

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO
ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**

ÉLISSON FRANÇA DE SOUZA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA TOMADA INTELIGENTE COM PROTEÇÃO
CONTRA SURTOS E MONITORAMENTO DE ENERGIA**

Maceió – AL

2024

ÉLISSON FRANÇA DE SOUZA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA TOMADA INTELIGENTE COM PROTEÇÃO
CONTRA SURTOS E MONITORAMENTO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto de Computação da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. João Raphael Souza Martins

Maceió – AL

2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Girlaine da Silva Santos – CRB-4 – 1127

S729d Souza, Élisson França de.

Desenvolvimento de uma tomada inteligente com proteção contra surtos e monitoramento de energia / Élisson França de Souza. – 2025.
46 f.: il. color.

Orientador: João Raphael Souza Martins.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Computação: Bacharelado) - Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Computação. Maceió, 2025.

Bibliografia: f. 44- 46.

1. Automação residencial. 2. Internet das coisas. 3. Energia- Monitoramento.
4. Tomada inteligente. I. Título.

CDU: 004.73

ÉLISSON FRANÇA DE SOUZA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA TOMADA INTELIGENTE COM PROTEÇÃO
CONTRA SURTOS E MONITORAMENTO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
Instituto de Computação da Universidade
Federal de Alagoas como requisito parcial para
a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Computação.

Aprovado em 05 de dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 JOAO RAPHAEL SOUZA MARTINS
Data: 08/01/2025 08:34:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. João Raphael Souza Martins
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 GLAUBER RODRIGUES LEITE
Data: 08/01/2025 11:57:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Glauber Rodrigues Leite
(Examinador)

Prof. Jobson de Araújo Nascimento
(Examinador)

*Dedico este trabalho aos meus pais, pela
inspiração e pelo amor incondicional, que sempre
me motivaram a alcançar os meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais Eliberto e Luciere, pelo esforço em me proporcionar a melhor estrutura possível ao longo da minha jornada acadêmica e durante toda minha vida. Agradeço pela paciência e compreensão, permitindo que eu seguisse meu próprio ritmo para concluir este objetivo.

Ao meu irmão Bruno, pelo apoio no decorrer desta trajetória. Seu exemplo sempre foi uma fonte de motivação. Sou imensamente grato por tudo o que compartilhou comigo.

À minha namorada Kalyne, pelo incentivo constante e por sempre me encorajar a seguir em frente, o que foi fundamental para que eu continuasse acreditando em mim mesmo.

Ao meu orientador, Prof. João Raphael, por ter aceitado este desafio, e pelo suporte fornecido, que foi essencial para a conclusão deste trabalho.

Por fim, agradeço aos meus amigos, professores e colegas de faculdade, que, direta ou indiretamente, colaboraram para o sucesso desta caminhada.

RESUMO

A crescente demanda por soluções de automação e proteção no ambiente residencial impulsiona o desenvolvimento de dispositivos inteligentes capazes de garantir maior segurança e eficiência energética. Com o avanço da tecnologia e a popularização dos conceitos de Internet das Coisas (IoT), a automação residencial tem se tornado uma ferramenta essencial para melhorar o controle sobre o consumo de energia e a proteção dos equipamentos domésticos. Este trabalho se propõe a desenvolver uma tomada inteligente que combina monitoramento de energia, proteção contra surtos e controle remoto, proporcionando uma solução eficiente e acessível para o gerenciamento elétrico em casas conectadas. Utilizando a ESP32 como microcontrolador e a plataforma Blynk para interação com o usuário, o sistema permite monitoramento contínuo da corrente e tensão da rede elétrica, além de fornecer alertas em tempo real e a capacidade de desligar dispositivos em caso de oscilações prejudiciais, como *swell* e *sag* de tensão. A proteção contra surtos é garantida por componentes como Varistor de Óxido Metálico (MOV) e centelhador a gás (GDT), que atuam na limitação de picos de tensão, assegurando a integridade dos equipamentos conectados. A solução foi validada por meio de testes que demonstraram a precisão das medições e a eficácia do sistema em condições de operação, destacando seu potencial como uma ferramenta prática e confiável para a automação e proteção elétrica residencial.

Palavras-chave: Automação residencial, proteção elétrica, Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS), Internet das Coisas (IoT), monitoramento de energia, tomada inteligente, casa inteligente, ESP32, Blynk.

ABSTRACT

The growing demand for automation and protection solutions in residential environments drives the development of smart devices capable of ensuring greater security and energy efficiency. With the advancement of technology and the widespread adoption of Internet of Things (IoT) concepts, home automation has become an essential tool for improving control over energy consumption and protecting household appliances. This work aims to develop a smart plug that combines energy monitoring, surge protection, and remote control, providing an efficient and cost-effective solution for electrical management in connected homes. Using the ESP32 as the microcontroller and the Blynk platform for user interaction, the system enables continuous monitoring of the current and voltage of the electrical grid, in addition to providing real-time alerts and the ability to turn off devices in the event of harmful voltage fluctuations, such as swell and sag. Surge protection is ensured by components such as Metal Oxide Varistor (MOV) and Gas Discharge Tube (GDT), which limit voltage spikes and safeguard the connected equipment. The solution was validated through tests that demonstrated the accuracy of the measurements and the effectiveness of the system under operating conditions, highlighting its potential as a practical and reliable tool for home electrical automation and protection.

Keywords: Home automation, electrical protection, Surge Protection Device (SPD), Internet of Things (IoT), energy monitoring, smart plug, smart home, ESP32, Blynk.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de uma casa inteligente.....	15
Figura 2 - Crescimento do mercado global de automação residencial.....	16
Figura 3 – Forma de onda de um transiente sobreposto à entrada CA.....	17
Figura 4 - Representação do clamping de tensão.....	17
Figura 5 - Símbolo do MOV.....	18
Figura 6 - Comparação de dispositivos de proteção do tipo clamping.....	19
Figura 7 - Símbolo do GDT.....	20
Figura 8 - Forma de onda durante o breakdown do GDT.....	21
Figura 9 - Símbolo do diodo TVS.....	21
Figura 10 - Diagrama de blocos do projeto.....	25
Figura 11 - Fonte DC Hi-Link HLK-5M05.....	25
Figura 12 - MOV S14K275.....	27
Figura 13 - GDT SXH81-470X.....	27
Figura 14 - Chave disjuntora WH-201.....	28
Figura 15 - Diagrama de conexões elétricas do DPS.....	29
Figura 16 - Módulo sensor de corrente ACS712.....	30
Figura 17 - Módulo sensor de tensão ZMPT101B.....	31
Figura 18 - Módulo ESP32-WROOM-32.....	32
Figura 19 - Módulo relé.....	32
Figura 20 - Diagrama de conexões elétricas do projeto.....	33
Figura 21 - Protótipo da tomada inteligente com DPS.....	36
Figura 22 - Modelo utilizado para simular a atuação do MOV.....	37
Figura 23 - Corrente no MOV (verde) e no resistor (vermelho) com 220V _{RMS}	37
Figura 24 - Corrente no MOV (verde) e no resistor (vermelho) com 431V _{RMS}	38
Figura 25 – Corrente no MOV (verde) e no resistor (vermelho) com 720V _{RMS}	38
Figura 26 - Simulação sem o MOV.....	39
Figura 27 - Corrente elétrica no resistor com tensão de 720V _{RMS}	39
Figura 28 - Página de controle da tomada inteligente em diferentes cenários.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Alternating Current
ADC	Analog-to-Digital Converter
CA	Corrente Alternada
CAGR	Compound Annual Growth Rate
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
ESD	Electrostatic Discharge
GDT	Gas Discharge Tube
GND	Ground
GPIO	General-Purpose Input/Output
I2C	Inter-Integrated Circuit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
MOV	Metal Oxide Varistor
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
PCB	Printed Circuit Board
RMS	Root Mean Square
SPI	Serial Peripheral Interface
TVS	Transient Voltage Suppressor
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
ZnO	Zinc Oxide

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere
L	Line (Linha/Fase)
L-N	Conexão entre Linha/Fase e Neutro
L-PE	Conexão entre Linha/Fase e Terra de Proteção
mA	Miliampere
mV	Milivolt
N	Neutral (Neutro)
N-PE	Conexão entre Neutro e Terra de Proteção
ns	Nanossegundo
PE	Protective Earth (Terra de Proteção)
V	Volt
μs	Microssegundo

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1.	Objetivo Geral	13
1.2.	Objetivos Específicos.....	13
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1.	Automação Residencial	14
2.2.	Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS)	16
2.2.1.	Varistor de Óxido Metálico (MOV).....	18
2.2.2.	Centelhador a Gás (GDT).....	20
2.2.3.	Diodo Supressor de Transientes (TVS)	21
3.	TRABALHOS RELACIONADOS	22
3.1.	Sistemas Baseados em ZigBee	22
3.2.	Soluções com Bluetooth.....	22
3.3.	Abordagens com Wi-Fi.....	22
3.4.	Soluções com LoRaWAN	23
3.5.	Considerações	23
4.	METODOLOGIA.....	24
4.1.	Arquitetura do Sistema	24
4.2.	Dimensionamento do Circuito de Proteção (DPS).....	26
4.3.	Projeto do Circuito de Medição	29
4.4.	Desenvolvimento do Módulo de Controle	31
4.5.	Integração dos Módulos.....	33
4.6.	Programação da ESP32 e Integração com a Plataforma Blynk	33
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1.	Análise dos Testes de Proteção (DPS)	36
5.2.	Testes de Monitoramento de Energia	40
5.3.	Avaliação do Controle Remoto.....	41
6.	CONCLUSÃO.....	42
	REFERÊNCIAS.....	44

1. INTRODUÇÃO

A automação vem se popularizando em ambientes residenciais e comerciais, oferecendo maior controle sobre equipamentos eletrônicos, mais comodidade e melhor gestão do consumo de energia.

Com o avanço da automação residencial, o conceito de casa inteligente ganha espaço, integrando dispositivos de Internet das Coisas (ou IoT, do inglês *Internet of Things*) para facilitar a comunicação entre aparelhos e melhorar o controle sobre o ambiente residencial. A IoT permite que diversos dispositivos, como lâmpadas, sensores e eletrodomésticos, sejam conectados à internet e controlados de maneira centralizada, muitas vezes por meio de um smartphone. Dessa forma, a automação de residências possibilita que o usuário personalize e monitore suas interações com os equipamentos em tempo real, criando uma experiência residencial mais interativa.

Cirani *et al.* (2019, p. 4, tradução própria) destaca que, “impulsionada pelas inovações no controle de luz e ambiente, a IoT promoverá o desenvolvimento de infinitas aplicações para automação residencial”. Tais inovações fomentam a busca por aparelhos “inteligentes” que possam ser controlados remotamente, transformando o smartphone do usuário em um controle remoto para a casa inteira.

Em contrapartida, ainda existem muitos aparelhos eletrônicos e eletrodomésticos que não contam com um sistema de controle via smartphone. É nesse contexto que as tomadas inteligentes (ou *smart plugs*) emergem como uma solução eficaz, permitindo que dispositivos convencionais se tornem parte do ecossistema de automação residencial.

As tomadas inteligentes possibilitam o controle remoto de qualquer aparelho conectado a elas, oferecendo funcionalidades como agendamento de liga/desliga, monitoramento de consumo de energia e controle por voz. Dessa forma, até mesmo aparelhos que não foram originalmente projetados para serem “inteligentes” podem ser integrados à rede doméstica, proporcionando conveniência e eficiência energética ao usuário.

Paralelamente ao desenvolvimento de tomadas inteligentes, a proteção contra surtos de energia tem se mostrado um fator essencial para a segurança de equipamentos eletrônicos, especialmente em ambientes residenciais, onde oscilações na rede elétrica e surtos induzidos por descargas atmosféricas podem causar danos irreparáveis aos aparelhos. A aplicação de Dispositivos de Proteção contra Surtos

(DPS), como Varistores de Óxido Metálico (MOV), diodos supressores de transientes (TVS) e centelhadores a gás (GDT), pode proteger os dispositivos contra elevações súbitas de tensão, ampliando a segurança e prolongando a vida útil dos equipamentos.

Neste contexto, o desenvolvimento de uma tomada inteligente com proteção contra surtos apresenta-se como uma solução relevante, unindo as funcionalidades de monitoramento de energia com o controle remoto de dispositivos e a proteção elétrica. Com essa combinação, o dispositivo pode ser desligado automaticamente em caso de anomalias, e o usuário pode receber notificações sobre elevações (*swell*) e quedas (*sag*) de tensão – variações de 10% ou mais em relação à tensão nominal da rede, prevenindo possíveis danos aos aparelhos conectados (Fluke, s.d.).

1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma tomada inteligente que une controle remoto, monitoramento energético e proteção contra surtos em um único dispositivo. Este projeto visa oferecer maior segurança e praticidade, notificando o usuário em tempo real e prevenindo danos aos aparelhos conectados em situações de anomalias.

1.2. Objetivos Específicos

- Identificar e selecionar componentes adequados, considerando normas técnicas e características específicas para proteção contra surtos em sistemas residenciais;
- Modelar os componentes do DPS em um ambiente de simulação para verificar seu desempenho, dimensionar valores adequados e validar o projeto antes da implementação física;
- Integrar os componentes do DPS, sensores, relé, e a ESP32 em um circuito funcional;
- Desenvolver um painel intuitivo na plataforma Blynk para monitoramento e controle remoto do sistema;

- Programar a ESP32 para coletar dados dos sensores, controlar o módulo relé e interagir com a plataforma Blynk;
- Avaliar o funcionamento do sistema em condições reais, verificando a eficácia do DPS, a precisão dos sensores de energia, e a confiabilidade do controle e monitoramento remoto.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Automação Residencial

De acordo com Pessoa e Spinola (2014), a automação, cujo termo deriva do latim *automatus*, que significa "mover-se por si", refere-se à realização de tarefas sem a necessidade de intervenção humana. Essa prática envolve o uso de equipamentos e dispositivos capazes de operar de forma autônoma e realizar ajustes caso ocorram desvios das condições previamente definidas de operação.

Com a difusão da automação, surgiram novos aparelhos capazes de se conectar à rede para responder a interações do usuário, desde comandos simples de ligar/desligar, até a coleta de dados complexos. A partir disso, surgiu um novo termo que abrange essas tecnologias: Internet das Coisas (IoT).

A IoT pode ser descrita como um ambiente onde objetos físicos estão interconectados à internet por meio de sensores pequenos e embutidos. Essa tecnologia cria um ecossistema de computação onipresente, com o objetivo de facilitar o cotidiano das pessoas ao introduzir soluções funcionais nos processos diários (Magrani, 2018).

A Internet das Coisas representa uma visão de um mundo onde bilhões de objetos inteligentes, dotados de comunicação e capacidade de detecção e atuação, estarão conectados por meio de redes baseadas no Protocolo de Internet (IP) (Cirani *et al.*, 2019).

Cirani *et al.* (2019) ressalta que a automação residencial tem evoluído significativamente com o avanço da IoT, ampliando as aplicações para segurança, eficiência energética e conforto. Apesar disso, o mercado ainda apresenta fragmentação em soluções verticais e desconectadas, criando desafios para a interoperabilidade entre dispositivos. Essa realidade destaca a necessidade de tecnologias que integrem diferentes funções em sistemas residenciais, como tomadas

inteligentes que combinam monitoramento de energia e proteção contra surtos elétricos. Os autores acrescentam que, além de proporcionar maior controle e economia de energia, essas soluções são impulsionadas pelo crescente interesse em eficiência energética e pela possibilidade de atender a públicos diversificados, como idosos e pessoas com necessidades específicas, reforçando o impacto social e econômico dessas tecnologias.

A automação residencial, que teve origem na década de 1980, inicialmente focava no controle remoto de tarefas pontuais, como a abertura de portões e o acionamento de sistemas de iluminação e segurança. Com o advento do século XXI, a conectividade ganhou destaque, dando origem ao conceito de "casas conectadas", onde a internet passou a integrar o ambiente doméstico por meio de dispositivos interligados em rede. Posteriormente, o termo "casas inteligentes" surgiu para descrever a fusão entre automação, conectividade e interatividade, permitindo a comunicação entre aparelhos e promovendo maior eficiência, conforto e segurança no ambiente residencial, como ilustrado na Figura 1 (Stevan Junior e Farinelli, 2018).

Figura 1 - Ilustração de uma casa inteligente.



Fonte: Alert 360 (2015).

Dados reportados pelo portal Trends (2023), a partir de uma pesquisa conduzida pela Fortune Business Insights, indicam que a previsão de receita no

mercado de casas inteligentes no Brasil é de US\$ 2,41 bilhões em 2026, o que representa um crescimento de 91,06% em relação ao ano de 2022.

Em outro estudo, realizado pela Data Bridge Market Research (2024), é previsto que o mercado global de automação residencial tenha uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 10,8%, saindo de uma receita de US\$ 44 bilhões em 2023 para US\$ 99,95 bilhões em 2031, conforme figura abaixo.

Figura 2 - Crescimento do mercado global de automação residencial.



Fonte: Data Bridge Market Research (2024).

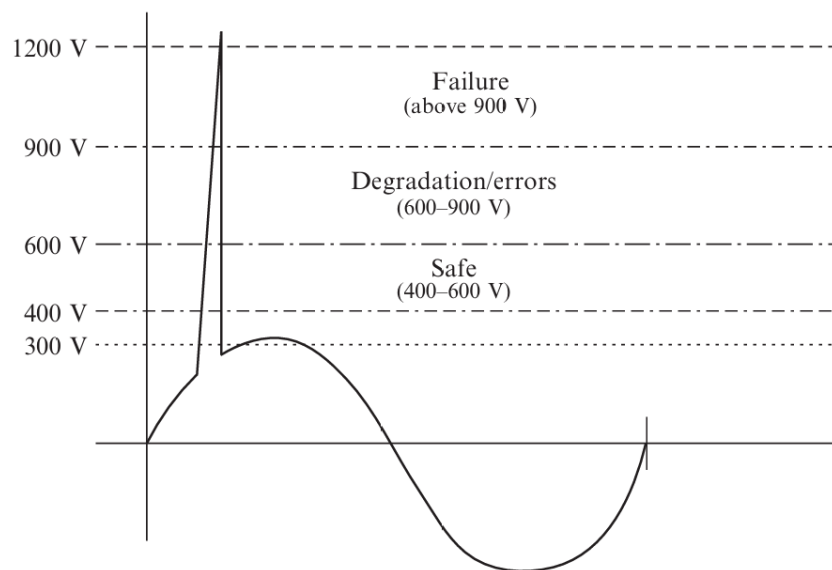
2.2. Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS)

Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS) são componentes essenciais para a segurança de equipamentos eletrônicos, pois identificam e desviam sobretensões transitórias, atuando como uma barreira para os picos de energia. Dessa forma, eles preservam o funcionamento adequado dos aparelhos conectados e contribuem para a proteção dos usuários e do próprio sistema elétrico.

Surto transitório pode ser definido como uma anormalidade de alta velocidade e alta energia que se sobrepõe à rede de energia CA de baixa tensão. Ele é caracterizado por uma frente de onda de impulso íngreme e um decaimento para metade do valor de pico em um intervalo de 5 a 1000 μ s (Skibinski, 1986).

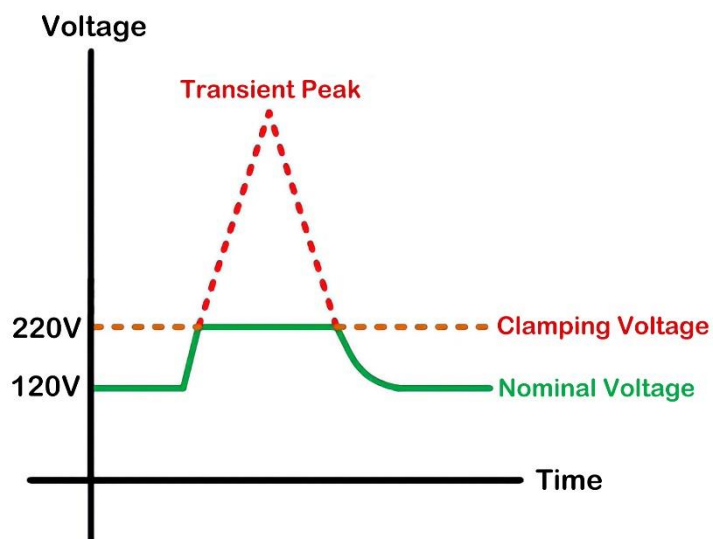
Na Figura 3, é possível observar exemplos de picos de tensão ocasionados por surtos na rede elétrica, evidenciando a discrepância entre a valor nominal e os níveis de surto. É nesse contexto que um DPS atua, limitando a tensão a um valor predeterminado, de acordo com suas especificações. Esse processo é chamado de *clamping*, ou fixação de tensão, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 3 - Forma de onda de um transiente sobreposto à entrada CA.



Fonte: Kularatna *et al.* (2019).

Figura 4 - Representação do *clamping* de tensão.



Fonte: Adaptado de Electrical 4 U (2024).

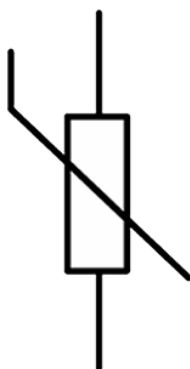
Ao atuar em surtos transitórios, os DPS se tornam eficientes para proteger contra descargas atmosféricas e sobretensões causadas por chaveamentos ou manobras da rede elétrica. Contudo, os DPS não são eficazes contra outros tipos de distúrbios, como *swell* ou *sag*, que, por serem anomalias contínuas e de baixa intensidade, requerem dispositivos diferentes, como reguladores de tensão ou filtros.

Dentre os componentes que podem compor um Dispositivo de Proteção contra Surtos, os principais são o Varistor de Óxido Metálico (MOV), o centelhador a gás (GDT) e o diodo supressor de transientes (TVS). Sendo o MOV o mais comum nesse tipo de equipamento.

2.2.1. Varistor de Óxido Metálico (MOV)

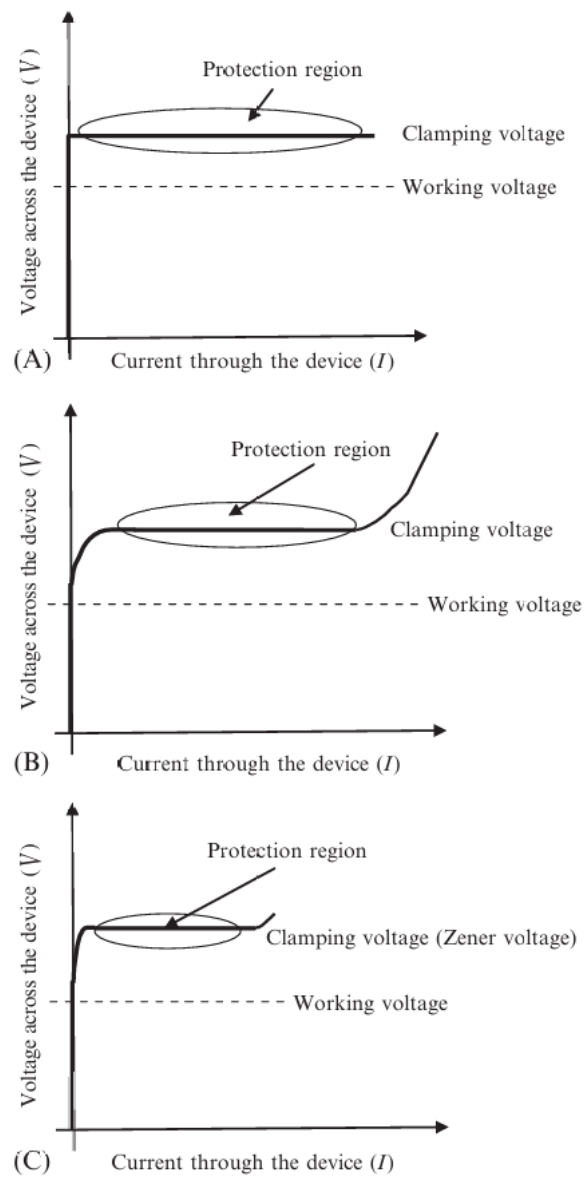
O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE, 2016b) define o MOV (Figura 5) como um componente composto de óxido de zinco (ZnO) e aditivos que apresentam um rápido aumento de condutância com o aumento da tensão em uma faixa específica. O instituto também explica que o MOV atua como um desviador de surtos, sendo utilizado para limitar sobretensões transitórias em circuitos de energia e comunicação.

Figura 5 - Símbolo do MOV.



Fonte: IEEE (2016a).

Figura 6 - Comparação de dispositivos de proteção do tipo clamping: caso ideal (A); MOV (B); diodo zener TVS (C).



Fonte: Kularatna *et al.* (2019).

Conforme Beneden (2003), varistores apresentam uma impedância variável e não-linear. Essa característica permite que o MOV diminua drasticamente sua resistência quando a tensão excede um limite específico, o que permite que a energia excedente seja desviada para o aterramento. O autor destaca que, comparados com diodos supressores de transientes, varistores podem absorver energias de surto muito mais altas.

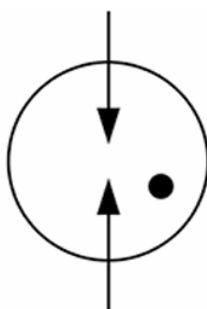
Na Figura 6 são comparadas as curvas de operação do modelo ideal (A) com o MOV (B) e diodo zener TVS (C). É possível observar que a região de proteção do MOV é maior do que a do diodo TVS, ficando mais próxima do caso ideal de *clamping*.

As características citadas, aliadas à sua ampla disponibilidade no mercado, tornam o MOV um componente bastante eficaz em Dispositivos de Proteção contra Surtos.

2.2.2. Centelhador a Gás (GDT)

Os GDT (Figura 7) são compostos por dois ou três eletrodos metálicos separados por uma pequena abertura e sustentados por um cilindro de cerâmica ou vidro. Esse cilindro contém um gás nobre que, ao ser ionizado, gera uma descarga luminosa que ocasiona uma condição de arco quando há corrente elétrica suficiente (IEEE, 2016b).

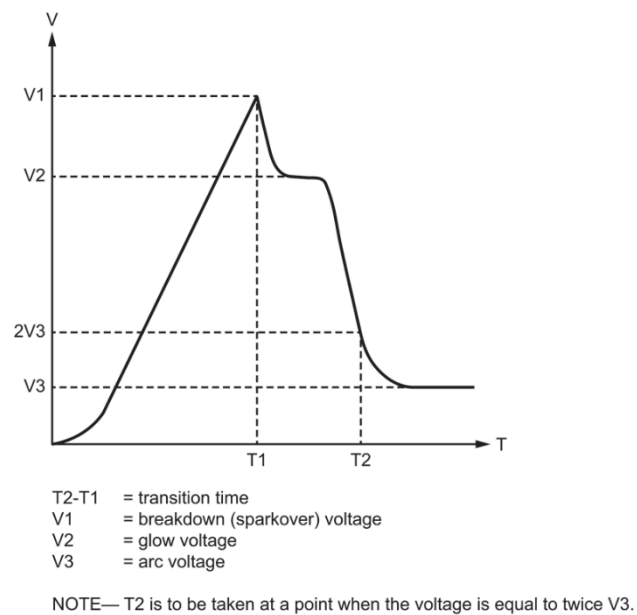
Figura 7 - Símbolo do GDT.



Fonte: Adaptado de IEEE (2016a).

Em baixas tensões aplicadas, um GDT se comporta como um componente com alta impedância, funcionando essencialmente como uma capacitância de valor picofarad. Quando a tensão aplicada ultrapassa um limite específico, o centelhador a gás muda para um estado de baixa impedância, agindo como um condutor e apresentando um efeito de resistência negativa. Nesse estado, o GDT estabiliza em uma tensão de retenção, que é inferior à tensão de disparo (*breakdown*) aplicada. Se a tensão aplicada cair abaixo desse limite de retenção, o GDT retorna ao seu estado não condutor, cessando a condução de corrente (Zola, 2008). A representação desse comportamento pode ser observada na figura abaixo.

Figura 8 - Forma de onda durante o *breakdown* do GDT.



Fonte: IEEE (2020).

2.2.3. Diodo Supressor de Transientes (TVS)

Entre os diversos tipos de diodos empregados como dispositivos de proteção, os diodos supressores de transientes (TVS) destacam-se como os mais eficientes. Sua baixa tensão de disparo, a disponibilidade em polaridades unidirecionais e bidirecionais, além do custo reduzido, os tornam especialmente úteis em estruturas destinadas à proteção contra descargas eletrostáticas (ESD) (Bicleanu e Nicuta, 2013). O símbolo do diodo TVS é apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Símbolo do diodo TVS.



Fonte: Adaptado de IEEE (2016a).

3. TRABALHOS RELACIONADOS

No contexto de tomadas inteligentes, a escolha da tecnologia para a camada de rede e os componentes de hardware é fundamental para determinar a funcionalidade e o alcance do sistema. Diferentes abordagens destacam-se no uso de tecnologias de comunicação, sensores e microcontroladores, cada qual atendendo a necessidades específicas.

3.1. Sistemas Baseados em ZigBee

Trabalhos como os de Prayongpun e Sittakul (2017) e Musleh, Debouza e Farook (2017) utilizam redes ZigBee (IEEE 802.15.4) para comunicação entre os *plugs* e um *gateway* central. Em ambos os casos, os sistemas empregam sensores de corrente e tensão, como o ACS712, para monitoramento de energia. Enquanto Prayongpun e Sittakul utilizam um Arduino com ATmega328 para o *plug* e um ATmega2560 para o *gateway*, conectado à internet via Ethernet, Musleh, Debouza e Farook adotam um Raspberry Pi como *gateway*, integrando ZigBee e Wi-Fi para maior alcance e flexibilidade. Essas soluções são voltadas para integração em sistemas domésticos com múltiplos *plugs*, gerenciados por uma central.

3.2. Soluções com Bluetooth

A proposta de Souza *et al.* (2020) explora a tecnologia Bluetooth para comunicação local. Usando um Arduino com ATmega2560 e o módulo HC-05, o sistema permite o controle remoto e o monitoramento de consumo de energia. Sensores como o ACS712 e um circuito de conversão de alta tensão foram integrados para fornecer leituras precisas. Essa abordagem é voltada para ambientes que não requerem conexão à internet, destacando-se pela simplicidade e baixo custo.

3.3. Abordagens com Wi-Fi

Projetos que utilizam Wi-Fi (IEEE 802.11) como principal tecnologia de comunicação apresentam maior integração com plataformas de monitoramento em nuvem. O trabalho de Thongkhao e Pora (2016) utiliza o ESP-WROOM02, que integra

um módulo Wi-Fi para comunicação com a rede doméstica. Com sensores como o STPM01, o sistema calcula parâmetros detalhados, como tensão RMS e fator de potência, apresentando dados por meio de uma interface web. De forma similar, Diógenes (2019) combina um Arduino Nano com o ESP8266-01 e o circuito ADE7753 para oferecer monitoramento detalhado e controle remoto via Blynk, usando o protocolo MQTT para comunicação e armazenamento de dados.

3.4. Soluções com LoRaWAN

Para obter maior alcance de comunicação, Sanchez-Sutil e Cano-Ortega (2023) adotam a tecnologia LoRaWAN, conectando os *plugs*, baseados no Arduino Nano, a um *gateway* Dragino PG1301. Este *gateway* transmite os dados para a nuvem usando Wi-Fi ou Ethernet, possibilitando controle remoto e acesso a informações em tempo real. Sensores como o PZEM-004t são utilizados para a medição de energia, mostrando uma solução eficiente para ambientes com grandes distâncias entre dispositivos.

3.5. Considerações

Os trabalhos analisados demonstram diferentes abordagens para o desenvolvimento de tomadas inteligentes, variando principalmente em relação às tecnologias de comunicação e aos componentes de hardware utilizados.

As soluções baseadas em ZigBee (Prayongpun e Sittakul, 2017; Musleh, Debouza e Farook, 2017) destacam-se pela eficiência em redes locais, mas dependem de um *gateway* central para integração com a internet, o que pode limitar a autonomia de cada dispositivo.

Em contrapartida, as abordagens com Wi-Fi (Thongkhao e Pora, 2016; Diógenes, 2019) eliminam a necessidade de um *gateway* adicional, permitindo conectividade direta com aplicativos móveis ou servidores em nuvem, mas possuem alcance limitado e consumo de energia mais elevado.

A solução apresentada por Souza *et al.* (2020), com Bluetooth, é simples e de baixo custo, mas sua aplicação é restrita a cenários locais e com poucos dispositivos.

Por fim, a abordagem de Sanchez-Sutil e Cano-Ortega (2023), com LoRaWAN, resolve a questão do alcance, mas apresenta maior complexidade de implementação e custos adicionais com *gateways* especializados.

A análise dos trabalhos relacionados revela uma lacuna no que diz respeito à incorporação de dispositivos de proteção contra surtos (DPS) em tomadas inteligentes. Embora algumas soluções priorizem o monitoramento e controle remoto, e outras foquem na eficiência do consumo de energia, nenhum dos projetos analisados implementa mecanismos para proteger os aparelhos contra sobretensões. Essa ausência destaca a relevância do projeto desenvolvido neste trabalho, que combina as funcionalidades de automação e monitoramento com um sistema robusto de proteção elétrica para garantir a segurança dos eletrodomésticos conectados.

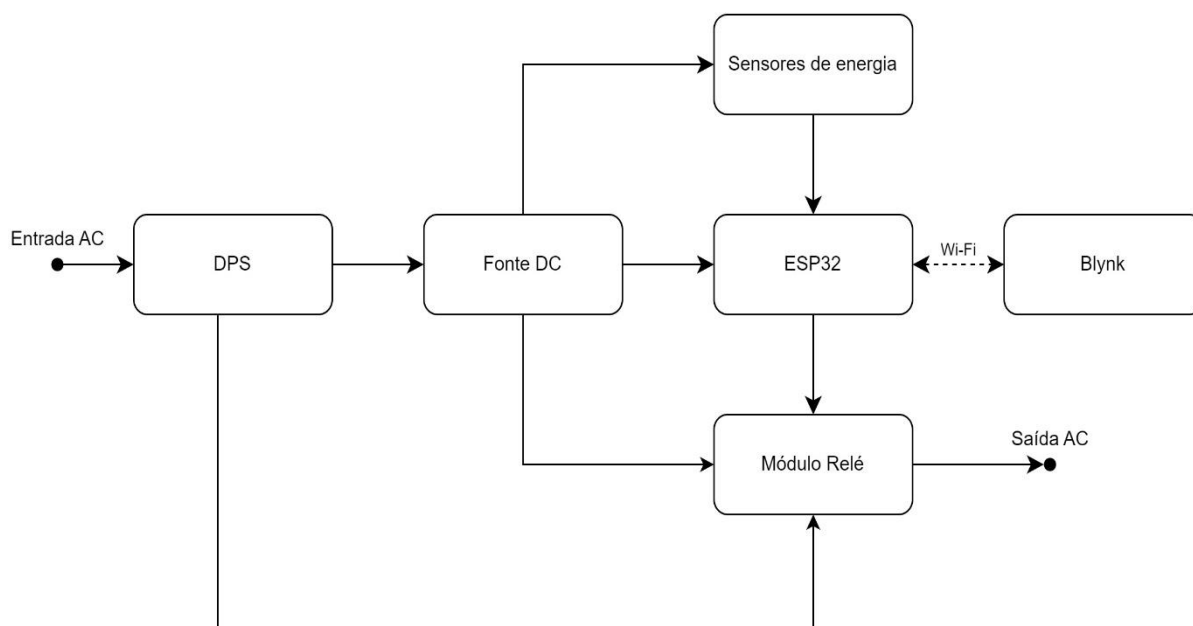
4. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho envolve a implementação de uma tomada inteligente com proteção contra surtos e monitoramento de energia, utilizando componentes como MOV, GDT, sensores de corrente e tensão, e uma ESP32 como controlador central. A seguir, detalha-se a metodologia utilizada para o desenvolvimento do sistema, abordando desde a arquitetura até a integração e testes do sistema completo.

4.1. Arquitetura do Sistema

A arquitetura do sistema, como mostrada na Figura 10, é composta por três camadas principais: a camada de proteção elétrica, a camada de monitoramento e a camada de controle. A camada de **proteção** é formada pelo conjunto de dispositivos de proteção contra surtos (MOV e GDT), que atuam para garantir que a tensão nas tomadas não ultrapasse níveis prejudiciais aos equipamentos conectados, e uma chave disjuntora, que evita sobrecarga e curto-circuito. A camada de **monitoramento** é composta pelos sensores de corrente ACS712 e de tensão ZMPT101B, que coletam dados sobre a qualidade da energia elétrica em tempo real. Finalmente, a camada de **controle** é composta pela ESP32, que processa os dados dos sensores, controla o módulo relé para ligar/desligar os dispositivos e se comunica com a plataforma Blynk para o controle remoto via internet.

Figura 10 - Diagrama de blocos do projeto.



Fonte: Criação do autor (2024).

O sistema inclui uma **fonte DC** encapsulada, responsável por converter a tensão AC da rede elétrica em uma tensão DC estabilizada de 5V, utilizada para alimentar a ESP32, os sensores do circuito de medição e o módulo relé. A fonte usada é a HLK-5M05 (Figura 11), modelo fabricado pela Hi-Link que fornece até 1A em sua saída.

Figura 11 - Fonte DC Hi-Link HLK-5M05.



Fonte: Criação do autor (2024).

4.2. Dimensionamento do Circuito de Proteção (DPS)

O dimensionamento do circuito de proteção foi realizado com base em guias técnicos e trabalhos relacionados, considerando os valores da rede elétrica de 220V e as especificações dos componentes analisados, de acordo com seus *datasheets*. O **MOV** foi escolhido para proteção contra surtos rápidos de baixa e média tensão, devido à sua capacidade de limitar a tensão aplicada e ao seu baixo tempo de resposta, inferior a 25ns, de acordo com a TDK Electronics (2018). Foram utilizados dois **GDT** para proteger contra surtos de alta tensão, já que suas capacidades de dissipação são superiores à do varistor, tornando-os ideais para eventos mais intensos.

Segundo Harnden *et al.* (1972), escolher o varistor correto é um processo simples e lógico. É necessário que o MOV tenha uma tensão operacional de pico que seja próxima, porém maior, do que a tensão de pico da rede elétrica. Conforme Standler (1989 *apud*. Abdel-Salam, Ahmed e Elhamd, 2004, p. 689), é definido que a tensão RMS máxima que pode ser aplicada no varistor é de pelo menos 1,25 vezes o valor RMS da tensão de alimentação. Para garantir que o MOV opere corretamente, levando em consideração uma rede de 220V_{RMS}, é necessário que sua tensão nominal seja pelo menos 275V ($220 \times 1,25$). Essa margem permite que o varistor tolere variações normais da rede sem ser acionado, evitando a degradação precoce do componente.

Abdel-Salam, Ahmed e Elhamd (2004) afirmam que a tensão máxima de *clamping* do varistor é geralmente escolhida entre 150% e 300% do pico da tensão da rede elétrica. Como o pico numa rede de 220V_{RMS} é de aproximadamente 311V ($220 \times \sqrt{2}$), o valor máximo de *clamping* do MOV deve ser entre 466,5V ($311 \times 150\%$) e 933V ($311 \times 300\%$).

Com base nos valores calculados e levando em consideração as opções disponíveis no mercado, foi observado que o modelo S14K275 (Figura 12), com tensão nominal de 275V e tensão máxima de *clamping* de 710V, atende aos requisitos estabelecidos.

Figura 12 - MOV S14K275.



Fonte: Criação do autor (2024).

Para o dimensionamento dos centelhadores a gás, de acordo com as características da rede elétrica, com as alternativas disponíveis para comercialização, e com as especificações fornecidas pelos fabricantes, foi escolhido o modelo SXH81-470X (Figura 13), que tem tensão de *breakdown* de 470V, abaixo da tensão de *clamping* do MOV — o que permite desviar parte da energia para o aterramento, reduzindo a tensão entre fase e neutro e "aliviando" o varistor —, e acima da tensão de pico da rede (311V) — evitando disparos em condições normais de operação (Surging, s.d.).

Figura 13 - GDT SXH81-470X.



Fonte: Criação do autor (2024).

Por fim, devido às suas vantagens práticas e funcionais, foi utilizada uma **chave disjuntora WH-201** (Figura 14), que dispensa a necessidade de um fusível. Embora tanto o fusível quanto a chave desempenhem a função de interromper o fluxo de corrente em caso de sobrecarga ou curto-circuito, a chave disjuntora oferece benefícios adicionais que a tornam mais adequada para este tipo de aplicação. Após

a condição anômala ser resolvida, o disjuntor pode ser rearmado manualmente, enquanto o fusível necessitaria de substituição, o que é mais demorado e custoso. A escolha do modelo WH-201 é apropriada para circuitos residenciais devido à sua capacidade de suportar corrente de até 10A, adequada para a maioria dos dispositivos domésticos.

Figura 14 - Chave disjuntora WH-201.



Fonte: Criação do autor (2024).

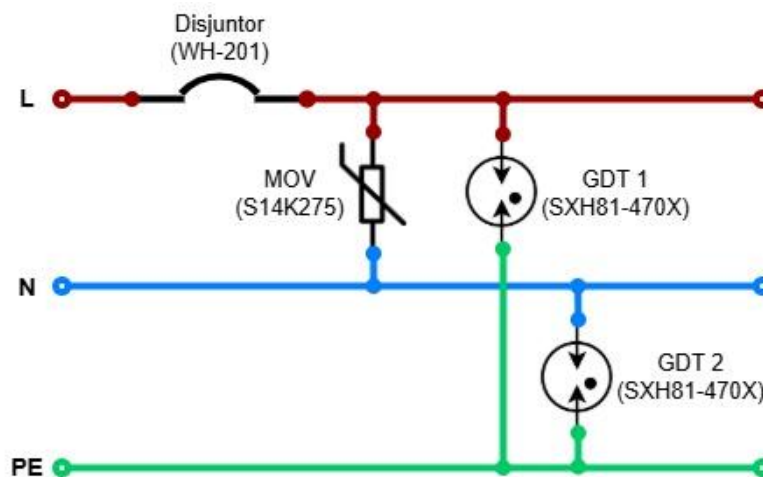
O circuito de proteção foi projetado para oferecer uma hierarquia escalonada, capaz de lidar com surtos de diferentes intensidades e proteger os equipamentos conectados. O MOV, posicionado entre a fase e o neutro (L-N), é responsável pela primeira linha de defesa, limitando surtos rápidos e de baixa ou média intensidade. Sua atuação ocorre absorvendo e dissipando a energia excedente, como a de flutuações causadas por manobras na rede ou perturbações transitórias. Graças à sua capacidade de resposta imediata, o MOV reduz significativamente os picos de tensão antes que eles causem danos.

Em casos de surtos de maior intensidade, como os provenientes de descargas atmosféricas, que ultrapassem a tensão de *clamping* máxima do MOV, os centelhadores a gás (GDT) entram em ação. Um GDT está conectado entre a fase e o terra (L-PE), e o outro entre o neutro e o terra (N-PE). Quando a tensão entre os terminais de um GDT atinge seu valor de *breakdown* (470V no modelo SXH81-470X), ele cria um caminho de baixa impedância, desviando a energia do surto diretamente para o aterramento. Essa atuação protege o MOV contra sobrecarga e dissipa a maior parte da energia do surto, evitando danos aos dispositivos conectados.

Essa disposição em camadas assegura que os surtos de baixa e média intensidade sejam absorvidos pelo MOV, enquanto os surtos de alta intensidade são

desviados pelos GDT. O diagrama de conexão elétrica ilustrando a disposição do MOV e dos GDT pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Diagrama de conexões elétricas do DPS.



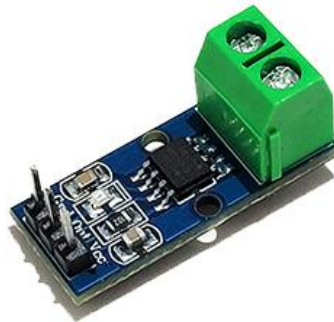
Fonte: Criação do autor (2024).

4.3. Projeto do Circuito de Medição

O projeto do circuito de medição envolve a integração dos sensores ACS712 para corrente e ZMPT101B para tensão, ambos disponibilizados em forma de módulo.

O **ACS712** (Figura 16) foi escolhido por sua precisão na medição de corrente alternada e contínua, com uma saída analógica proporcional à corrente medida. Equipado com um sensor de efeito Hall, que detecta o campo magnético gerado pela passagem de corrente elétrica por um condutor interno, convertendo esse sinal em uma tensão analógica proporcional à corrente, que pode ser lida por um microcontrolador, permitindo a detecção de sobrecargas e auxiliando no gerenciamento do consumo energético. O modelo utilizado suporta corrente de até 30A, mais do que suficiente para equipamentos domésticos comuns. O sensor apresenta um erro de saída de 1,5% a uma temperatura ambiente de 25°C, e tem sensibilidade de 66mV/A (Allegro MicroSystems, 2024).

Figura 16 - Módulo sensor de corrente ACS712.

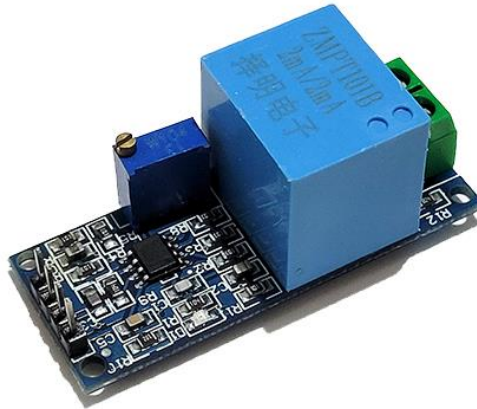


Fonte: Criação do autor (2024).

Um divisor de tensão é usado para adaptar a saída do sensor ACS712 para o nível operacional da ESP32, cuja entrada analógica suporta no máximo 3,3V. No divisor, dois resistores em série, de **1k Ω** e **2k Ω** , são conectados à saída do sensor e ao GND, dividindo a tensão proporcionalmente. Isso reduz a saída máxima do ACS712 (até 5V) para cerca de 3,33V, garantindo que o sinal fique dentro do intervalo suportado pelos pinos ADC da ESP32, protegendo-a de sobrecargas.

O **ZMPT101B** (Figura 17), integrado no módulo HW-697, foi selecionado devido à sua alta precisão e estabilidade na medição de tensão AC, características que o tornam adequado para sistemas de monitoramento que exigem uma leitura detalhada da tensão. Esse sensor converte a tensão da rede elétrica para um nível baixo e seguro, proporcional à entrada, que é então ajustado por um amplificador operacional integrado ao módulo (LM358). Com ele, é possível identificar variações, como elevações (*swell*) e afundamentos (*sag*) de tensão, essenciais para proteção dos equipamentos conectados à rede elétrica. Esse módulo suporta leituras em redes de até 250V_{RMS}, e apresenta um erro entre -0,3% e 0,2% para uma entrada de 2mA (Qingxian, s.d.).

Figura 17 - Módulo sensor de tensão ZMPT101B.



Fonte: Criação do autor (2024).

Ambos os sensores foram conectados à ESP32, cujos pinos analógicos foram configurados para ler os sinais de saída dos sensores, garantindo medições precisas para a detecção de anomalias.

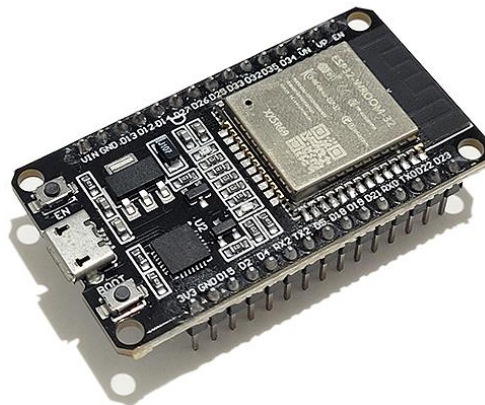
4.4. Desenvolvimento do Módulo de Controle

O módulo de controle é composto pela ESP32, que processa as informações obtidas pelos sensores, e pelo módulo relé, que foi escolhido para permitir o chaveamento automático da tomada a partir de sinais enviados pelo microcontrolador.

A **ESP32** (Figura 18) é um microcontrolador de alto desempenho desenvolvido pela Espressif Systems, amplamente utilizado em projetos de IoT devido à sua capacidade de comunicação sem fio e alta versatilidade. Equipado com um processador dual-core, a ESP32 opera com Wi-Fi e Bluetooth integrados, permitindo uma conectividade robusta e eficiente para uma ampla variedade de aplicações, desde automação residencial até monitoramento industrial. Além disso, ela possui uma variedade de pinos de entrada e saída (GPIO), interfaces como I2C, SPI e UART, além de ADCs integrados, o que permite a integração com diversos sensores e dispositivos (Espressif Systems, 2023).

O microcontrolador foi programado para monitorar constantemente os valores de corrente e tensão, comparando-os com os limites preestabelecidos. Em caso de detecção de anomalia, a ESP32 aciona o relé para cortar o fornecimento de energia aos dispositivos conectados e envia um alerta ao usuário através da plataforma Blynk.

Figura 18 - Módulo ESP32-WROOM-32.



Fonte: Criação do autor (2024).

O **módulo relé** (Figura 19) é utilizado em projetos para controlar circuitos de alta tensão ou corrente com segurança, permitindo que dispositivos como microcontroladores, que operam com baixos níveis de tensão e corrente, possam ativar cargas como lâmpadas, motores e eletrodomésticos. No caso da ESP32, cuja tensão de saída é de apenas 3,3V, a corrente fornecida pelos seus pinos GPIO não é suficiente para acionar diretamente o relé, que opera em 5V. Para solucionar isso, utiliza-se um transistor, como o **2N2222A**, para chavear o sinal de controle. O transistor, quando acionado pelo sinal de 3,3V da ESP32 através da sua base, permite que uma corrente maior, proveniente da fonte de 5V, flua do coletor para o emissor, acionando o relé.

Figura 19 - Módulo relé.

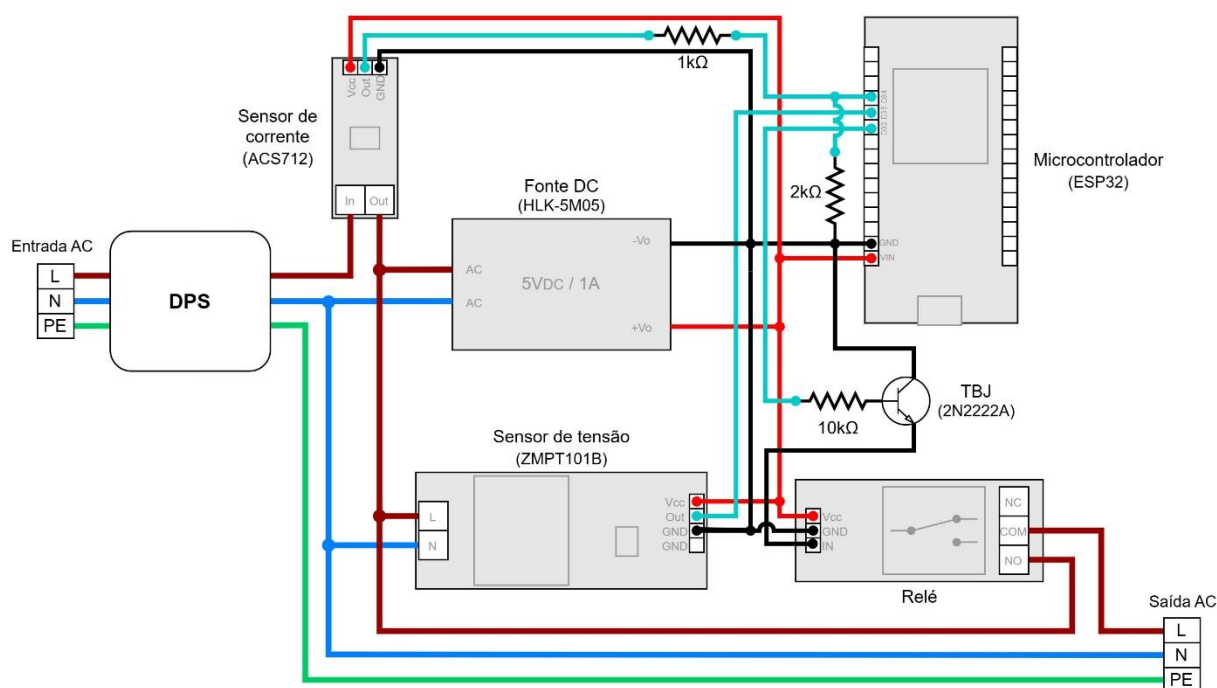


Fonte: Criação do autor (2024).

4.5. Integração dos Módulos

A integração dos módulos foi estruturada para garantir uma conexão funcional e harmoniosa entre os componentes da tomada inteligente. O **DPS** foi posicionado na entrada de tensão AC, fornecendo uma camada de proteção que abrange tanto a saída para os equipamentos conectados quanto a fonte DC. A fonte DC, por sua vez, distribui energia estabilizada para todos os módulos do sistema, incluindo o microcontrolador, os sensores e o módulo relé. Os sensores foram conectados à **ESP32**, que centraliza o processamento e a comunicação entre os dispositivos, permitindo a troca eficiente de informações e comandos. Essa integração, ilustrada na Figura 20, garante que todos os componentes operem de forma sincronizada, possibilitando um sistema coeso e bem estruturado em um único dispositivo.

Figura 20 - Diagrama de conexões elétricas do projeto.



Fonte: Criação do autor (2024).

4.6. Programação da ESP32 e Integração com a Plataforma Blynk

A programação da ESP32 foi desenvolvida na plataforma **Arduino IDE** utilizando bibliotecas específicas para comunicação com a plataforma **Blynk** e funções

independentes para a leitura dos sensores ACS712 e ZMPT101B. O código foi estruturado para monitorar, em tempo real, a corrente elétrica e a tensão da rede, enviando esses dados para a plataforma de forma contínua e permitindo o controle do relé remotamente.

Para o monitoramento da corrente, o sensor ACS712 foi configurado para medir até 30A, o valor máximo suportado por ele, com o ajuste de um divisor de tensão para adequar o sinal analógico ao ADC da ESP32. A leitura bruta do ADC é convertida para tensão, e posteriormente, para corrente elétrica, utilizando a fórmula que considera o offset de 1,67V e a sensibilidade de 66mV/A do sensor. Para o monitoramento da tensão, o ZMPT101B foi calibrado para calcular a tensão RMS com base na amplitude do sinal capturado pelo ADC. O código realiza uma amostragem de 50ms, suficiente para capturar um ciclo completo da senoide, determinando o valor de pico a pico do sinal, que é convertido em tensão RMS após a aplicação de um fator de calibração.

Além do monitoramento básico, foi implementada uma função de proteção para desligar automaticamente o relé caso a corrente ultrapasse 10A, protegendo o sistema e os dispositivos conectados contra sobrecarga. No caso de oscilações na tensão da rede, o sistema foi configurado para identificar elevações (*swell*) e quedas (*sag*) de 10% em relação à tensão nominal e notificar o usuário por meio da plataforma online. Caso a oscilação ultrapasse 15%, o relé é desligado automaticamente para proteger os dispositivos conectados.

A plataforma Blynk foi escolhida para este projeto devido à sua flexibilidade e capacidade de conectar dispositivos IoT à nuvem de forma eficiente e prática. Composta por um aplicativo móvel (disponível para Android e iOS), um servidor online e bibliotecas específicas, o Blynk permite monitorar sensores e controlar atuadores remotamente por meio de uma interface intuitiva. A criação de *dashboards* no aplicativo é realizada arrastando e configurando *widgets*, como botões e medidores, dispensando a necessidade de programação adicional para o usuário final.

Além disso, o servidor do Blynk é responsável por gerenciar dados provenientes de sensores e executar comandos enviados pelos dispositivos conectados, como a ESP32 usada neste projeto. A comunicação entre o hardware e a plataforma é feita por bibliotecas compatíveis com diversas placas de desenvolvimento, incluindo ESP32, ESP8266 e modelos do Arduino, garantindo ampla aplicabilidade e suporte.

Entre os benefícios destacados estão a facilidade de implementação, a compatibilidade com diversas placas e a possibilidade de criar interfaces amigáveis

rapidamente. Por outro lado, algumas limitações incluem diversas funcionalidades serem restritas a planos pagos. Mesmo com essas limitações, o serviço se mostrou uma escolha eficaz para atender aos objetivos deste projeto, unindo automação, monitoramento e controle remoto em um único sistema.

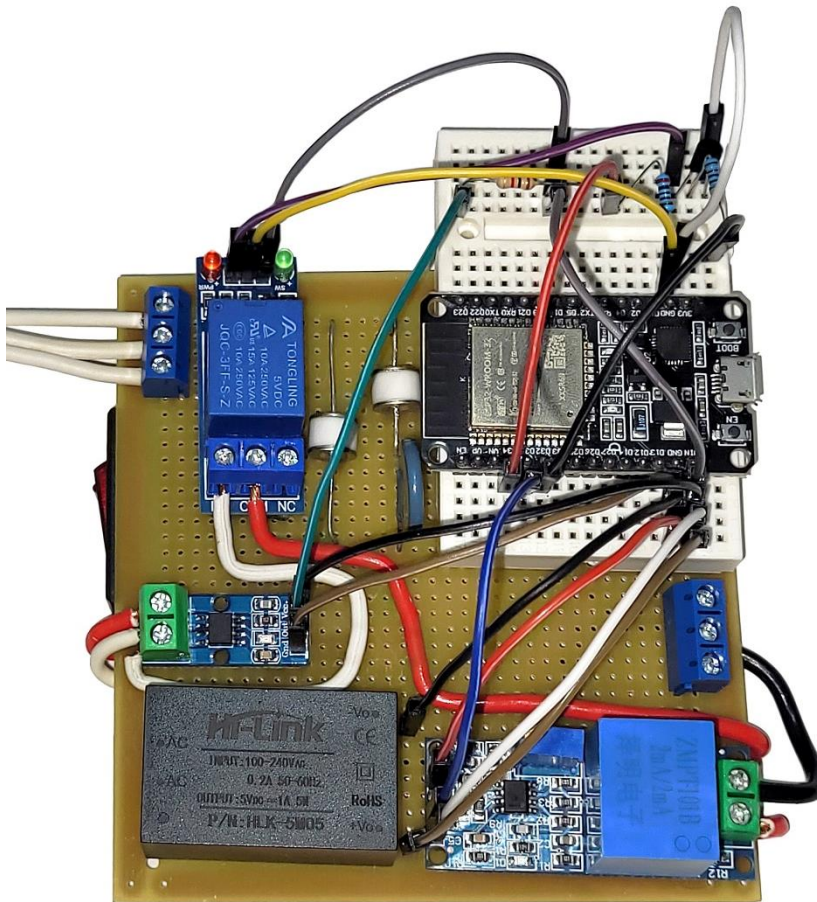
A integração com a plataforma Blynk possibilita que o usuário monitore os valores de corrente e tensão em tempo real, visualize alertas relacionados a oscilações de tensão e controle manualmente o relé para ligar ou desligar os dispositivos. O sistema foi programado para realizar essas tarefas de forma contínua, com leituras e envio de informações ocorrendo a cada 1 segundo, permitindo um controle dinâmico e robusto.

Essa programação permite que o sistema funcione de forma autônoma e segura, protegendo os dispositivos conectados, informando o usuário sobre o estado da rede elétrica e fornecendo flexibilidade no controle remoto.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A integração física dos componentes foi planejada para garantir a funcionalidade e a organização do sistema, considerando que o projeto está em fase de protótipo. O circuito foi montado em uma placa perfurada, com os módulos do DPS, sensores e relé posicionados de forma a otimizar o espaço e facilitar as ligações elétricas. A ESP32 foi alocada em uma protoboard para simplificar as conexões e permitir ajustes rápidos durante os testes. Essa configuração, apesar de provisória, garantiu que todos os componentes pudessem ser integrados de maneira funcional, possibilitando validações práticas e ajustes no desenvolvimento. A seguir, apresenta-se uma imagem do protótipo finalizado, destacando a disposição dos módulos e a organização geral do sistema.

Figura 21 - Protótipo da tomada inteligente com DPS.

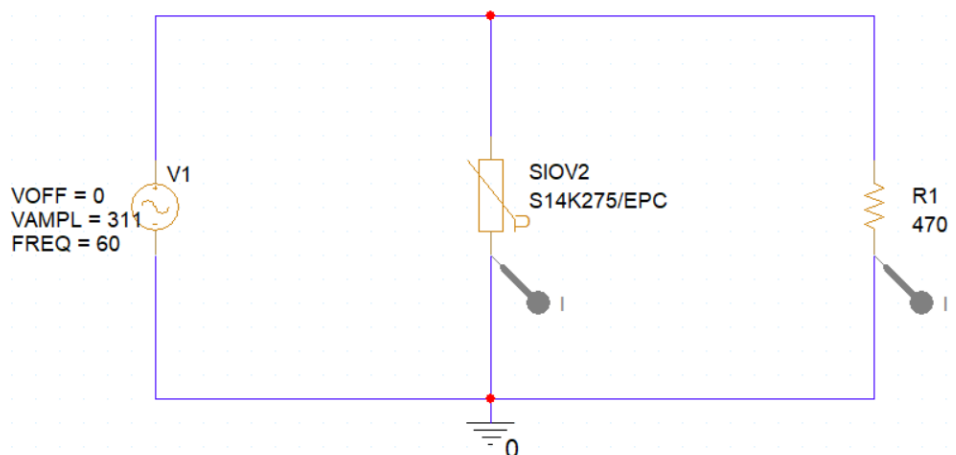


Fonte: Criação do autor (2024).

5.1. Análise dos Testes de Proteção (DPS)

Os testes foram conduzidos apenas por meio de simulação virtual no software **OrCAD X**, utilizando o MOV, uma vez que o modelo do GDT não estava disponível para simulação no software. A análise foi realizada observando a passagem de corrente elétrica pelos componentes, em diferentes níveis de tensão de entrada, comparando o comportamento do circuito com e sem o varistor. Foi utilizado um resistor de 470Ω para simular a carga a ser protegida, conforme a figura a seguir.

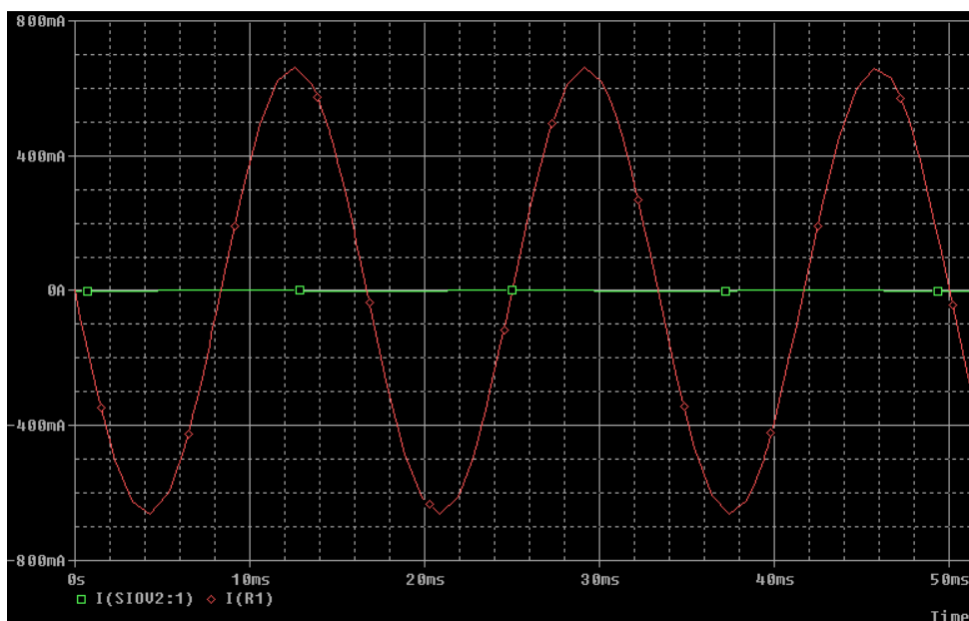
Figura 22 - Modelo utilizado para simular a atuação do MOV.



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor no software OrCAD X (versão 24.1).

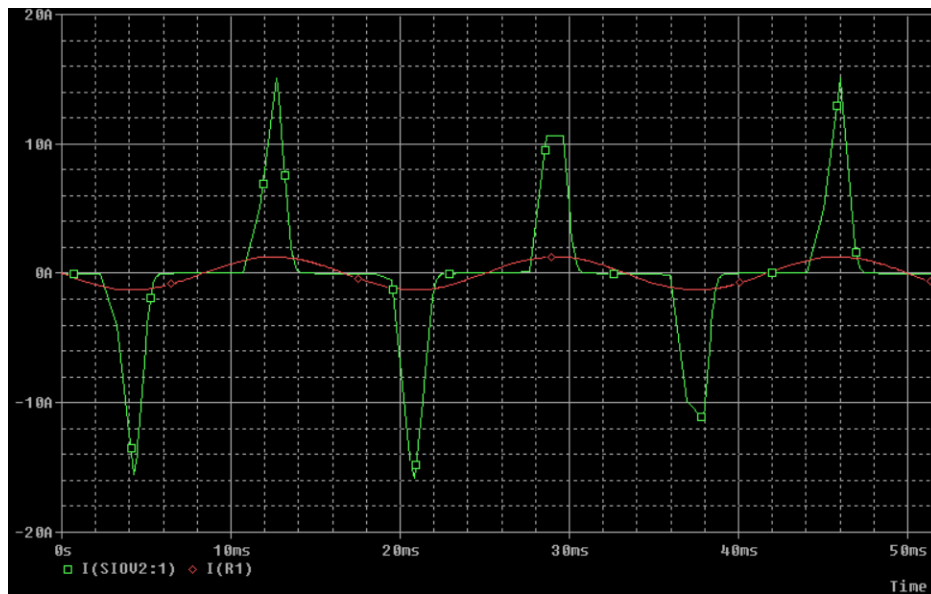
Os resultados destacaram que, conforme o esperado, o MOV não atuou quando uma tensão de 220V_{RMS} (311V de pico) foi aplicada (Figura 23), mas começou a conduzir corrente em valores próximos a sua tensão de varistor (Figura 24), que é o valor de tensão em que o MOV começa a alterar significativamente sua resistência, passando de alta para baixa impedância.

Figura 23 - Corrente no MOV (verde) e no resistor (vermelho) com 220V_{RMS}.



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor no software OrCAD X (versão 24.1).

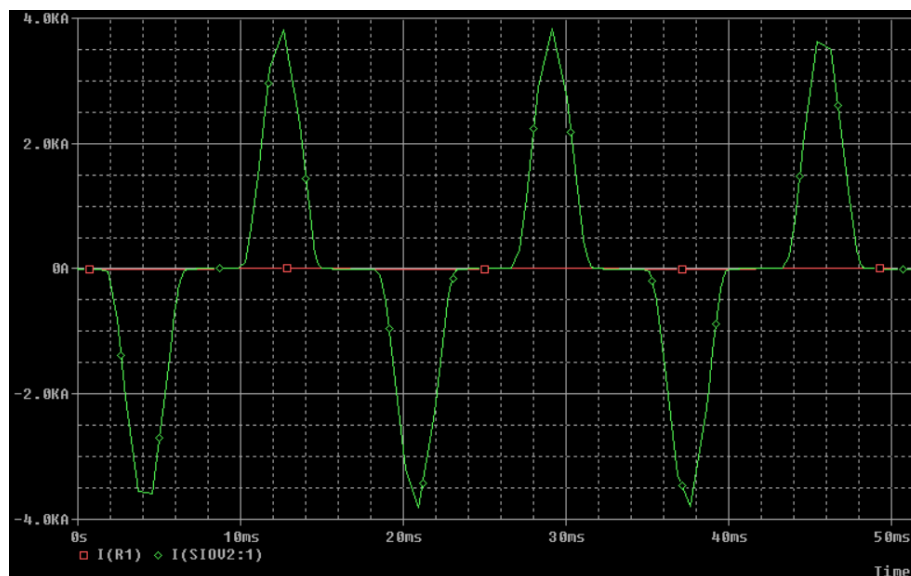
Figura 24 - Corrente no MOV (verde) e no resistor (vermelho) com 431V_{RMS}.



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor no software OrCAD X (versão 24.1).

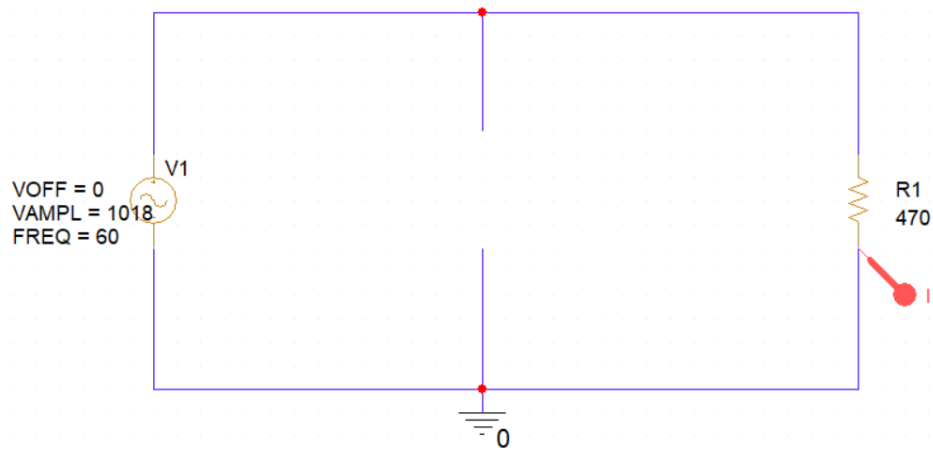
Em uma tensão mais alta, de 720V_{RMS} (1.018V de pico), o MOV atingiu seu ponto de clamping máximo, enquanto nenhuma corrente passou pelo resistor (Figura 25), demonstrando a capacidade de conter surtos dentro de suas especificações de projeto. Quando o varistor foi removido da simulação (Figura 26), a tensão excedeu significativamente os limites do circuito (Figura 27), reforçando sua importância no sistema de proteção.

Figura 25 - Corrente no MOV (verde) e no resistor (vermelho) com 720V_{RMS}.



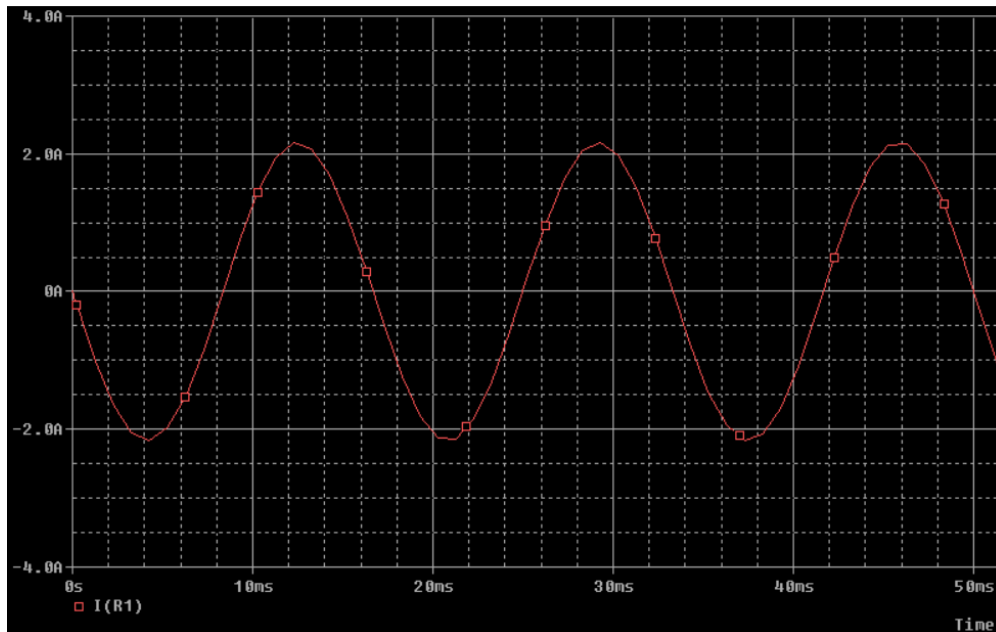
Fonte: Captura de tela realizada pelo autor no software OrCAD X (versão 24.1).

Figura 26 - Simulação sem o MOV.



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor no software OrCAD X (versão 24.1).

Figura 27 - Corrente elétrica no resistor com tensão de $720V_{RMS}$.



Fonte: Captura de tela realizada pelo autor no software OrCAD X (versão 24.1).

Apesar das limitações impostas pela falta de um modelo simulável do GDT, os testes virtuais com o MOV forneceram insights valiosos sobre a eficiência deste componente. No entanto, para uma validação completa do DPS, incluindo a interação entre MOV e GDT, será necessário realizar testes práticos em laboratório com os equipamentos apropriados. Isso permitiria avaliar o desempenho combinado dos

componentes sob surtos de alta intensidade, bem como suas capacidades de atuação escalonada.

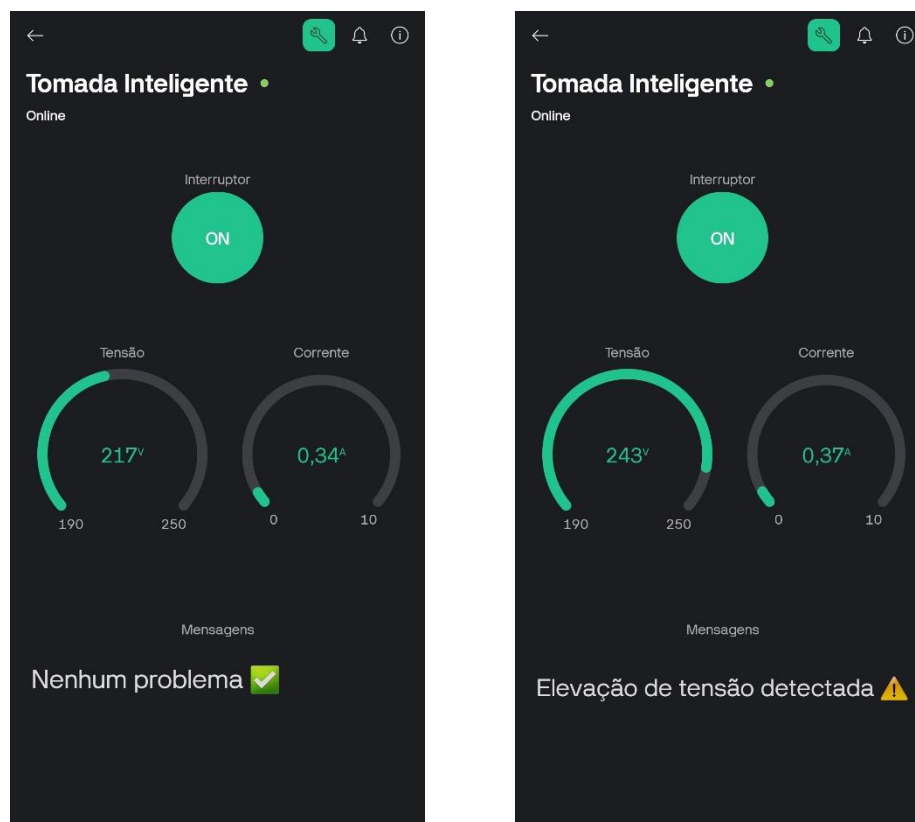
A realização de testes práticos para avaliar a proteção contra surtos do DPS foi inviabilizada pela ausência de equipamentos adequados para simular condições reais de sobretensão. Contudo, nas condições normais de uso, os componentes demonstraram um comportamento aparente dentro das expectativas.

5.2. Testes de Monitoramento de Energia

Os testes de monitoramento de energia foram realizados para avaliar a precisão dos sensores de corrente (ACS712) e tensão (ZMPT101B) integrados ao sistema. Durante os testes, os valores coletados pelos sensores foram comparados com medições realizadas por um multímetro digital. Os resultados indicaram que os sensores apresentaram boa precisão, com uma diferença de aproximadamente 1% para o sensor de tensão e 1,5% para o sensor de corrente em relação aos valores medidos pelo multímetro. Essa margem de erro está dentro dos limites aceitáveis para aplicações residenciais, demonstrando que o sistema é confiável para o monitoramento de energia.

Além disso, o sistema foi testado em condições simuladas de oscilação na rede elétrica para verificar sua capacidade de identificar eventos como *swell* e *sag*. Durante as simulações, o sistema comportou-se conforme o esperado, exibindo mensagens de alerta no painel da plataforma Blynk sempre que as oscilações ultrapassaram o limite de 10% da tensão nominal. Para oscilações mais severas, superiores a 15%, o sistema acionou o relé automaticamente, cortando o fornecimento de energia aos dispositivos conectados. Esse comportamento confirma que o sistema pode proteger os equipamentos contra condições de operação perigosas, garantindo maior segurança e confiabilidade. Abaixo é possível ver a tela de controle da tomada inteligente no aplicativo Blynk.

Figura 28 - Página de controle da tomada inteligente em diferentes cenários.



Fonte: Capturas de tela realizadas pelo autor no software Blynk IoT (versão 1.23.1).

5.3. Avaliação do Controle Remoto

Por fim, os testes também demonstraram que o envio de dados para a plataforma Blynk foi realizado de maneira eficiente, sem atrasos significativos, permitindo o monitoramento remoto em tempo real. O sistema respondeu de forma confiável aos comandos enviados pelo aplicativo móvel, com destaque para o acionamento do relé. Durante os testes, foi observado que o tempo de resposta dos comandos de ligar/desligar o relé foi rápido, com estimativas indicando que a ação era executada entre 0,2 e 0,4 segundos após o pressionamento do botão no aplicativo.

Essa latência reduzida demonstra a eficácia da comunicação entre a ESP32 e a plataforma, garantindo uma interação quase instantânea para o usuário. Adicionalmente, o sistema manteve sua confiabilidade mesmo em condições de variações na qualidade da conexão Wi-Fi, sugerindo que o protocolo utilizado é robusto e capaz de lidar com pequenas instabilidades sem comprometer a funcionalidade.

Os testes também avaliaram o comportamento do sistema sob diferentes cenários de carga, confirmando que a ESP32 gerenciou o controle do relé de forma consistente, independentemente do estado atual do sistema (normal, *swell* ou *sag*). A integração com a interface do Blynk mostrou-se intuitiva, permitindo que o usuário realizasse comandos manuais com facilidade, além de receber notificações de alertas e o estado do sistema em tempo real. A fácil personalização da interface é outro ponto positivo. Esses resultados reforçam a viabilidade do projeto como uma solução prática e confiável para controle e automação remota em aplicações residenciais.

6. CONCLUSÃO

O desenvolvimento da tomada inteligente com proteção contra surtos reforçou a relevância de combinar monitoramento de energia, proteção elétrica e conectividade IoT em dispositivos residenciais. O sistema proposto demonstrou viabilidade ao integrar componentes como MOV e GDT para proteção contra surtos, sensores ACS712 e ZMPT101B para medição da qualidade da energia e uma ESP32 conectada à plataforma Blynk para controle remoto de forma simplificada. Apesar das limitações observadas, o projeto alcançou os objetivos propostos e apresenta potencial para futuras melhorias e aplicações.

Apesar dos avanços alcançados, algumas limitações foram identificadas no projeto. Primeiramente, a implementação do sistema de proteção depende de um aterramento adequado para o funcionamento integral do DPS, o que pode não estar presente em todas as residências, comprometendo a eficácia dos GDT.

Uma das principais limitações observadas no projeto foi o espaço ocupado pelos módulos e componentes utilizados, o que poderia comprometer a viabilidade comercial. O uso de placas de circuitos separadas para os sensores e o controle comprometeu a mobilidade e compactação do sistema, dificultando sua integração em um formato mais acessível para o usuário final. Essa fragmentação também aumentou a complexidade do cabeamento interno, o que pode impactar a robustez e a confiabilidade do sistema em aplicações práticas.

Para superar as limitações de espaço, sugere-se a adoção do método *chip-down*, que consiste no uso direto do chip principal (como o ESP32-WROOM-32) integrado diretamente à placa de circuito impresso (PCB), em vez de utilizar módulos pré-fabricados. Essa abordagem permite uma redução significativa no tamanho do

dispositivo e melhora a integração dos componentes, resultando em um sistema mais compacto e eficiente. Além disso, recomenda-se a análise de outras combinações de uso híbrido de múltiplos MOV e GDT para otimizar o desempenho do DPS em diferentes cenários de surtos. A inclusão de diodos TVS como proteção adicional pode ser explorada, especialmente para circuitos sensíveis como a ESP32, aumentando a velocidade de resposta contra surtos menores. Por fim, a criação de uma única PCB para integrar todos os módulos do sistema e a implementação de novas estratégias de proteção e monitoramento podem tornar o sistema mais confiável e escalável para aplicações futuras.

REFERÊNCIAS

ABDEL-SALAM, M.; AHMED, N. A.; ELHAMD, I. S. Varistor as a surge protection device for electronic equipments. **2004 IEEE International Conference on Industrial Technology**, v. 2, p. 688-694, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2004.1490158>.

ALERT 360. **Beyond Safety: The Benefits of Home Automation**. Alert 360 Dealer, 11 mar. 2015. Disponível em: <https://www.alert360dealer.com/2015/03/11/beyond-safety-the-benefits-of-home-automation/>. Acesso em: 19 nov. 2024.

ALLEGRO MICROSYSTEMS. **Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.4 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor**. Allegro MicroSystems, 2024. Disponível em: <https://www.allegromicro.com/en/Products/Sense/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS712>. Acesso em: 26 nov. 2024.

BENEDEN, B. V. Varistors: Ideal Solution to Surge Protection. **Power Electronics Technology**, 2003.

BICLEANU, D. -P.; NICUTA, A. -M, Approach on Electrostatic Discharge protection structures based on Transient Voltage Suppressor diodes, **2013 8TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING**, p. 1-4, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/ATEE.2013.6563381>.

CIRANI, S; FERRAI, G.; PICONE, M.; VELTRI, L. **Internet of things**. 1. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2019. 383 p.

DATA BRIDGE MARKET RESEARCH. **Global Home Automation Market – Industry Trends and Forecast to 2031**. Data Bridge Market Research, mai. 2024. Disponível em: <https://www.databridgemarketresearch.com/pt/reports/global-home-automation-market>. Acesso em: 17 nov. 2024.

DIÓGENES, D. P. D. **Desenvolvimento de um smart plug para controle e monitoramento de aparelhos elétricos utilizando o conceito de internet das coisas**. 2019. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

ELECTRICAL 4 U. **Clamping Voltage: What is it? (vs Breakdown And Let-Through Voltage)**. Electrical 4 U, 10 jun. 2024. Disponível em: <https://www.electrical4u.com/clamping-voltage/>. Acesso em: 20 nov. 2024.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-WROOM-32 - Datasheet**. Espressif Systems, 2023. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents>. Acesso em: 30 out. 2024.

FLUKE. **What are voltage sags, dips, swells and transients?** Fluke. Disponível em: <https://www.fluke.com/en-in/learn/blog/power-quality/what-are-voltage-sags-dips-swells-and-transients-2>. Acesso em: 30 nov. 2024.

HARNDEN, J. D. Jr.; MARTZOLFF, F. D.; MORRIS, W. G.; GOLDEN, F. G. Metal-oxide varistor: a new way to suppress transients. **Electronics**, v. 45, n. 21, p. 91-95, 1972.

IEEE. **IEEE Guide for the Application of Surge-Protective Components in Surge Protective Devices and Equipment Ports - Part 1: Gas Discharge Tubes (GDTs)**. IEEE Std C62.42.1-2016. IEEE, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7781560>.

IEEE. **IEEE Standard for Test Methods and Performance Values for Metal-Oxide Varistor Surge Protective Components**. IEEE Std C62.33-2016. IEEE, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8277150>.

IEEE. **IEEE Standard for Test Methods and Preferred Values for Low-Voltage Gas Discharge Tube Surge-Protective Components**. IEEE Std C62.31-2020. IEEE, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9336360>.

KULARATNA, N; ROSS, A. S.; FERNANDO, J.; JAMES, S. **Design of Transient Protection Systems**: Including Supercapacitor Based Design Approaches for Surge Protectors. 1. ed. Países Baixos: Elsevier Science, 2018. 282 p.

MAGRANI, E. **A internet das coisas**. 1. ed. Rio de Janeiro: FGV Editora, 2018. 192 p.

MARTINS, P. **Smart home no Brasil deve crescer 91,06% até 2026**. Trends, 18 jan. 2023. Disponível em: <https://www.trendsce.com.br/2023/01/18/smart-home-no-brasil-deve-crescer-9106-ate-2026/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

MUSLEH, A. S.; DEBOUZA, M.; FAROOK, M. Design and Implementation of Smart Plug: An Internet of Things (IoT) Approach. **2017 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications**, p. 1-4, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICECTA.2017.8252033>.

PESSOA, M. S. P.; SPINOLA, M. M. **Introdução à Automação para Cursos de Engenharia e Gestão**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 333 p.

PRAYONGPUN, N.; SITTAUL, V. Smart Plug for Household Appliances. **Proceedings of 2nd International Conference on Intelligent Computing and Applications**. Advances in Intelligent Systems and Computing, v. 467, p. 317-325, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-1645-5_26.

QINGXIAN ZEMING LANGXI ELECTRONIC. **ZMPT101B - Current-type Voltage Transformer**. Qingxian Zeming Langxi Electronic. Disponível em: <https://www.micro-transformer.com/2ma-2ma-voltage-transformer-ZMPT101B.html>. Acesso em: 26 nov. 2024.

SANCHEZ-SUTIL, F.; CANO-ORTEGA, A. Smart plug for monitoring and controlling electrical devices with a wireless communication system integrated in a LoRaWAN. **Expert Systems with Applications**, v. 213, part A, n. 118976, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118976>.

SKIBINSKI, G. L.; THUNES, J. D.; MEHLHORN, W. Effective Utilization of Surge Protection Devices. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-22, n. 4, p. 641-652, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.1986.4504774>.

SOUZA, T.; RODRIGUES, G.; SERRÃO, L.; MACAMBIRA, R.; CARVALHO, C. Residential smart plug with Bluetooth communication. **Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications**, v. 6, n. 21, p. 20-30, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.5935/2447-0228.20200003>.

STEVAN JUNIOR, S. L.; FARINELLI, F. A. **Domótica: automação residencial e casas inteligentes com Arduino e ESP8266**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2019. 357 p.

SURGING. **Gas Discharge Tubes - SXH8 Series**. Surging. Disponível em: http://www.szshaoxin.com/product_detail.php?CaselId=1182. Acesso em: 22 nov. 2024.

TDK ELECTRONICS. **SIOV metal oxide varistors**. TDK Electronics, 2018. Disponível em: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/en/545904/products/product-search/technical-parameter/nonlinear-resistors/monolithic-varistors-epcos->. Acesso em: 10 out. 2024.

THONGKHAO, Y.; PORA, W. A Low-cost Wi-Fi Smart Plug with On-off and Energy Metering Functions. **2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology**, p. 1-5, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTICon.2016.7561264>.

ZOLA, J. G. Gas Discharge Tube Modeling With PSpice. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 50, n. 4, p. 1022-1025, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEM.2008.2004808>.