 0.00 Volts
o THD tensão é: nan%
0 valor eficaz da corrente é: 0.00 amperes
o THD Corrente é: nan%
0 valor eficaz da tensão é: 0.00 Volts
o THD tensão é: nan%
0 valor eficaz da corrent
```

Fonte: Autores, 2023.

### 5.3 Calibração e análise dos sinais obtidos

A primeira medição feita foi do sinal de tensão. Observou-se que a captação do sinal de tensão estava saturada, a qual foi possível corrigir regulando a tensão que passa por um regulador. O *Trimpot Multivoltas* foi utilizado para ajuste da saturação, o que melhorou visualização da senoide, como mostra na Figura 28.

Figura 28 – Senoide da tensão medida no osciloscópio



Fonte: Autores, 2023.

Na Figura 29 é possível ver a transformada rápida de Fourier para os dados de

tensão. Esse gráfico permite a análise dos dados coletados em relação a frequência e visualização da tensão DC e da Harmônica Fundamental que se aproxima de 60 Hertz.

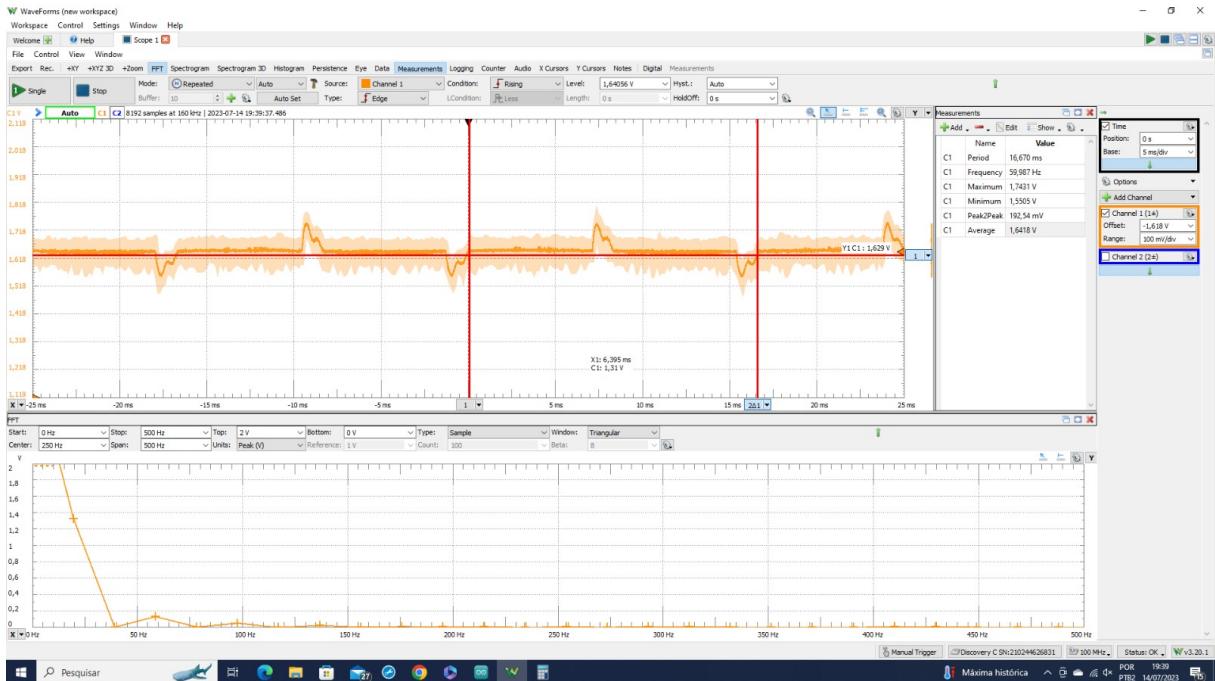
Figura 29 – FFT da tensão



Fonte: Autores, 2023.

Na Figura 28 tem-se a senoide dos dados de corrente de uma carga chaveada e sua transformada.

Figura 30 – Senoide da corrente medida no osciloscópio



Fonte: Autores, 2023.

## 5.4 Protótipo Montado

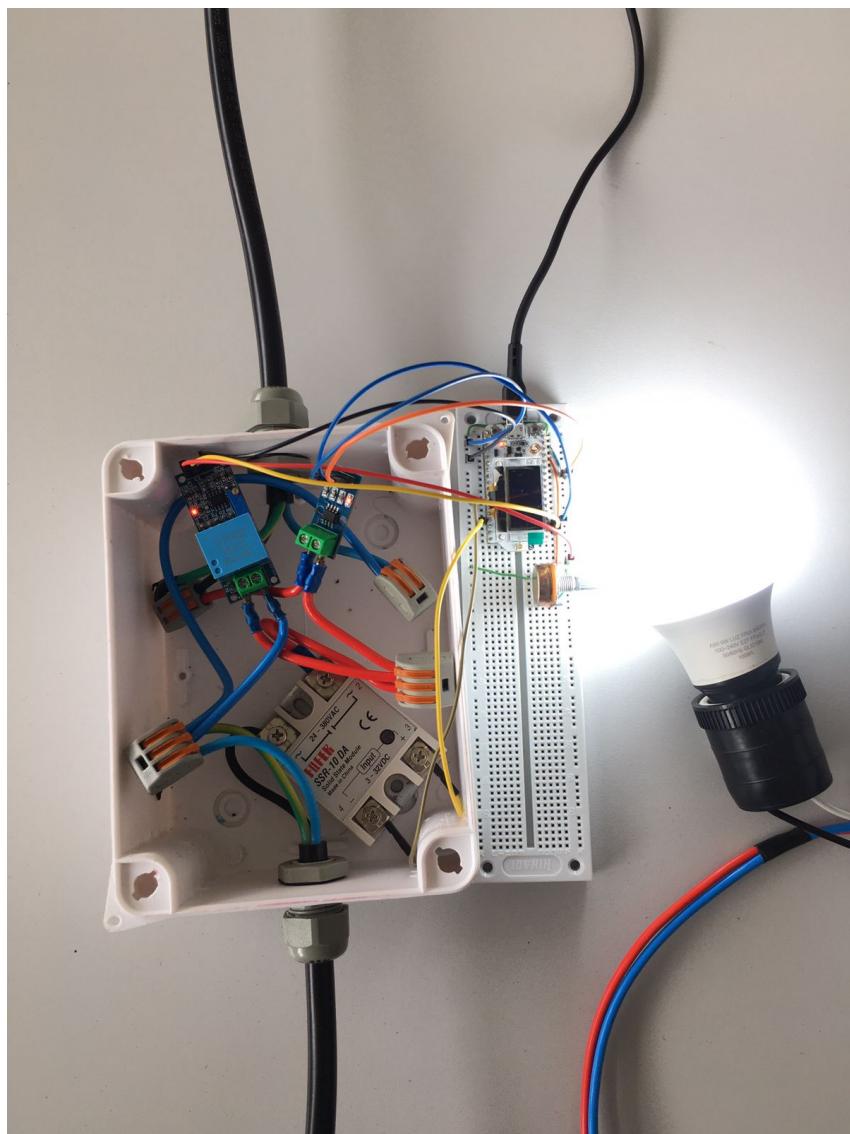
Para a fiação foi tomado como prisma a ABNT NBR 5410, norma técnica que estabelece as condições mínimas necessárias para instalação elétrica de baixa tensão,

garantindo segurança e eficiência no circuito elétrico. Neste protótipo, foram utilizados os fios de acordo com as especificações da norma, onde o fio verde representa o terra, o azul é o neutro, e o vermelho, o preto e o branco são fases.

Foi utilizada a lâmpada como dispositivo para medida para os testes, que era conectada na saída de energia do circuito para aferir a medidas de grandezas elétricas.

Na Figura 31 mostra-se a caixa de energia utilizada para o protótipo. A ela conecta-se as entradas de fase, neutro e terra, e interliga-se nosso circuito.

Figura 31 – Protótipo ligado



Fonte: Autores, 2023.

# 6 Conclusão

Com a conclusão deste trabalho, adquiriu-se não apenas conhecimentos referentes às tecnologias empregadas no desenvolvimento do protótipo, mas também um maior entendimento sobre o tema da qualidade de energia e os fatores que a influenciam, como Distorções Harmônicas, e os conceitos matemáticos aplicados. A partir da avaliação dos resultados obtidos, verifica-se que a aplicação web teve seus objetivos alcançados, entretanto, a parte que envolveu o microcontrolador e os sensores não teve desempenho satisfatório para um monitoramento ou aplicar as medidas em cálculos posteriores para qualidade de energia.

Por meio das características que regem a tecnologia de Internet das Coisas (*IoT*), logrou-se integrar e estabelecer uma comunicação entre os dispositivos presentes no protótipo. Para a administração dos sensores, optou-se pelo emprego do microcontrolador ESP32. Os módulos foram associados a este dispositivo, o que possibilitou a realização das leituras dos sensores, que posteriormente são transmitidas para o servidor web, executado no próprio ESP32, e então ao cliente web.

Ao analisar o projeto desenvolvido em sua totalidade, constatou-se um resultado satisfatório no que diz respeito à integração de diversas tecnologias distintas que foram empregadas, tendo como propósito monitorar as variáveis elétricas com o objetivo de calcular a THD utilizando um projeto de baixo custo e integrar essas medidas ao cliente web. Entretanto, verificou-se que os sensores de corrente elétrica e de tensão apresentaram um desempenho insatisfatório em um cenário real, possivelmente devido a possíveis provenientes de ruídos na rede elétrica e da *protoboard*, o que prejudicou parte dos resultados esperados.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Considerando o conhecimento adquirido e os resultados obtidos no desenvolvimento deste projeto, recomenda-se como possíveis trabalhos futuros:

- Tratar a medição da tensão e corrente elétrica para que as medidas possam ser utilizadas de forma correta;
- Implementar o cálculo da FFT com as novas medidas;
- Calcular a potência elétrica aparente, reativa e ativa;
- Adicionar medidas de segurança, como um disjuntor elétrico;
- Implementar o circuito em uma placa PCB.

## Referências

- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. *Fundamentos de circuitos elétricos*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. Citado 2 vezes nas páginas [22](#) e [23](#).
- ALSHAHRANI, S.; ABBOD, M.; ALAMRI, B.; TAYLOR, G. Evaluation and classification of power quality disturbances based on discrete wavelet transform and artificial neural networks. In: IEEE. *2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. [S.l.], 2015. p. 1–5. Citado na página [16](#).
- AUDIO, N. *Transformação rápida de Fourier FFT / NTi Audio*. 2023. [Online; accessed 14-July-2023]. Disponível em: <<https://www.nti-audio.com/pt/suporte/saber-como/transformacao-rapida-de-fourier-fft>>. Citado na página [53](#).
- BANKS, A.; PORCELLO, E. *Learning React: functional web development with React and Redux*. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2017. Citado na página [42](#).
- BIRYULIN, V.; KUDELINA, D.; LARIN, O. Electricity quality problems in the 0.4 kv city electric networks. In: IEEE. *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. [S.l.], 2020. p. 1–6. Citado na página [15](#).
- BORGES, C. F. et al. Análise da qualidade da energia elétrica em um sistema fotovoltaico conectado a rede. Insitituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2019. Citado na página [16](#).
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*, (11aed.). [S.l.]: Pearson, 2013. Citado na página [23](#).
- CARVALHO, C. N. d. Sistema autônomo de análise de métricas da rede elétrica implementado com dspic. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. Citado na página [18](#).
- CONDES, E. *Fast Fourier Transform for Arduino*. 2021. [Online; accessed 29-May-2023]. Disponível em: <<https://github.com/kosme/arduinoFFT>>. Citado 2 vezes nas páginas [41](#) e [51](#).
- COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Mathematics of Computation*, v. 19, p. 297–301, 1965. Citado na página [23](#).
- DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. Avaliação da qualidade da energia elétrica. Available in:<<http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdffiles/qualidade/b5.pdf>>, 2017. Citado na página [15](#).
- DIGILENT. *Analog Discovery (Legacy) - Digilent Reference*. 2023. [Online; accessed 12-July-2023]. Disponível em: <<https://digilent.com/reference/test-and-measurement/analog-discovery/start>>. Citado 2 vezes nas páginas [52](#) e [53](#).
- DIGILENT. *Analog Discovery Reference Manual - Digilent Reference*. 2023. [Online; accessed 12-July-2023]. Disponível em: <<https://digilent.com/reference/test-and-measurement/analog-discovery/reference-manual>>. Citado na página [52](#).

- DIGILENT. *Sensor de corrente alternada SCT-013: Calibração*. 2023. [Online; accessed 13-July-2023]. Disponível em: <<https://www.crescerengenharia.com/post/sensor-de-corrente-sct-013>>. Citado na página 56.
- DORF, R. C.; SVOBODA, J. A. *Introdução aos circuitos elétricos* . [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- EQUIPMENT, G. E. *Solid State Relay Working: How Does a Solid State Relay Work?* 2022. [Online; accessed 12-May-2023]. Disponível em: <<https://www.geya.net/solid-state-relay-working-how-does-a-solid-state-relay-work/>>. Citado na página 36.
- FERREIRA, A. F.; ALMEIDA, M. L. S. de. Simulação baseada em arduino e supervisório scadabr de acionamento e monitoramento sob carga de disjuntor de média tensão em subestações blindadas. *Revista Eletrônica TECSEN*, v. 15, n. 1, p. 87–93, 2022. Citado na página 18.
- FIELDING, R. T.; NOTTINGHAM, M.; RESCHKE, J. *HTTP Semantics*. RFC Editor, 2022. RFC 9110. (Request for Comments, 9110). Disponível em: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc9110>>. Citado na página 46.
- FLANAGAN, D.; NOVAK, G. M. *Java-Script: The Definitive Guide*. [S.l.]: American Institute of Physics, 1998. Citado na página 42.
- FOWLER, M. *Patterns of Enterprise Application Architecture: Pattern Enterpr Arch*. [S.l.]: Addison-Wesley, 2012. Citado na página 43.
- FRANCHI, C. M.; CAMARGO, V. L. A. de. *Controladores Lógicos Programáveis Sistemas Discretos*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2008. Citado na página 30.
- GHORBANI, M. J.; MOKHTARI, H. Impact of harmonics on power quality and losses in power distribution systems. *International Journal of Electrical & Computer Engineering (2088-8708)*, v. 5, n. 1, 2015. Citado na página 27.
- HADDAD, J. Energia elétrica: Conceitos, qualidade e tarifação—. Rio de Janeiro, 2004. Citado na página 15.
- HART, D. W. *Eletrônica de potência : análise e projetos de circuitos*. [S.l.]: Pearson Education, Inc, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 21, 22, 23 e 25.
- IEEE. Ieee recommended practice for monitoring electric power quality. *IEEE Std 1159-2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995)*, p. 1–94, 2009. Citado na página 15.
- INFO unina. *Medindo Corrente com Sensor ACS712 e Arduino*. 2023. [Online; accessed 14-July-2023]. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/blog/projeto-medindo-corrente-com-o-sensor-acs712-e-o-arduino/>>. Citado na página 32.
- INNOVATORSGURU. *ZMPT101B AC Voltage Sensor Datasheet*. 2022. [Online; accessed 12-May-2023]. Disponível em: <<https://innovatorsguru.com/wp-content/uploads/2019/02/ZMPT101B.pdf>>. Citado na página 32.
- LATHI, B. P. *Sinais e sistemas lineares [recurso eletrônico]*. [S.l.]: Pearson Education, Inc, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 24 e 25.

- LOPEZ, R. *Qualidade na energia elétrica*. Artliber, 2001. ISBN 9788588098022. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=nia3AAAACAAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 28.
- MAGRANI, E. A internet das coisas no brasil. *Rio de Janeiro: FGV Editora*, 2018. Citado na página 15.
- MARPIK. *Fotek SSR-25DA - EasyEDA open source hardware lab*. 2022. [Online; accessed 12-May-2023]. Disponível em: <[https://oshwlab.com/marpik/Fotek\\_SSR\\_25DA-2cd47362592f46139ae9a9c5a5eaba19](https://oshwlab.com/marpik/Fotek_SSR_25DA-2cd47362592f46139ae9a9c5a5eaba19)>. Citado na página 37.
- MDN. *Introdução ao DOM - APIs da Web / MDN*. 2023. [Online; accessed 26-June-2023]. Disponível em: <[https://developer.mozilla.org/pt-BR/docs/Web/API/Document\\_Object\\_Model/Introduction](https://developer.mozilla.org/pt-BR/docs/Web/API/Document_Object_Model/Introduction)>. Citado na página 42.
- MDN. *What is JavaScript? - Learn web development / MDN*. 2023. [Online; accessed 26-June-2023]. Disponível em: <[https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/JavaScript/First\\_steps/What\\_is\\_JavaScript](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/JavaScript/First_steps/What_is_JavaScript)>. Citado na página 47.
- META. *React*. 2023. [Online; accessed 20-June-2023]. Disponível em: <<https://react.dev/learn>>. Citado na página 42.
- MORAES, P. K.; FERREIRA, C. C. R.; FIGUEIREDO, L. F.; PEIXOTO, M. G. M.; BARBOSA, S. B. Smartplug-sistema de tomadas inteligentes para uso racional de energia elétrica. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 9, p. 964–979, 2020. Citado na página 16.
- OLIVEIRA, S. d. Internet das coisas com esp8266, arduino e raspberry pi. v. 1, n. 1, p. 15–18, 2017. Citado na página 15.
- ORDOÑEZ, E. D. M. *Projeto, desempenho e aplicações de sistemas digitais em circuitos programáveis (FPGAs)*. [S.I.]: Cesar Giacomini Penteado, 2003. Citado na página 39.
- PREMSANKAR, G.; FRANCESCO, M. D.; TALEB, T. Edge computing for the internet of things: A case study. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 5, n. 2, p. 1275–1284, 2018. Citado na página 15.
- RAJESH, P.; SHAJIN, F. H.; RAJANI, B.; SHARMA, D. An optimal hybrid control scheme to achieve power quality enhancement in micro grid connected system. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, Wiley Online Library, v. 35, n. 6, p. e3019, 2022. Citado na página 15.
- ROSE, K.; ELDRIDGE, S.; CHAPIN, L. The internet of things: An overview. *The internet society (ISOC)*, Reston, VA, v. 80, p. 1–50, 2015. Citado na página 20.
- SALUNKHE, A. S.; KANSE, Y. K.; PATIL, S. S. Internet of things based smart energy meter with esp 32 real time data monitoring. In: IEEE. *2022 International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)*. [S.I.], 2022. p. 446–451. Citado na página 18.
- SANTIAGO, M. B.; MARIANO, A. A. Projeto de medidor de qualidade de energia de baixo custo. 2020. Citado na página 18.

- SANTOS, B. P.; SILVA, L. A.; CELES, C.; BORGES, J. B.; NETO, B. S. P.; VIEIRA, M. A. M.; VIEIRA, L. F. M.; GOUSSEVSKAIA, O. N.; LOUREIRO, A. Internet das coisas: da teoria à prática. *Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, v. 31, p. 16, 2016. Citado na página [20](#).
- SANTOSO, S.; MCGRANAGHAN, M. F.; DUGAN, R. C.; BEATY, H. W. *Electrical power systems quality*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2012. Citado 2 vezes nas páginas [15](#) e [28](#).
- SEBESTA, R. W. *Concepts of programming languages*. [S.l.]: Pearson Education, Inc, 2012. Citado na página [41](#).
- SEDRA, S.; SMITH, K. C. *Microeletrônica. Quinta Edição*. [S.l.]: Pearson Makron Books, 2011. Citado na página [23](#).
- STROUSTRUP, B. *The design and evolution of C++*. [S.l.]: Pearson Education India, 1994. Citado na página [41](#).
- SUSLOV, K.; SOLONINA, N.; GERASIMOV, D. Assessment of an impact of power supply participants on power quality. In: IEEE. *2018 18th International conference on harmonics and quality of power (ICHQP)*. [S.l.], 2018. p. 1–5. Citado na página [15](#).