

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**FELIPE GABRIEL STUNITZ RAMOS
MATEUS AUGUSTO WALDECK KRACHINSKI**

**PROTÓTIPO DE MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA: COMUNICAÇÃO
INTELIGENTE E UMA ANÁLISE TARIFÁRIA**

PONTA GROSSA

2026

FELIPE GABRIEL STUNITZ RAMOS
MATEUS AUGUSTO WALDECK KRACHINSKI

**PROTÓTIPO DE MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA: COMUNICAÇÃO
INTELIGENTE E UMA ANÁLISE TARIFÁRIA**

Electric energy meter prototype: smart communication and tariff analysis

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Murilo Oliveira Leme

PONTA GROSSA

2026



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

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

FELIPE GABRIEL STUNITZ RAMOS
MATEUS AUGUSTO WALDECK KRACHINSKI

**PROTÓTIPO DE MEDIDOR DE ENERGIA ELÉTRICA: COMUNICAÇÃO
INTELIGENTE E UMA ANÁLISE TARIFÁRIA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 17/junho/2026

Murilo Oliveira Leme
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Edison Luiz Salgado Silva
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Percio Luiz Karam de Miranda
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2026

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não atenderão a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase da vida dos autores. Portanto, desde já, pedem-se desculpas àquelas que não estão presentes entre estas palavras, mas que podem estar certas de que fazem parte do pensamento e da gratidão de ambos.

Agradece-se ao Professor Orientador, Prof. Dr. Murilo Leme, pela sabedoria com que guiou esta trajetória, bem como pelas contribuições técnicas e pelo suporte ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Ao DAELE (Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica) e ao DERAC (Diretoria de Registro Acadêmico), expressa-se o reconhecimento pela cooperação e pelos recursos disponibilizados.

Felipe deixa registrado seu reconhecimento à sua família, pois sem o apoio dela seria muito difícil vencer este desafio, e especialmente à sua mãe, pelo apoio incondicional e pela sabedoria transmitida.

Mateus registra seu profundo reconhecimento à sua família, cujo apoio foi essencial para a superação deste desafio. Em especial, agradece à sua mãe, pelo apoio incondicional e pela sabedoria transmitida ao longo de sua trajetória. Estende também sua gratidão a Nossa Senhora Aparecida, pela luz que guiou e iluminou este caminho.

RESUMO

RAMOS, Felipe Gabriel Stunitz. KRACHINSKI, Mateus Augusto Waldeck. **Protótipo de Medidor de Energia:** Comunicação inteligente e uma análise tarifária. 2026. 84 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Elétrica - Universidade Tecnológica do Paraná - Paraná. Ponta Grossa, 2026.

O trabalho trata da necessidade contemporânea de otimização do consumo elétrico, focando na qualidade do uso energético visando a redução quantitativa do consumo energético. Desenvolveu-se um sistema de medição de energia elétrica, com o uso de sensores de corrente e de tensão interligados a um microcontrolador ESP32 via placa de circuito impresso (PCI) personalizada. A PCI integrou ambos os sensores, o microcontrolador e um circuito de condicionamento de sinais. A amostragem de dados foi realizada através de uma interface *web*, que exibiu gráficos em tempo real, calculou o consumo energético e dispõe da possibilidade de seleção de bandeiras tarifárias para orientar o uso eficiente de energia. Conforme a análise do sistema, demonstrou-se que a ferramenta possibilita padrões de consumo mais sustentáveis, mantendo níveis adequados de conforto e funcionalidade. A proposta representa um avanço significativo na interação entre usuários e sistemas energéticos, privilegiando a eficiência energética e o uso estratégico dos recursos disponíveis.

Palavras-chave: Consumo; Eficiência Energética; Sustentabilidade;

ABSTRACT

RAMOS, Felipe Gabriel Stunitz. KRACHINSKI, Mateus Augusto Waldeck. **Protótipo de medidor de energia:** comunicação inteligente e uma análise tarifária. 2025. Número total de folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2025.

This study addresses the contemporary need to optimize electricity consumption, focusing on the quality of energy use with the aim of quantitatively reducing energy consumption. An electrical energy measurement system was developed using current and voltage sensors connected to an ESP32 microcontroller through a customized printed circuit board (PCB). The PCB integrated both sensors, the microcontroller, and a signal conditioning circuit. Data sampling was performed through a *web* interface, which displayed real-time graphs, calculated energy consumption, and provided the option to select tariff flags in order to guide the efficient use of electricity. Based on the system analysis, it was demonstrated that the proposed tool enables more sustainable consumption patterns while maintaining adequate levels of comfort and functionality. The proposal represents a significant advancement in the interaction between users and energy systems, prioritizing energy efficiency and the strategic use of available resources.

Keywords: Consumption; Energy Efficiency; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Medidor Eletromecânico.....	21
Figura 2 - Medidor Eletrônico.....	23
Figura 3 - Medidor Eletrônico Inteligente.....	25
Figura 4 - Diagrama de Conexão.....	36
Figura 5 - Diagrama de Arquitetura de Protótipo.....	37
Figura 6 - Partes Internas do SCT-013.....	38
Figura 7 - Sensor SCT-013.....	39
Figura 8 - Sensor ZMP101B.....	44
Figura 9 - Pinout ZMPT101B.....	45
Figura 10 - Pinout ESP32-WROOM.....	46
Figura 11 - Interface PlatformIO.....	49
Figura 12 - Simulação de Divisor de Tensão.....	52
Figura 13 - Simulação de Tensão de Saída do Divisor de Tensão.....	53
Figura 14 - Layout da PCI.....	54
Figura 15 - Placa de Circuito Impresso.....	55
Figura 16 - Diagrama de conexão do protótipo a rede elétrica.....	59
Figura 17 - primeira vista Interface de site <i>web</i>	61
Figura 18 - Segunda vista interface site <i>web</i>	61
Figura 19 - Planilha de arquivo CSV de dados salvos.....	62
Figura 20 - Terceira vista interface site <i>web</i>	63
Fotografia 1 - Arquitetura final de hardware.....	64
Fotografia 2 - Medição de tensão com multímetro.....	65
Fotografia 3 - Medição de corrente com alicate amperímetro.....	66
Figura 21 - Gráfico de Corrente x Tempo com legenda de tarifas.....	68
Figura 22 - Potência e Consumo x Tempo.....	69
Figura 23 - Gráfico de Tensão x Tempo.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características sensor SCT-013-000.....	39
Tabela 2 - Características sensor ZMPT101B.....	44
Tabela 3 - Características ESP32-WROOM.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PROCEL	Programa Nacional de Energia Elétrica
IOT	Internet das coisas (<i>Internet of Things</i>)
LED	Diodo Emissor de Luz (<i>Light Emitting Diode</i>)
RF	Radiofrequência
ARM	Máquina RISC Avançada (<i>Advanced RISC Machine</i>)
RISC-V	Computador com Conjunto de Instruções Reduzido (<i>Reduced Instruction Set Computer</i>)
MHz	Megahertz
GHz	Gigahertz
PLC	Comunicação por Linha Elétrica (<i>Power Line Communication</i>)
TPM	Módulo de Plataforma Confiável (<i>Trusted Platform Module</i>)
SIN	Sistema Interligado Nacional
PIS	Programa de Integração Social
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
kWh	Quilowatt Hora
TUST	Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
RMS	Raiz Quadrática Média (<i>Root Mean Square</i>)
DOM	Modelo de Documentos por Objeto (<i>Document Object Model</i>)
JSON	Notação de Objetos em JavaScript (<i>JavaScript Object Notation</i>)
SPI	Interface Periférica de Sinal (<i>Serial Peripheral Interface</i>)
MOSI	Mestre envia Escravo recebe (<i>Master Out Slave In</i>)
MISO	Mestre Recebe Escravo Envia (<i>Master In Slave Out</i>)
SCK	Relógio Serial (<i>Serial Clock</i>)

SS/CS	Seleção de Escravo/Seleção de Chip (<i>Slave Select/Chip Select</i>)
UART	Receptor-Transmissor Assíncrono Universal
ADC	Conversor Analógico Digital
TC	Transformador de Corrente
AC	Corrente Alternada
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado (<i>Integrated Development Environment</i>)
API	Interface de Programação de Aplicações (<i>Application Programming Interface</i>).
REST	Transferência de Estado Representacional (<i>Representational State Transfer</i>).
SPICE	Programa de Simulação com Ênfase em Circuitos Integrados(<i>Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis</i>)
CSV	Valores Separados por vírgula (<i>Comma-Separated Values</i>)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Objetivo.....	14
1.1.1 Objetivos específicos.....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 Medidores de energia.....	18
2.1.2 Medidor eletrônico.....	20
2.1.3 Medidor inteligente.....	23
2.2 Estrutura tarifária.....	25
2.2.2 Grupos Consumidores.....	28
2.3 Linguagens de desenvolvimento de protótipo.....	31
2.3.1 C++.....	31
2.3.2 Javascript.....	32
2.3.3 HTML e CSS.....	32
2.3.4 Protocolo HTTP e formato JSON.....	33
2.4 Protocolo de comunicação SPI.....	33
2.5 Wifi.....	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1 Arquitetura proposta.....	36
3.2 Hardware.....	37
3.2.1 Sensor de corrente SCT-013-000.....	37
3.2.2 Circuito divisor de tensão.....	41
3.2.3 Sensor de tensão ZMP101B.....	43
3.2.4 Microcontrolador ESP32-WROOM.....	46
3.3 Software.....	47
3.3.1 Visual Studio Code.....	48
3.3.2 Platform IO.....	48
3.3.3 Fusion 360.....	50
3.3.4 LTSpice.....	50
4 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO.....	53
4.1 Placa de circuito impresso (PCI).....	53
4.2 Programação.....	55
4.2.1 Desenvolvimento de <i>web site</i>	57
4.3 Conexão do protótipo à rede elétrica.....	59
5 RESULTADOS.....	60
5.1 Interface Site <i>Web</i>	60
5.2 Procedimento Experimental e Validação de Medições.....	63
5.3 Análise Gráfica de Dados.....	66
6 CONCLUSÃO.....	70

6.1 Trabalhos Futuros.....	71
REFERÊNCIAS.....	73
anexo A - Direitos autorais - Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998.	
Disposições preliminares.....	78

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho abordou o desenvolvimento de um sistema inteligente de monitoramento energético residencial integrado a um *site web*, com foco específico na otimização do consumo elétrico frente às complexidades do sistema tarifário brasileiro e às recorrentes crises hídricas. Delimitou-se a pesquisa ao estudo e à implementação de tecnologias acessíveis para medição precisa, processamento inteligente de dados e desenvolvimento de interface intuitiva para usuários finais, considerando as particularidades do mercado brasileiro de energia e a vulnerabilidade do sistema diante de eventos climáticos extremos.

A matriz energética brasileira, predominantemente hídrica, enfrentou desafios críticos nos últimos anos, com reflexos diretos no custo de energia elétrica do consumidor. Conforme dados recentes da ANEEL, (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2024), a bandeira vermelha patamar 2 foi acionada em 60% dos meses entre 2021 e 2023, criando uma necessidade urgente de soluções que permitam aos consumidores gerenciar proativamente seu consumo energético. Este cenário agravou-se diante da crise hídrica considerada a mais severa dos últimos 91 anos, conforme registrou o ONS, (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2023), evidenciando a necessidade de abordagens inovadoras para o uso eficiente dos recursos energéticos disponíveis.

O objetivo do trabalho consistiu em desenvolver um sistema integrado de monitoramento energético residencial que possibilitasse gerenciar seu consumo com uma perspectiva inteligente e estratégica, considerando as variações tarifárias e a situação hídrica nacional. Para atingir esse propósito, estabeleceu-se como objetivos específicos: implementar um *hardware* de medição com a utilização de sensores para aquisição confiável de dados de consumo de energia elétrica; cálculo antecipado de custo energético; criar interface de *site web* intuitiva para visualização clara de dados; e validar o sistema por meio de estudos de caso comparativos com medições convencionais que comprovem sua eficácia e confiabilidade.

O embasamento teórico do trabalho sustentou-se em três pilares fundamentais: as tecnologias de *Smart Grids*, conforme estudos de Pereira, (2023), que investiga as redes inteligentes e sua aplicação prática no contexto residencial; a Gestão Tarifária, analisada por Lima, (2021), que examina em profundidade o sistema de bandeiras tarifárias e seus impactos econômicos sobre diferentes perfis

de consumidores; e os princípios de Eficiência Energética, conforme propostos por Carvalho, (2022), que desenvolveu estratégias para otimização do consumo sem perda de conforto ou qualidade de vida.

Metodologicamente, a pesquisa adotou abordagem mista, combinando pesquisa aplicada para o desenvolvimento tecnológico do sistema, estudo de caso controlado para validação prática em ambiente residencial real. Os procedimentos metodológicos detalhados, incluindo critérios de protocolos de coletas de dados e métodos de análise, serão minuciosamente descritos no capítulo específico dedicado à metodologia.

As contribuições esperadas abrangem desde a redução concreta do custo energético residencial por meio do consumo inteligente e estrategicamente planejado, até a promoção de maior conscientização dos usuários sobre seus padrões de consumo e seus impactos econômico-ambientais. Espera-se ainda que o sistema possa contribuir para a conscientização na gestão de demanda durante os períodos críticos de crise hídrica.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo funcional de um medidor de energia elétrica inteligente para uma residência, integrando sensores de tensão e corrente a um microcontrolador e a uma interface *web* para monitoramento em tempo real. Com este protótipo, busca-se viabilizar o monitoramento do consumo energético residencial, possibilitar a visualização dos dados por meio de gráficos de fácil compreensão, relacionar as medições ao sistema de bandeiras tarifárias brasileiro, contribuir para a análise estratégica do uso da energia elétrica e fomentar a conscientização do usuário visando à otimização do consumo residencial.

1.1.1 Objetivos específicos

- Conceber e desenvolver uma ferramenta digital destinada a auxiliar na conscientização da eficiência energética residencial no contexto brasileiro;
- Realizar uma revisão da literatura sobre medidores de energia elétrica, com ênfase em sua aplicação como ferramenta de promoção da

eficiência energética, associada à análise do mecanismo de bandeiras tarifárias vigente no âmbito do sistema elétrico brasileiro.

- Implementar mecanismos de coleta, processamento e apresentação de dados de consumo energético de forma clara e acessível;
- Contextualizar o consumo energético individual no âmbito do panorama macroeconômico do setor elétrico nacional;
- Integrar e exibir dados dinâmicos referentes às condições do mercado energético brasileiro, incluindo bandeiras tarifárias;
- Demonstrar ao consumidor seu papel e sua influência no ecossistema energético, visando fomentar decisões mais conscientes;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A evolução histórica dos sistemas elétricos residenciais reflete uma notável trajetória de transformações tecnológicas e mudanças de paradigma sobre eficiência energética. Desde seus primórdios como solução básica de iluminação no final do século XIX, a energia elétrica residencial passou por significativas mudanças, evoluindo gradualmente para atender demandas crescentes de conforto e funcionalidade. Conforme demonstra Silva, (2019), as primeiras instalações elétricas residenciais caracterizavam-se pela simplicidade funcional, com sistemas de iluminação incandescentes representando praticamente a totalidade do consumo energético doméstico. Neste período inicial, o conceito de eficiência energética era praticamente inexistente, com o foco voltado exclusivamente para a expansão do acesso à energia.

A massificação do uso de eletrodomésticos nas décadas de 1950 a 1970 marcou uma virada significativa, transformando profundamente os padrões de consumo residencial. Como observa Fernandes, (2020), a introdução de refrigeradores, fogões elétricos e televisores não apenas elevou drasticamente a demanda energética, mas também expôs as limitações dos sistemas de medição e gestão de energia existentes. Os medidores eletromecânicos, tecnologia dominante até o final do século XX, limitavam-se ao registro cumulativo do consumo, oferecendo pouca ou nenhuma informação que permitisse ao consumidor compreender seus hábitos de consumo ou identificar oportunidades de economia.

As crises do petróleo na década de 1970 representaram um divisor de águas na percepção global sobre energia, forçando uma reavaliação urgente dos padrões de consumo. No Brasil, este movimento ganhou contornos específicos com a criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) em 1985. Conforme analisa Goldenberg, (2021), esta iniciativa marcou a institucionalização do conceito de "conservação de energia" no país, estabelecendo que a energia mais barata e limpa é aquela que não precisa ser gerada. O surgimento do Selo Procel de Economia de Energia em 1993 constituiu um marco fundamental, criando um sistema de informação padronizado que permitia aos consumidores comparar a eficiência de diferentes modelos de aparelhos. Oliveira, (2022) demonstra em sua pesquisa como a rotulagem tornou-se um instrumento crucial para orientar escolhas

de consumo, estimulando a concorrência entre fabricantes por melhores índices de eficiência energética.

A virada do milênio trouxe consigo uma transformação radical com o advento das tecnologias digitais e o conceito de *Smart Grids* (Redes Inteligentes). Pereira, (2023) define este novo paradigma como sistemas de energia elétrica que utilizam tecnologia de informação e comunicação bidirecional para melhorar a eficiência, confiabilidade e sustentabilidade da produção e distribuição de energia. A substituição dos medidores eletromecânicos por medidores inteligentes (*smart meters*) representou o primeiro passo concreto nesta revolução, permitindo a coleta automatizada de dados detalhados sobre o consumo. Zhou, (2022) documenta esta transição tecnológica, destacando como a integração entre *hardware* de sensoriamento e plataformas *software* criou novas possibilidades para a gestão do consumo energético.

A consolidação da Internet das Coisas (*IoT*) na década de 2010 acelerou dramaticamente a evolução dos sistemas de monitoramento energético. Como argumenta Santos, (2021), a convergência entre sensores de baixo custo, protocolos de comunicação eficientes e plataformas de nuvem possibilitou o desenvolvimento de soluções acessíveis para monitoramento em tempo real do consumo residencial. Paralelamente, o sistema de bandeiras tarifárias implementado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em 2015 introduziu uma complexidade adicional na gestão energética residencial. Lima, (2021) analisa em profundidade como este mecanismo transformou a fatura de energia elétrica em um reflexo direto das condições hídricas e termelétricas do país, criando a necessidade premente de ferramentas que auxiliassem os consumidores a navegar neste cenário de preços dinâmicos.

O estágio atual de evolução é caracterizado pela integração de técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina aos sistemas de gestão energética. Carvalho (2022) demonstra em sua pesquisa como algoritmos preditivos podem prever tendências do consumo energético de curto prazo com base em dados históricos e variáveis externas, como condições meteorológicas e calendário social. Esta capacidade preditiva representa um avanço qualitativo significativo, permitindo

que os sistemas não apenas relatem o consumo passado, mas antecipem padrões futuros e recomendem ações proativas.

O potencial de economia neste setor é significativo e amplamente documentado. Estudos do PROCEL, (2022) indicam que o desperdício de energia elétrica nas residências brasileiras pode atingir a marca de 20% do consumo total, um valor que reflete uma ineficiência sistêmica com impactos econômicos e ambientais. Esta lacuna de eficiência é multifacetada, estando frequentemente associada a três fatores principais: a permanência de equipamentos ineficientes nas residências, hábitos de consumo pouco conscientes enraizados no dia a dia das famílias e, de forma mais crítica, a lacuna informacional que impede o usuário final de acessar dados compreensíveis e em tempo real sobre seu consumo.

Baseando-se na Teoria dos *Nudges* (empurrões) de Thaler e Sunstein, 2008, a proposta sustenta que o fornecimento de dados precisos, devidamente contextualizados e transformados em *insights* acionáveis atua como o catalisador primordial para a mudança de comportamento e a consequente otimização energética. Como explica Kahneman, 2011 em sua obra sobre os dois sistemas de pensamento, a apresentação adequada de informação pode facilitar a ativação do sistema racional, superando vieses de consumo enraizados.

A evolução tecnológica culmina na transformação do consumidor de agente passivo para participante ativo no sistema elétrico. Esta mudança de paradigma ressignifica o conceito de *market-share* no setor energético. Segundo Almeida, 2023, quando consumidores individualmente eficientes se agregam em números significativos, seu impacto coletivo pode modificar a curva de demanda do sistema, especialmente nos críticos horários de pico. Esta capacidade de influência coletiva gera uma economia de escala para todo o sistema elétrico, como demonstram os estudos de Rodrigues, 2022 sobre gestão da demanda.

A jornada dos sistemas elétricos residenciais, desde as simples instalações de iluminação do século XIX até as atuais plataformas inteligentes de gestão energética, refletem uma notável evolução tecnológica e conceitual. Cada estágio desta trajetória contribuiu para um entendimento mais sofisticado da eficiência energética, que hoje compreende não apenas a evolução tecnológica dos

equipamentos, mas também a otimização de seus padrões de uso através do empoderamento informacional do consumidor. A fundamentação aqui apresentada demonstra que o desenvolvimento da ferramenta proposta se insere naturalmente nesta trajetória evolutiva, sintetizando os avanços tecnológicos mais recentes com percepções de diversas disciplinas, promovendo não apenas economia individual, mas também benefícios coletivos para a sustentabilidade do sistema elétrico brasileiro.

2.1 Medidores de energia

Como argumenta Silva (2019), o medidor eletromecânico foi inventado por Ottó Bláthy em 1889, sendo posteriormente comercializado pela empresa húngara Ganz. Sua criação representou um marco fundamental para a comercialização de energia elétrica, pois permitiu pela primeira vez a medição precisa e confiável do consumo energético. No Brasil, conforme destaca Silva (2019), esses medidores tornaram-se padrão no setor elétrico a partir da expansão das redes de distribuição nas décadas de 1920 e 1930, permanecendo como tecnologia dominante até o final do século XX.

Seu funcionamento baseia-se no princípio do motor de indução eletromagnética, operando através da interação entre campos magnéticos variáveis (IPEM-SP, 2020). Quando a energia elétrica circula pelo circuito, as bobinas de corrente e tensão geram fluxos magnéticos defasados entre si. Esses fluxos induzem correntes parasitas no disco de alumínio móvel, criando um conjugado motor proporcional ao produto da tensão, corrente e cosseno do ângulo de defasagem - exatamente a potência ativa do circuito. O disco gira livremente entre os eletroímãs, e sua velocidade de rotação é diretamente proporcional à potência consumida no instante.

Quanto aos componentes principais, o sistema eletromecânico compreende o sistema eletromagnético, composto por duas bobinas - a bobina de tensão, com muitas espiras de fio de cobre, conectada em paralelo com a carga; e a bobina de corrente, com poucas espiras de cobre, conectada em série com a carga. O disco de alumínio atua como elemento móvel que gira entre os campos magnéticos das bobinas, montado sobre um eixo de aço temperado com mancais de apoio. O

sistema de amortecimento utiliza um ímã permanente que induz correntes parasitas no disco em movimento, gerando um conjugado resistente proporcional à velocidade de rotação. O sistema de registro é composto por engrenagens de precisão que convertem as rotações do disco em indicação numérica no mostrador, seguindo uma relação constante entre rotações e quilowatt-hora, CG SOLUÇÕES, (2023). A estrutura mecânica completa o conjunto com carcaça metálica provida de bornes de conexão, base de suporte e sistema de vedação contra poeira e umidade.

A precisão do medidor eletromecânico é garantida pelo ajuste fino de dois elementos críticos: o ajuste de carga leve para regulação do ângulo entre os fluxos e o ajuste de velocidade para posicionamento do ímã permanente. Conforme o, IPEM-SP (2020), esses medidores apresentam classe de precisão típica de 2.0, mantendo erro metrológico dentro de $\pm 2\%$ em condições normais de operação. Entre suas vantagens consolidadas destacam-se a alta confiabilidade e vida útil, com operação contínua por mais de 30 anos sem manutenção significativa; imunidade a transitórios elétricos com proteção natural contra surtos de tensão; independência energética com funcionamento autônomo sem fonte auxiliar de alimentação; custo de fabricação reduzido pela tecnologia madura com processos industriais consolidados; e manutenção simplificada com reparo possível com ferramental básico.

Contudo, como aponta, Goldenberg (2021), apresentam limitações intrínsecas como inabilidade para medição em circuitos com harmônicas significativas; suscetibilidade a fraudes por manipulação magnética externa; impossibilidade de medição bidirecional para geração distribuída; ausência de comunicação de dados e armazenamento de histórico e perdas técnicas elevadas na ordem de 2 a 3 Watts por medidor continuamente. A evolução tecnológica conduziu progressivamente à substituição desses medidores por versões eletrônicas, porém seu legado permanece como referência fundamental na história da metrologia elétrica, com milhões de unidades ainda em operação em diversas concessionárias do país, segundo, Silva, (2019).

Figura 1 - Medidor Eletromecânico



Fonte: IPEM-SP (2020)

2.1.2 Medidor eletrônico

Como argumenta Pereira (2023) , o medidor eletrônico surgiu como evolução tecnológica dos modelos eletromecânicos, ganhando espaço no mercado a partir da década de 1990. Desenvolvido para superar as limitações dos medidores tradicionais, representou uma mudança de paradigma na medição de energia elétrica, substituindo componentes mecânicos por circuitos integrados e processamento digital de sinais. Conforme destaca Carvalho (2022) , no Brasil, sua adoção tornou-se significativa a partir dos anos 2000, acompanhando a modernização do sistema elétrico nacional e a necessidade de medições mais precisas e versáteis.

Seu funcionamento baseia-se na amostragem digital dos sinais de tensão e corrente. Sensores precisos capturam continuamente as formas de onda da rede elétrica, enquanto conversores analógico-digitais transformam esses sinais em dados numéricos. Um microcontrolador processa essas informações em tempo real, calculando não apenas a energia ativa, mas também parâmetros como energia

reativa, fator de potência, demanda máxima e harmônicas, Pereira, (2023). O princípio fundamental reside na multiplicação digital instantânea dos valores de tensão e corrente, seguida da integração temporal para obtenção do consumo energético MOTTER, (2020).

Quanto aos componentes principais, o medidor eletrônico possui sensores de corrente do tipo shunt ou transformadores de corrente, que capturam o sinal de carga do circuito CONSUMO EM PAUTA, (2022). Os conversores analógico-digitais de alta velocidade digitalizam os sinais com resolução típica de 16 bits ou superior. A memória não volátil armazena dados históricos de consumo, eventos e configurações. O display de cristal líquido ou LED Diodo Emissor de Luz apresenta as informações de forma clara e completa. A fonte de alimentação chaveada fornece energia estável para todos os circuitos eletrônicos, enquanto as interfaces de comunicação incluem portas ópticas, RS-485 ou módulos RF para troca de dados Pereira, (2023).

A exatidão dos medidores eletrônicos é notavelmente superior aos modelos anteriores, alcançando classes de exatidão de 0,5 ou 0,2, o que significa um erro máximo de medição entre 0,5% a 0,2%; em versões mais avançadas, esta exatidão mantém-se estável mesmo em condições extremas de carga, temperatura e fator de potência. Como argumenta, Carvalho (2022) , entre suas principais vantagens destaca-se a capacidade de medição multifuncional, permitindo a aquisição simultânea de diversos parâmetros elétricos. A alta precisão mantém-se em toda a faixa de carga, dos 5% aos 100% da corrente nominal. A medição bidirecional suporta sistemas de geração distribuída, Pereira, (2023), enquanto a comunicação digital integrada permite leitura remota e configuração à distância, MOTTER, (2020). A imunidade a fraudes magnéticas é significativamente maior, e a capacidade de armazenamento histórico de consumo oferece subsídios para análise detalhada do perfil de carga, OLIVEIRA,(2019).

Entretanto, apresentam algumas limitações, como maior complexidade técnica que exige mão de obra especializada para manutenção, Carvalho, (2022). A dependência de fonte de alimentação torna-o vulnerável a quedas de energia prolongadas, podendo perder dados temporários. O custo inicial superior aos medidores eletromecânicos e a susceptibilidade a surtos eletromagnéticos e

descargas atmosféricas também representam desafios, MOTTER, (2020). A evolução tecnológica posicionou os medidores eletrônicos como predecessores diretos dos modernos medidores inteligentes, formando a base para o desenvolvimento das smart grids, Pereira, (2023). Atualmente, constituem parcela significativa do parque de medição brasileiro, especialmente em aplicações comerciais e industriais onde a precisão e multifuncionalidade são requisitos essenciais para a adequada gestão energética, Carvalho, (2022).

Figura 2 - Medidor Eletrônico



Fonte: CG soluções (2023)

2.1.3 Medidor inteligente

Os medidores inteligentes; *smart meters* surgiram no início dos anos 2000, com implantação pioneira na Itália e Suécia entre 2001 e 2003, representando um marco na evolução da medição de energia elétrica. No Brasil, as primeiras iniciativas significativas ocorreram a partir de 2010, com projetos piloto em São Paulo e Minas Gerais, ganhando impulso decisivo com o programa de medição avançada da

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em 2018, que estabeleceu as diretrizes para a massificação desta tecnologia no país.

Seu funcionamento baseia-se em sistemas digitais avançados que realizam aquisição contínua de parâmetros elétricos através de sensores de alta precisão. A arquitetura operacional envolve amostragem de sinais de tensão e corrente em taxas superiores a 10 *kHz*, processamento digital por unidades microcontroladas especializadas e comunicação bidirecional via múltiplos protocolos de comunicação. Diferentemente dos medidores convencionais, estas unidades operam como nós ativos em redes de comunicação inteligentes, transmitindo e recebendo dados em intervalos que variam de 15 minutos a 1 segundo, possibilitando um monitoramento praticamente em tempo real do consumo energético.

Quanto aos componentes principais, o sistema incorpora sensores de efeito *Hall* ou *shunts* de precisão para medição de corrente, combinados com divisores resistivos de alta estabilidade para aferição de tensão. O processamento é realizado por microcontroladores *ARM* (*Advanced RISC Machine*) ou *RISC-V* (*Reduced Instruction Set Computer*) com capacidade de *edge computing* (*Computação de borda*), permitindo análise local de dados. Os módulos de comunicação suportam múltiplos protocolos, incluindo *RF* nas faixas de 900MHz e 2.4GHz, conectividade celular, *PLC* (*Power Line Communication*) e *Wi-Fi*. O armazenamento utiliza memória *Flash* com capacidades entre 4GB e 32GB para dados históricos, enquanto a segurança é garantida por *chips* criptográficos especializados e módulos *TPM* (*Trusted Platform Module*). O sistema de alimentação emprega fontes chaveadas com supercapacitores para *backup*, assegurando operação contínua mesmo durante interrupções de energia.

Entre as vantagens operacionais destacam-se a precisão metrológica de classe 0,2S ou superior, medição bidirecional para suporte à geração distribuída, detecção instantânea de faltas e tentativas de fraude, capacidade de atualizações remotas de *firmware* e plena compatibilidade com normativas nacionais e internacionais do setor elétrico IEC, 2020; IEEE, 2018.

No contexto da eficiência energética, os medidores inteligentes revolucionam a gestão energética através do fornecimento de curvas de carga

detalhadas com resolução temporal inédita, identificação precisa de desperdícios por equipamento específico, integração nativa com sistemas de tarifação dinâmica e horária, monitoramento contínuo da qualidade de energia e suporte robusto a programas de resposta à demanda, permitindo ajustes automáticos no consumo conforme as condições da rede.

Para a geração de *nudging* comportamental (estímulos comportamentais), atuam como catalisadores de mudança através do fornecimento de *feedback* (*retroalimentação*) imediato sobre padrões de consumo, envio de alertas personalizados para situações de excesso, estabelecimento de metas de consumo adaptativas às necessidades do usuário, disponibilização de comparativos com usuários de perfil similar e implementação de estratégias de gamificação que recompensam o uso eficiente de energia (Thaler e Sunstein, 2008). A implementação destes medidores demonstra reduções consistentes de 5% a 15% no consumo residencial apenas através dos mecanismos de conscientização, podendo alcançar patamares de 20% a 30% de economia quando integrados a sistemas automáticos de controle de carga, representando um avanço crucial para a sustentabilidade energética nacional e para a formação de uma cultura de consumo mais responsável e inteligente.

Figura 3 - Medidor Eletrônico Inteligente



Fonte: Consumo em Pauta (2022)

2.2 Estrutura tarifária

A expansão de sistemas geradores de energia elétrica é um processo que deve ocorrer em paralelo com o desenvolvimento da infraestrutura de transporte dessa energia. A construção de novas linhas de transmissão, assim como a melhoria contínua e a manutenção adequada das redes já existentes, são atividades fundamentais para garantir a confiabilidade e a segurança do SIN (Sistema Interligado Nacional).

Neste contexto, as tarifas de energia elétrica possuem a função primordial de assegurar às empresas concessionárias dos serviços de distribuição e transmissão uma receita suficiente para cobrir não apenas seus custos operacionais, mas também os investimentos necessários para expandir a capacidade do sistema e garantir o atendimento com os níveis de qualidade exigidos pelo órgão regulador. Os custos operacionais e os investimentos que são repassados às tarifas são meticulosamente calculados e auditados pela Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL, 2024, em processos periódicos de revisão tarifária.

De maneira a manter e progredir com a continuidade e a qualidade do serviço de fornecimento de energia, a distribuidora incorre em uma série de custos que são, legitimamente, repassados aos seus consumidores por meio das tarifas de utilização. A composição final dessa tarifa é definida pela agregação de custos provenientes de três grandes categorias distintas, que refletem a cadeia produtiva do setor: os custos associados à geração da energia propriamente dita, os custos de transporte dessa energia nos sistemas de transmissão e distribuição, e os encargos setoriais estabelecidos por lei.

Além desses custos diretamente ligados à atividade-fim das empresas do setor elétrico, incidem sobre o valor total da fatura de energia elétrica uma série de impostos e contribuições. Estes incluem tributos federais, como o PIS (Programa de Integração Social) e a COFINS (Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social), com alíquotas de 1,65% e 7,6%, respectivamente; o imposto estadual ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços), cuja alíquota pode variar, sendo 25% um valor de referência comum em vários estados; e, ainda, a contribuição municipal para custeio da iluminação pública. Esta complexa estrutura

de custos e tributos forma a base da tarifa, sobre a qual podem ser aplicados os acréscimos variáveis determinados pelo sistema de Bandeiras Tarifárias, que sinalizam os custos marginais de geração em tempo real.

O setor elétrico brasileiro possui características singulares, notadamente a forte dependência das condições hidrológicas para a geração de energia. A predominância da fonte hídrica na matriz de geração, historicamente responsável pela maior parte da energia produzida no país, introduz uma variabilidade significativa no custo de suprimento, diretamente ligada aos níveis dos reservatórios das usinas. Para lidar com essa volatilidade e sinalizar de forma transparente à população os custos reais da geração de energia em diferentes cenários, a Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL, instituiu, em 2015, o mecanismo das Bandeiras Tarifárias. Este sistema visa constituir uma precificação mais dinâmica, refletindo as condições de curto prazo do Sistema Interligado Nacional (SIN) e incentivando o uso consciente da energia elétrica.

O mecanismo das bandeiras é uma ferramenta de gestão de risco hidrológico e de custos. Ele funciona como um termômetro do custo marginal de geração de energia. Quando os reservatórios estão em níveis satisfatórios, a energia das usinas hidrelétricas, de custo operacional mais baixo, é suficiente para atender à demanda. No entanto, em períodos de escassez hídrica, torna-se necessário acionar termelétricas, cujo custo de geração (Combustível, Operação e Manutenção) é substancialmente mais elevado.

As bandeiras tarifárias sinalizam, por meio de acréscimos na tarifa de energia (R\$/kWh), esses custos adicionais. O valor da tarifa de energia ("TUST" e "TUSD" para componentes de distribuição e transmissão) permanece inalterado; o que varia é um acréscimo ou não, definido pela bandeira em vigor. O cálculo para determinar qual bandeira será aplicada é mensal e realizado pela ANEEL, considerando principalmente:

- O custo de geração das usinas termelétricas que devem ser despachadas.
- O nível dos reservatórios das hidrelétricas.
- A previsão de afluência (volume de água nos rios).
- A projeção de demanda de energia.

2.2.1 Bandeira tarifárias

Atualmente, o sistema é composto por quatro bandeiras, cada uma representando uma condição específica de custos de geração. A seguir as bandeiras vigentes pela ANEEL (2026), e suas respectivas condições:

- Bandeira Verde

Os custos de geração são baixos, normalmente quando a energia hídrica é suficiente para atender a demanda, sem necessidade significativa de acionamento de termelétricas, em vigência em condições normais de geração e consumo de energia elétrica, assim, conta com um acréscimo de R\$ 0,00 / kWh. Reflete um estado de equilíbrio hidroenergético no SIN, onde o custo marginal de operação é determinado predominantemente pelas usinas hidrelétricas de baixo custo variável.

- Bandeira Amarela

Ocorre quando há um aumento moderado no custo de geração, geralmente devido ao acionamento inicial de usinas termelétricas com custo intermediário, conta com um adicional de R\$1,885/100 kWh. Sinaliza uma pressão inicial no sistema, onde a geração térmica complementar se torna necessária para preservar os reservatórios hídricos, sucedendo em custos de combustível (principalmente gás natural).

- Bandeira Vermelha - Patamar 1

Acionada quando é necessário o despacho de um conjunto maior de termelétricas, incluindo algumas com custo de combustível mais elevado (ex.: óleo combustível), dessa forma, com a utilização elevada de combustíveis, conta com um adicional de R\$4,463/100kWh na fatura de energia elétrica. Indica um estado de estresse hidroenergético. O custo marginal de operação do sistema eleva-se significativamente devido ao despacho forçado de termelétricas de alto custo para garantir a segurança energética.

- Bandeira Vermelha - Patamar 2

Representa a situação de maior custo, quando há necessidade de acionamento de todas as termelétricas disponíveis, inclusive as mais ineficientes e caras, fazendo com que assim, tenha-se o maior adicional de bandeira tarifárias R\$7,877/100 kWh. Corresponde a um cenário crítico, frequentemente associado a secas severas. O custo marginal atinge seu pico, refletindo o alto preço dos combustíveis e a indisponibilidade de recursos hídricos baratos.

2.2.2 Grupos Consumidores

A classificação dos consumidores de energia elétrica é fundamental para a definição de tarifas, políticas de fornecimento e estratégias de gestão de demanda por parte das concessionárias e dos órgãos reguladores. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece as normas que regulam a relação entre distribuidoras e consumidores, os quais são divididos em dois grandes grupos: o Grupo A (alta e média tensão) e o Grupo B (baixa tensão).

- Grupo A (Alta Tensão)

O Grupo A é composto por unidades consumidoras atendidas em tensão igual ou superior a 2,3 kV. Este grupo abrange, tipicamente, indústrias, grandes comércios, condomínios comerciais e outros estabelecimentos de maior porte energético. As principais características deste grupo incluem:

- Estrutura Tarifária Binômica: A fatura é composta por duas parcelas: (i) Demanda de potência (kW): valor referente à potência disponibilizada pela concessionária para atendimento da unidade consumidora; e (ii) Consumo de energia (kWh): valor referente à energia elétrica efetivamente consumida no período de faturamento.
- Tarifa Hora Sazonal: O valor da energia varia conforme a hora do dia (horário de ponta e horário fora de ponta) e a estação do ano (período seco e úmido), incentivando a migração do consumo para horários de menor demanda no sistema elétrico.

- Medição de Demanda: Exige medição específica da demanda máxima registrada no período, realizada por meio de medidores eletrônicos com curvas de carga.

O Grupo A é subdividido nas seguintes subclasses: A1 (≥ 230 kV), A2 (de 88 kV a 138 kV), A3 (69 kV), A3a (30 kV a 44 kV), A4 (2,3 kV a 25 kV) e AS (subterrâneo).

- Grupo B (Baixa Tensão)

O Grupo B é composto por unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 2,3 kV, típica de residências, pequenos comércios, indústrias de pequeno porte e propriedades rurais. Este grupo abrange a maioria dos consumidores brasileiros. Suas principais características são:

- Estrutura Tarifária Monômia: A fatura é composta apenas pela parcela de consumo de energia (kWh), não havendo cobrança específica pela demanda de potência contratada.
- Tarifa Monômia ou Binômia Simplificada: Na maioria das subclasses, aplica-se uma tarifa única por kWh consumido. Algumas distribuidoras adotam uma tarifa binômia simplificada com uma parcela fixa (disponibilidade) e outra variável (consumo).
- Sistema de Bandeiras Tarifárias: Sinaliza ao consumidor o custo variável da geração de energia por meio de bandeiras coloridas (verde, amarela, vermelha P1 e vermelha P2) na fatura de energia elétrica refletindo as condições de geração do país.

O Grupo B é subdividido nas seguintes subclasses: B1 (residencial e residencial baixa renda), B2 (rural), B3 (demais classes: industrial, comercial, serviços, poder público), B4 (iluminação pública).

- Classificação por Finalidade de Consumo

Além da divisão por nível de tensão, os consumidores são classificados conforme a finalidade de uso da energia, o que influencia diretamente as tarifas aplicadas e os subsídios concedidos:

- Residencial (Subclasse B1): Destinado a unidades habitacionais. Usuários de baixa renda podem usufruir de tarifas reduzidas (Tarifa Social de Energia Elétrica – TSEE).
- Industrial: Destinado a atividades industriais. Geralmente enquadrado no Grupo A, com tarifas horo-sazonais para incentivar o consumo fora do horário de ponta.
- Comercial: Destinado a atividades de comércio e serviços. Pode ser enquadrado no Grupo A (grandes consumidores) ou no Grupo B (pequenos consumidores).
- Rural (Subclasse B2): Destinado a atividades agropecuárias e irrigação. Usufrui de descontos tarifários significativos (redução de ICMS e descontos na tarifa de uso do sistema elétrico).
- Poder Público: Destinado a órgãos da administração pública direta e indireta.
- Iluminação Pública (Subclasse B4): Destinada ao serviço de iluminação de vias, praças e logradouros públicos.

A compreensão da classificação dos grupos consumidores é essencial para o desenvolvimento do protótipo de medidor de energia elétrica proposto neste trabalho. O dispositivo foi projetado prioritariamente para o Grupo B (baixa tensão), especificamente para a subclasse residencial (B1), uma vez que este público possui menor acesso a sistemas de monitoramento de consumo detalhados. A implementação do sistema de bandeiras tarifárias na interface *web* e o cálculo do custo instantâneo com base nas bandeiras selecionadas pelo usuário demonstram a aplicação prática deste conhecimento regulatório no protótipo desenvolvido.

2.3 Linguagens de desenvolvimento de protótipo

O desenvolvimento de sistemas embarcados para monitoramento de grandezas elétricas, como tensão e corrente, utilizando microcontroladores *ESP32*, envolve a integração de múltiplas linguagens de programação que atuam em diferentes camadas do sistema. Esta análise aborda as principais linguagens empregadas no código apresentado, destacando suas características, aplicações e sinergia no contexto de sistemas embarcados para aquisição de dados.

2.3.1 C++

No cerne do sistema reside a linguagem C++, utilizada para programação direta do microcontrolador *ESP32*. A escolha do C++ justifica-se por sua eficiência computacional, controle de baixo nível sobre o *hardware* e portabilidade entre diferentes plataformas de microcontroladores. No contexto específico do projeto, o C++ é empregado através do *framework* Arduino, que fornece uma camada de abstração simplificada para operações de entrada e saída, permitindo o acesso aos periféricos do *ESP32* de maneira padronizada.

A implementação em C++ possibilita o desenvolvimento de algoritmos eficientes para cálculo de valores RMS (*Root Mean Square*) necessários para as medições de tensão e corrente alternada. Através de amostragem sequencial dos sinais analógicos e aplicação de cálculos matemáticos, o sistema realiza o processamento digital de sinais em tempo real. A linguagem permite otimizações cruciais para sistemas embarcados, como o uso de variáveis voláteis para acesso a registradores de hardware, pré-cálculo de constantes e minimização de alocações dinâmicas de memória, garantindo assim a estabilidade e confiabilidade do sistema de aquisição.

2.3.2 Javascript

Para a camada de apresentação e interação com o usuário, adota-se *JavaScript* como linguagem *client-side* (lado do cliente) para implementação da interface *web*. A escolha do *JavaScript* deve-se à sua capacidade de criar interfaces dinâmicas e responsivas que atualizam em tempo real sem necessidade de recarregamento da página. Através da *API Fetch* e do paradigma de programação assíncrona, o *JavaScript* estabelece comunicação constante com o servidor embarcado no *ESP32*, solicitando atualizações periódicas dos valores medidos.

A implementação utiliza o modelo de *event loop* (laço) do *JavaScript* para gerenciar múltiplas operações concorrentes, como atualizações de interface, comunicação com o servidor e tratamento de eventos do usuário. A capacidade de manipulação dinâmica do *DOM* (*Document Object Model*) permite a atualização

seletiva dos elementos da interface, mostrando os valores de tensão, corrente, potência e energia de forma clara e organizada.

2.3.3 HTML e CSS

A linguagem *HTML5* constitui a base estrutural da interface *web*, proporcionando elementos semânticos que organizam o conteúdo de maneira lógica e acessível. Através de *tags* específicas como `<section>`, `<article>` e `<main>`, cria-se uma estrutura hierárquica que melhora tanto a experiência do usuário quanto a indexação por mecanismos de busca. A incorporação de *meta tags* de *viewport* garante a responsividade da interface *across* diferentes dispositivos e tamanhos de tela.

Complementarmente, o *CSS3* é empregado para estilização e *layout* da interface, implementando um *design system* baseado em variáveis *CSS* que facilita a manutenção e consistência visual. Técnicas modernas como *Flexbox* são utilizadas para criar *layouts* adaptativos, enquanto transições e animações suaves melhoram a experiência do usuário durante as atualizações dos valores medidos. A separação entre estrutura (*HTML*), apresentação (*CSS*) e comportamento (*JavaScript*) segue as melhores práticas de desenvolvimento *web front-end*.

2.3.4 Protocolo HTTP e formato JSON

A comunicação entre o *client-side* (navegador) e o *server-side* (*ESP32*) é estabelecida através do protocolo *HTTP*, seguindo os princípios arquiteturais *REST*. O formato *JSON* (*JavaScript Object Notation*) é adotado para serialização dos dados devido à sua leveza, legibilidade e suporte nativo em *JavaScript*. A cada requisição, o servidor embarcado no *ESP32* coleta os valores atualizados dos sensores, estrutura-os em um documento *JSON* e os transmite via resposta *HTTP*.

Esta abordagem permite uma arquitetura desacoplada onde o *front-end* e *back-end* evoluem independentemente, desde que mantido o contrato de interface estabelecido pelo formato *JSON*. A natureza *stateless* do protocolo *HTTP* simplifica a implementação do servidor no *ESP32*, que precisa apenas processar requisições individuais sem manter estado entre conexões.

2.4 Protocolo de comunicação SPI

O *Serial Peripheral Interface (SPI)* é um protocolo de comunicação síncrono serial amplamente utilizado em sistemas embarcados para comunicação de curta distância entre microcontroladores e periféricos. Desenvolvido inicialmente pela *Motorola* na década de 1980, o *SPI* destaca-se pela sua simplicidade, alta velocidade e eficiência na transferência de dados, características que o tornam ideal para aplicações que exigem comunicação em tempo real.

O *SPI* opera em uma arquitetura mestre-escravo, onde um dispositivo mestre controla a comunicação com um ou mais dispositivos escravos. A comunicação é estabelecida através de quatro linhas de sinal essenciais:

- *MOSI (Master Out Slave In)*: Linha de dados do mestre para o escravo
- *MISO (Master In Slave Out)*: Linha de dados do escravo para o mestre
- *SCK (Serial Clock)*: Sinal de clock gerado pelo mestre
- *SS/CS (Slave Select/Chip Select)*: Sinal de seleção de escravo

O protocolo *SPI* é fundamentalmente síncrono, permitindo que a transmissão de dados seja coordenada por um sinal de *clock* gerado exclusivamente pelo dispositivo mestre. Esta característica elimina a necessidade de circuitos de geração de *baud rate* complexos e permite alcançar velocidades de transmissão significativamente superiores às obtidas com protocolos assíncronos como *UART*.

A comunicação inicia-se quando o mestre ativa a linha *SS* do escravo desejado, levando-a para nível lógico baixo. Simultaneamente, o mestre inicia a geração do sinal de *clock (SCK)*. A cada pulso de *clock*, um bit é transferido do mestre para o escravo através da linha *MOSI* e, simultaneamente, um bit é transferido do escravo para o mestre através da linha *MISO*. Esta operação *full-duplex* permite transferência bidirecional de dados em tempo real.

2.5 Wifi

A comunicação *WiFi* para transmissão de dados de amostragem através de *sites web* em tempo real representa uma evolução significativa nos sistemas de aquisição e monitoramento de dados. Esta tecnologia permite a integração entre

sistemas embarcados e interfaces *web*, possibilitando o acesso remoto e em tempo real a informações críticas de processos industriais, sistemas de medição e monitoramento ambiental. A combinação de microcontroladores com capacidade *WiFi*, como o *ESP32* (ESP32, 2025), com tecnologias *web* modernas, revolucionou a forma como os dados são coletados, processados e disponibilizados.

O sistema de comunicação baseia-se em uma arquitetura cliente-servidor integrada, composta por três elementos principais:

- No microcontrolador (*ESP32*): Atua como servidor *web* embarcado, responsável pela aquisição dos dados dos sensores, processamento das amostras e disponibilização dos dados via protocolo *HTTP*.
- Cliente *Web* (Navegador): Interface do usuário que solicita e visualiza os dados através de uma página *web* responsiva.
- Rede *WiFi* Local: Infraestrutura de comunicação que permite a conectividade entre o nó sensor e os clientes.

O processo de comunicação inicia-se com a aquisição dos sinais analógicos provenientes dos sensores. O *ESP32* realiza a amostragem dos sinais de tensão e corrente, convertendo-os para valores digitais através de seu conversor analógico-digital (*ADC*). Os dados são então processados utilizando algoritmos específicos, como o cálculo de valores *RMS* para sinais alternados, e temporariamente armazenados em *buffers* de memória.

A comunicação *WiFi* para transmissão de dados via amostragem em *sites web* em tempo real representa um paradigma poderoso para sistemas de monitoramento modernos. A combinação de *hardware* embarcado acessível, como o *ESP32* (ESP32, 2025), com tecnologias *web* padrão, democratizou o acesso a sistemas de aquisição de dados profissionais, permitindo aplicações que anteriormente exigiam investimentos significativos em infraestrutura. Esta tecnologia continua a evoluir, prometendo ainda maior integração, inteligência e acessibilidade no futuro próximo.

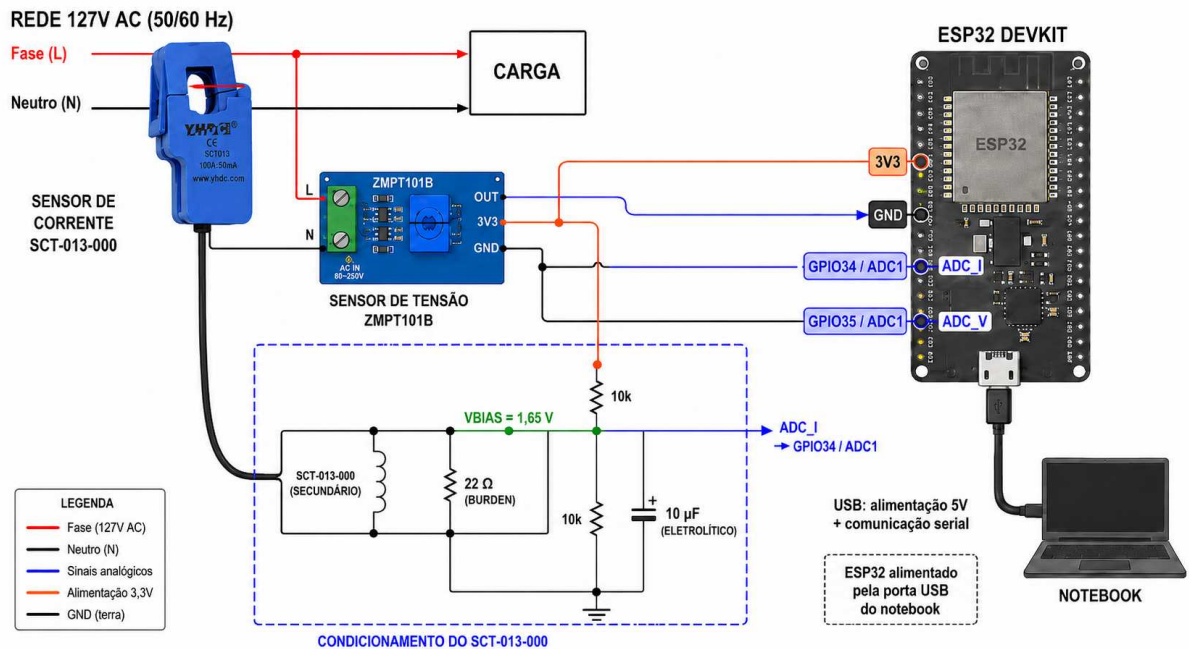
3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo descreve os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do protótipo de medidor de energia elétrica. Inicialmente, apresenta-se a arquitetura geral do sistema, contemplando os blocos de aquisição, condicionamento, processamento e comunicação dos dados. Em seguida, são detalhados os principais componentes de *hardware* empregados, incluindo os sensores SCT-013 e ZMPT101B, o microcontrolador ESP32-WROOM-32 e o circuito de condicionamento de sinais. Também são apresentados os *softwares* utilizados nas etapas de programação, simulação e projeto da placa de circuito impresso, bem como os procedimentos adotados para garantir a compatibilidade dos sinais elétricos com as entradas analógicas do microcontrolador.

Por fim, o capítulo estabelece a base metodológica para a construção e validação do protótipo, demonstrando como os recursos de *hardware* e *software* foram integrados para possibilitar a medição de tensão, corrente, potência e consumo de energia elétrica em tempo real.

Na Figura 4, é apresentada a conexão elétrica geral do protótipo, destacando a disposição dos principais componentes, o percurso da alimentação, a ligação da carga monitorada e o posicionamento dos sensores de tensão e corrente. A figura também evidencia a integração desses elementos com a placa de circuito impresso, composta pelo ESP32 e pelo circuito de condicionamento de sinais, permitindo compreender o fluxo de aquisição, processamento e transmissão dos dados medidos.

Figura 4 - Diagrama de Conexão



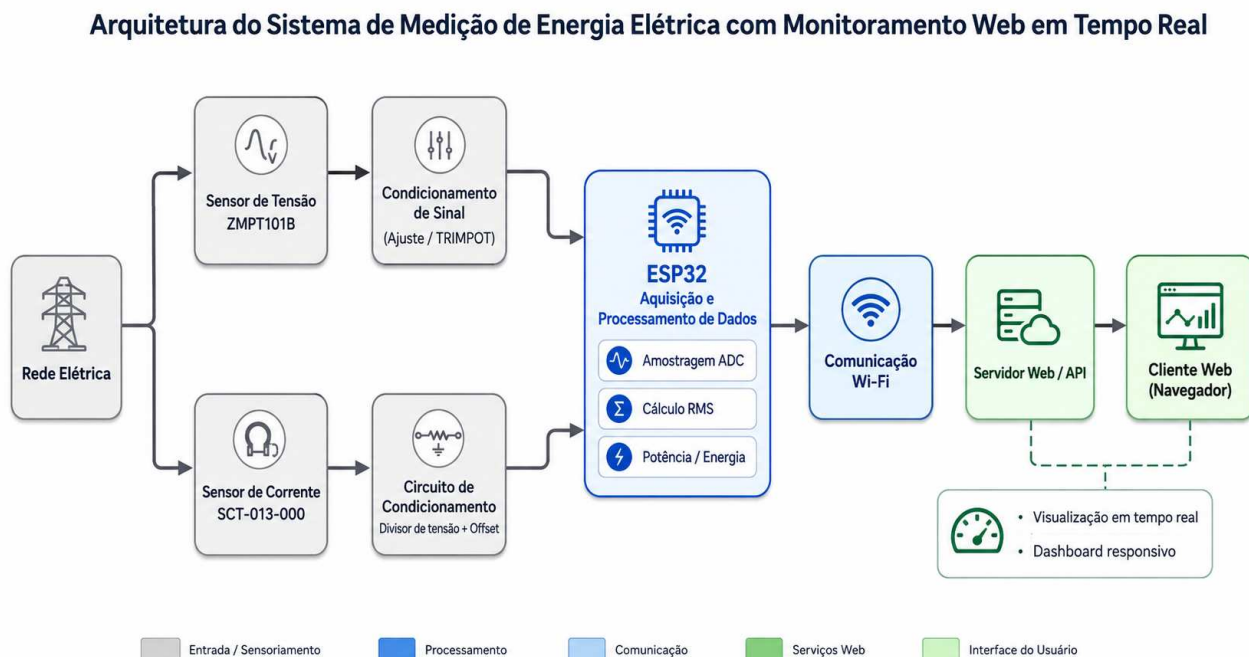
Fonte: Os Autores (2026)

3.1 Arquitetura proposta

A arquitetura do sistema foi concebida para ser modular, eficiente e de baixo custo, atendendo aos requisitos de um medidor de energia inteligente. O coração do sistema é o microcontrolador ESP32, 2025, selecionado por sua capacidade de processamento *dual-core*, conectividade *Wi-Fi* integrada e periféricos analógicos e digitais adequados para a aplicação.

O fluxo de dados inicia-se com os sensores: o sensor de corrente SCT-013, 2025, do tipo *split-core transformer*, e o sensor de tensão ZMPT101B, 2025, um módulo baseado em transformador de potencial. Os sinais analógicos provenientes destes sensores são condicionados para operarem na faixa de 0 a 3,3V, compatível com as entradas do ADC (Conversor Analógico-Digital) do ESP32. Após a aquisição, os dados são processados digitalmente para o cálculo de parâmetros elétricos (tensão, corrente, potência ativa, energia consumida, fator de potência, etc.). Por fim, os resultados são transmitidos via *Wi-Fi* para um servidor *web* local, que exibe as informações em uma interface gráfica em tempo real, acessível por qualquer dispositivo conectado à mesma rede.

Figura 5 - Diagrama de Arquitetura de Protótipo



Fonte: Os Autores (2026)

3.2 Hardware

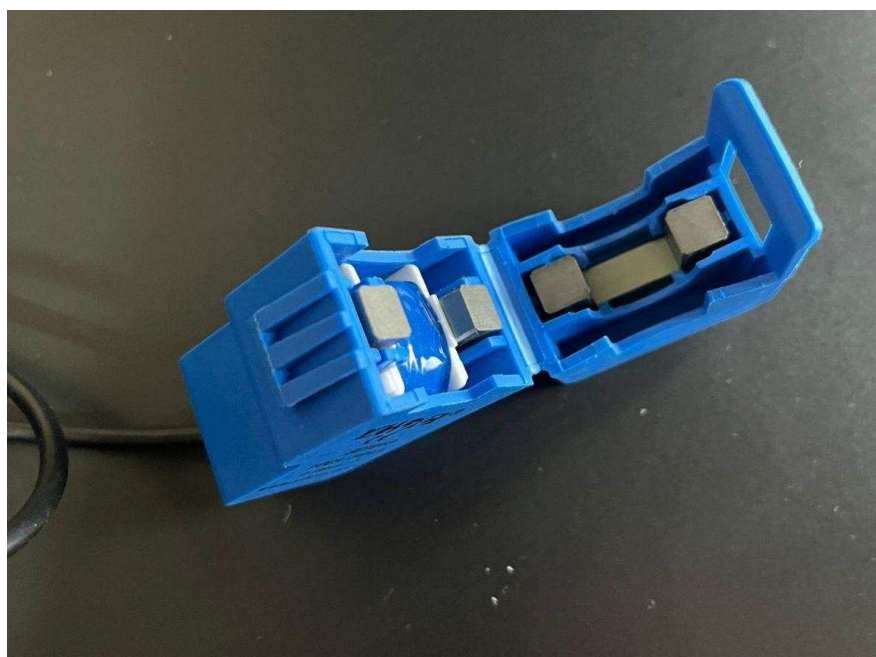
A síntese do medidor de energia, exigiu a especificação de componentes eletrônicos que asseguram precisão metrológica, confiabilidade operacional em regime contínuo e capacidades de conectividade. Para atender a esses requisitos, a arquitetura de *hardware* foi concebida com base em três módulos fundamentais: um sensor de corrente não invasivo baseado no efeito Hall SCT-013-000 SCT-013 (2025), um módulo sensor de tensão baseado em transformador de potencial ZMPT101B (2025) e uma unidade de processamento e comunicação ESP32-WROOM-32 ESP32 (2025), que integra um sistema microcontrolado com interface *Wi-Fi*. A sinergia entre esses subsistemas constitui a base da plataforma proposta para aquisição, processamento e monitoramento remoto dos parâmetros elétricos.

3.2.1 Sensor de corrente SCT-013-000

Para a aquisição da grandeza corrente elétrica no medidor de energia proposto, foi selecionado o sensor de efeito Hall (SCT-013 ,2025). Este componente se caracteriza como um sensor de corrente indutivo, de núcleo aberto (*split-core*),

que opera sob o princípio do transformador de corrente (TC), permitindo medições não invasivas e seguras, pois não requer a interrupção do condutor sob medição. A figura 6 ilustra o sensor sem sua proteção, e mostra que é composto por um núcleo de ferrite, um enrolamento de 200 espiras no secundário e um diodo *TVS* para proteção de sobretensão na saída, assim, fornecendo segurança na transformação de corrente CA para tensão e leitura.

Figura 6 - Partes Internas do SCT-013



Fonte: Os Autores (2026)

O princípio de funcionamento baseia-se na Lei de Ampère e na conversão indireta do campo magnético gerado pela corrente que circula no condutor. A corrente alternada (AC) a ser medida, fluindo pelo condutor principal, gera um campo magnético alternado proporcional. Este campo é concentrado pelo núcleo de ferrite de alta permeabilidade do sensor e, por meio de um sensor Hall interno, é convertido em uma tensão de saída proporcional. O circuito interno do módulo realiza o condicionamento deste sinal, fornecendo uma forma de onda de tensão em valor de pico (V_p) que pode ser diretamente amostrada por um conversor analógico-digital (ADC).

A Figura 6 ilustra o sensor de corrente em sua configuração completa. Observa-se sua estrutura com abertura, projetada com um encaixe que permite envolver o condutor para realização da medição. Ressalta-se que, para uma aquisição de dados correta, é fundamental que o sensor envolva apenas um

condutor. A inclusão de dois ou mais condutores na mesma abertura resulta na anulação mútua de seus campos magnéticos, devido à natureza vetorial do fenômeno, o que gera uma leitura imprecisa ou nula.

Quanto à interface de conexão, o sensor possui originalmente um conector *P2* para a transmissão do sinal de tensão de saída. No presente projeto, optou-se pela remoção deste conector, aproveitando-se os dois condutores subjacentes para a saída de dados. Estes condutores foram, subsequentemente, conectados a um borne de duas vias, que serve como interface física para a ligação com o sistema de aquisição de dados.

Figura 7 - Sensor SCT-013



Fonte: Os Autores (2026)

O modelo SCT-013-000 SCT-013 (2025) possui uma relação de transformação específica, projetada para uma corrente de leitura nominal de 100 A (*RMS*) e uma tensão de saída nominal (*Vout*) de 1 V. Portanto, a corrente de pico pode ser definida através da seguinte equação:

$$I_p = \sqrt{2} * I_{rms} \quad (1)$$

Onde:

- I_p = Corrente de pico.
- I_{rms} = Máxima corrente quadrática média de medição.

Assim, temos o seguinte:

$$I_p = \sqrt{2} * 100 \quad (2)$$

$$I_p = 141,4 \text{ A} \quad (3)$$

Portanto, tem-se um limite de medição de corrente de pico $I_p = 141,4 \text{ A}$.

Como mostra a tabela 1, para a corrente nominal de 100 A (*RMS*), o sensor fornece uma tensão de saída de 1 V. A sensibilidade do sensor é, portanto, de 100 A/V ou 50 mV/A. Por exemplo, uma corrente de 50 A no condutor primário resultará em uma tensão de saída de aproximadamente 0,5 V.

Tabela 1 - Características sensor SCT-013-000

Parâmetro	Valor	Unidade
Corrente Nominal (I_p)	100	A (RMS)
Tensão de Saída Nominal (V_{out})	1	V (RMS)
Relação de Transformação	100:01:00.000	A/A
Sensibilidade	50	mV/A
Faixa de Corrente de Operação	0 a 100	A
Frequência de Operação	50/60	Hz
Acurácia	±1%	-
Linearidade	≤0.2%	-

Fonte: rhydolabz (2025)

Para integrar este sensor a um microcontrolador, como o ESP32, que possui ADCs com uma tensão de entrada positiva máxima tipicamente de 3,3 V, é imperativo o uso de um circuito de condicionamento de sinal.

Este circuito consiste em um divisor resistivo e um circuito somador para adicionar um *offset* de 1,65 V (metade de 3,3 V), convertendo a saída bipolar do sensor (que oscila em torno de 0 V) para um sinal unipolar compatível com a faixa de leitura do ADC (0 a 3,3 V). O circuito de condicionamento de sinal será explicado no tópico 3.2.2.

3.2.2 Circuito divisor de tensão

O sensor SCT-013 é um transformador de corrente que fornece em sua saída uma corrente alternada (CA) proporcional à corrente que flui pelo condutor monitorado. Como o ESP32 só pode ler tensões positivas em seu ADC (0 a 3,3V), foi necessário condicionar este sinal.

Conforme seção anterior, sabemos que a corrente de pico máxima medida é de 141,4A. Considerando uma corrente de 100A no primário, essa produzirá 50mA no secundário. Desta forma chegamos ao número de espiras do secundário com a seguinte equação:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (4)$$

Onde:

- I_1 = corrente no primário (corrente a ser medida);
- I_2 = corrente no secundário;
- N_1 = número de voltas do primário (No sensor SCT-013, temos que $N_1=1$ (SCT-013,2025));
- N_2 = número de voltas do secundário.

Logo:

$$N_2 = \frac{100}{0,05} \quad (5)$$

$$N_2 = 2000 \quad (6)$$

A lei de Faraday nos diz que corrente na saída do sensor é inversamente proporcional ao número de voltas, deste modo, considerando uma corrente de pico de 141,4A no primário, podemos encontrar a corrente no secundário utilizando a seguinte equação:

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{N} \quad (7)$$

$$I_{out} = \frac{141,4}{2000} \quad (8)$$

$$I_{out} = 0,0707 \text{ A} \quad (9)$$

Considerando um sinal de saída de corrente do sensor com forma de onda senoidal e amplitude de $\pm 0,0707 \text{ A}$ (valor de pico), e sabendo que o sensor opera como uma fonte de corrente que gera uma tensão proporcional em seus terminais de saída, torna-se necessário condicionar este sinal para que esteja dentro da faixa de tensão de entrada admitida pelo microcontrolador ESP32, 2025, que é de 0 a 3,3 V.

Para este fim, dimensiona-se um resistor de carga, o qual é calculado pela seguinte equação:

$$R_{carga} = \frac{\frac{V_{rm}}{2}}{I_{pico}} \quad (10)$$

$$R_{carga} = \frac{\frac{3,3}{2}}{0,0707} \quad (11)$$

$$R_{carga} = 23,3345 \Omega \quad (12)$$

Onde:

- V_{rm} = Tensão máxima de entrada do microcontrolador;
- R_{carga} = Resistência de carga;

Através da equação (10), obtém-se o valor teórico ideal para a resistência de carga. Contudo, é necessário ajustar este valor para um valor comercial disponível e, estrategicamente, selecionar um componente de valor inferior ao calculado para assegurar que a tensão de saída não exceda os limites do microcontrolador, prevenindo a saturação ou danos ao circuito analógico do *ESP32*. Dessa forma, o projeto optou pela utilização de um resistor de carga de 22Ω . Esta escolha garante uma margem de segurança adequada em relação à tensão de alimentação de 3,3 V do microcontrolador, mesmo sob condições de corrente de pico, assegurando a integridade do sistema de aquisição.

Para adaptar o sinal de tensão alternada (CA) de saída do sensor à janela de leitura de 0 a 3,3 V do conversor analógico-digital (ADC) do *ESP32* (2025), implementou-se um circuito de condicionamento baseado em um divisor de tensão e um circuito somador de *offset*.

O divisor de tensão é constituído por dois resistores de valores iguais ($R1 = 10\text{ k}\Omega$ e $R2 = 10\text{ k}\Omega$), conectados entre o barramento de 3,3 V e o terra (*GND*). Esta configuração estabelece uma tensão de referência de 1,65 V ($V_{cc}/2$) em seu ponto central. Esta tensão é utilizada como um nível de polarização (*offset*).

Posteriormente, este *offset* é inserido no sinal CA proveniente do sensor através de um resistor. Esta etapa tem a função de "elevar" o nível DC médio do sinal CA, fazendo com que a forma de onda, que originalmente oscilava em torno de 0 V, passe a oscilar em torno do valor de referência de 1,65 V.

Dessa forma, o ponto de operação do sistema é definido da seguinte maneira:

- Quando a corrente medida é zero, a tensão presente no pino do ADC é de 1,65 V.
- Durante os semiciclos positivos da corrente, a tensão no pino do ADC eleva-se, podendo atingir até 3,3 V.
- Durante os semiciclos negativos, a tensão reduz-se, podendo atingir até 0 V.

Esta configuração permite que o microcontrolador digitalize corretamente ambos os semiciclos da forma de onda CA. Adicionalmente, um capacitor de acoplamento é utilizado entre o circuito sensor e o ponto de inserção do *offset*. Este componente tem a função de isolar o nível DC do circuito sensor do circuito divisor, garantindo que apenas a componente alternada (CA) do sinal seja somada à tensão de polarização de 1,65 V.

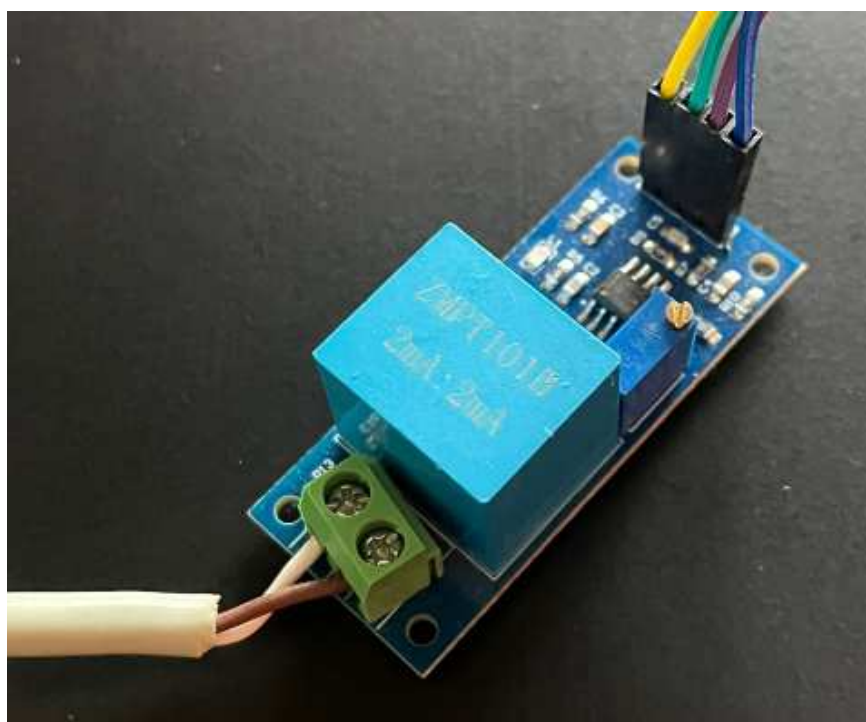
3.2.3 Sensor de tensão ZMP101B

Para a aquisição da grandeza tensão elétrica no protótipo do medidor de energia, foi empregado o módulo ZMPT101B. Este componente é um sensor de tensão alternada (AC) que se baseia em um transformador de potencial (TP) de

precisão, provido de circuitos integrados para condicionamento de sinal, oferecendo uma interface prática e segura para microcontroladores.

O princípio de funcionamento do módulo tem como elemento central o transformador ZMPT101B, que realiza o isolamento galvânico entre o circuito de alta tensão (lado primário) e o circuito de baixa tensão do microcontrolador (lado secundário), sendo este um requisito de segurança fundamental. O transformador reduz a amplitude da tensão da rede elétrica (por exemplo, 127V ou 220V *RMS*) para um nível compatível com circuitos eletrônicos de baixa tensão. A saída do transformador, que é uma réplica em baixa tensão da forma de onda de entrada, é então condicionada por um circuito baseado no amplificador operacional *LM358*.

Figura 8 - Sensor ZMP101B



Fonte: Os Autores (2026)

Este circuito de condicionamento realiza funções primordiais:

1. **Amplificação/Atenuação:** Um potenciômetro presente no módulo permite ajustar o ganho, calibrando a sensibilidade do sensor para diferentes faixas de tensão de entrada.
2. **Offset para Leitura em ADC:** O circuito adiciona um nível *DC* (*offset*) de, tipicamente, 2,5 V ao sinal AC. Esta etapa é crucial para deslocar o sinal bipolar

(que oscila simetricamente em torno de 0V) para a faixa unipolar de 0 a 5V (ou 0 a 3,3 V dependendo da configuração), permitindo sua digitalização integral por um Conversor Analógico-Digital (ADC) de um microcontrolador.

3. A tensão de saída final (V_{out}) do módulo é, portanto, uma senoide centrada em 2,5 V (ou 1,65V) cuja amplitude é proporcional à tensão de entrada da rede. Para obter o valor da tensão medida, o microcontrolador deve mostrar este sinal, remover o *offset* digitalmente e calcular seu valor *RMS*.

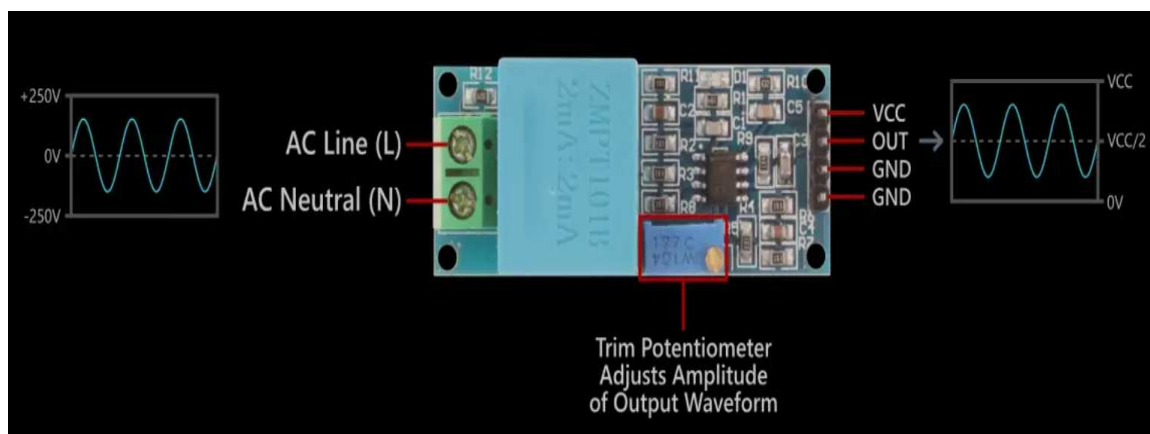
Tabela 2 - Características sensor ZMPT101B

Parâmetro	Valor / Característica	Unidade
Tensão de Entrada Nominal (Rede)	0 - 250 (Ajustável via ganho)	V (AC)
Tensão de Saída (Pico)	0 - 5 (ou 3.3)	V (DC)
Tensão de Offset de Saída	~2.5	V (DC)
Tensão de Operação do Módulo	5	V (DC)
Frequência de Operação	50/60	Hz
Isolamento Galvânico	Sim (via Transformador)	-
Componente Principal	Transformador ZMPT101B + CI LM358	-

Fonte: Datasheet ZMPT101B (2026)

Considerando uma saída nominal de 0 a 5V para leitura de tensão, a calibração do regulador de tensão *LM35* foi feita através do potenciômetro *Trimpot*, no qual regulou-se para que se tivesse uma saída de tensão de 3,3V, e assim, sendo compatível com a tensão de entrada nas *GPIOs* do *ESP32* e possibilitando a leitura de tensão de forma correta e precisa.

Figura 9 - Pinout ZMPT101B



Fonte: Data Capture Control (2025)

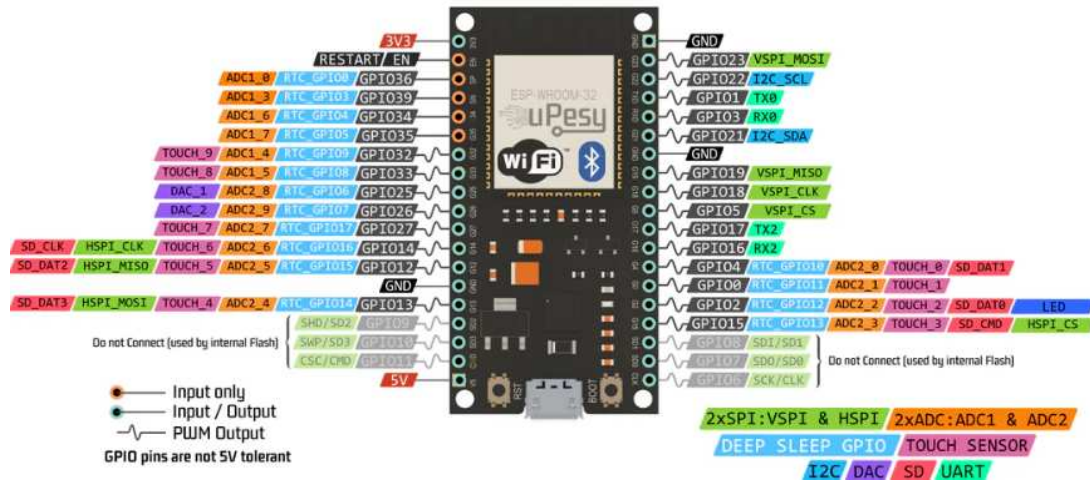
A seleção do módulo *ZMPT101B* para o protótipo justifica-se por suas características que atendem aos requisitos de segurança, funcionalidade e custo. O isolamento galvânico intrínseco ao transformador é uma característica crítica, pois protege o circuito de baixa tensão (Microcontrolador ESP32) de transientes e falhas no lado da rede elétrica. A saída já condicionada simplifica significativamente o projeto da interface de aquisição, integrando as etapas de redução, isolamento e ajuste de nível em um único módulo. Ademais, a possibilidade de calibração via *software*, correlacionando a leitura do *ADC* com o valor real da tensão da rede, permite compensar eventuais imprecisões e assegurar a precisão metrológica necessária para um medidor de energia, em conjunto com o sensor de corrente *SCT-013*.

3.2.4 Microcontrolador ESP32-WROOM

Para atuar como o núcleo de processamento, aquisição de dados e interface de comunicação do medidor de energia proposto, foi selecionado o módulo ESP32-WROOM ESP32, 2025. Este módulo integra o sistema em *chip* (SoC) *ESP32-D0WDQ6* da *Espressif Systems*, encapsulando-o em uma forma física robusta e pronta para implementação, com 38 pinos de conexão que fornecem acesso a suas diversas periféricas, como mostra detalhadamente a figura 09.

Figura 10 - Pinout ESP32-WROOM

ESP32 Wroom DevKit Full Pinout



Fonte: upesy (2025)

O coração do módulo é um microcontrolador *dual-core Xtensa® LX6*, operando em frequências de até 240 MHz. Esta arquitetura de duplo núcleo confere a capacidade de alocar tarefas críticas, como a amostragem e o cálculo em tempo real dos parâmetros elétricos (tensão, corrente e potência), em um núcleo, enquanto o outro núcleo gerencia as operações de comunicação e interface com o servidor *web*, garantindo a concorrência e a responsividade do sistema.

Tabela 3 - Características ESP32-WROOM

Parâmetro	Especificação
Microcontrolador	ESP32-D0WDQ6 (Dual-Core)
Frequência de Clock	Ajustável, até 240 MHz
Memória RAM	520 KB SRAM
Memória Flash	4 MB integrada ao módulo
Interface Wi-Fi	802.11 b/g/n (2.4 GHz)
Interface Bluetooth	Classic e BLE 4.2
Resolução do ADC	12 bits (18 Canais)
Tensão de Operação	3.0 V a 3.6 V
Portas de I/O	38 pinos (GPIO, UART, SPI, I ² C, PWM)

Fonte: Espressif (2025)

A seleção do módulo ESP32-WROOM é estrategicamente justificada pela sua convergência de capacidades essenciais para um medidor de energia inteligente: poder de processamento para cálculos em tempo real, capacidade de aquisição analógica nativa para interface direta com os sensores e, de forma mais crítica, conectividade *Wi-Fi* integrada. Esta combinação elimina a necessidade de componentes externos adicionais, como um *shield* de comunicação, resultando em uma solução compacta, de baixo custo e energeticamente eficiente. A robustez do módulo e sua vasta adoção no mercado garantem acesso a um sistema sólido de ferramentas de desenvolvimento, agilizando o processo de prototipagem e implementação do *firmware* para aquisição, processamento e transmissão dos dados para a interface *web* em tempo real.

3.3 Software

O *software* desenvolvido constitui o núcleo inteligente do protótipo, sendo responsável por orquestrar a aquisição de dados, o processamento digital de sinais, o cálculo de parâmetros elétricos e a disponibilização das informações em tempo real. A arquitetura de *software* foi dividida em duas camadas principais: o *firmware* embarcado no microcontrolador *ESP32*, que executa as tarefas de baixo nível, e a interface *web*, que proporciona a visualização e interação com o usuário final.

3.3.1 Visual Studio Code

O *Visual Studio Code* (VSCode) é um editor de código-fonte de código aberto desenvolvido pela *Microsoft*. Sua principal característica é a arquitetura modular, baseada em um núcleo leve que pode ser enormemente expandido através de extensões. Isso o transforma de um editor simples em um *IDE* completo e personalizável para praticamente qualquer linguagem de programação ou *framework*.

A adoção do *Visual Studio Code* representa mais do que a escolha de uma ferramenta; é a adoção de uma metodologia de desenvolvimento moderna e integrada. Ele fornece um ambiente unificado e profissional com excelência em todas as fases de desenvolvimento de *software* do protótipo: desde a programação

de baixo nível do microcontrolador (via *PlatformIO*) até a criação da interface *web* e a documentação acadêmica.

Sua natureza extensível, o forte ecossistema de extensões e a integração com ferramentas de controle de versão e linha de comando, alinham-se perfeitamente às necessidades de um projeto de engenharia que exige precisão, organização e reprodutibilidade. O uso do *VSCode*, portanto, não só aumenta a produtividade do desenvolvedor, mas também agrega valor e robustez metodológica ao trabalho, refletindo as práticas utilizadas atualmente no mercado de tecnologia e engenharia.

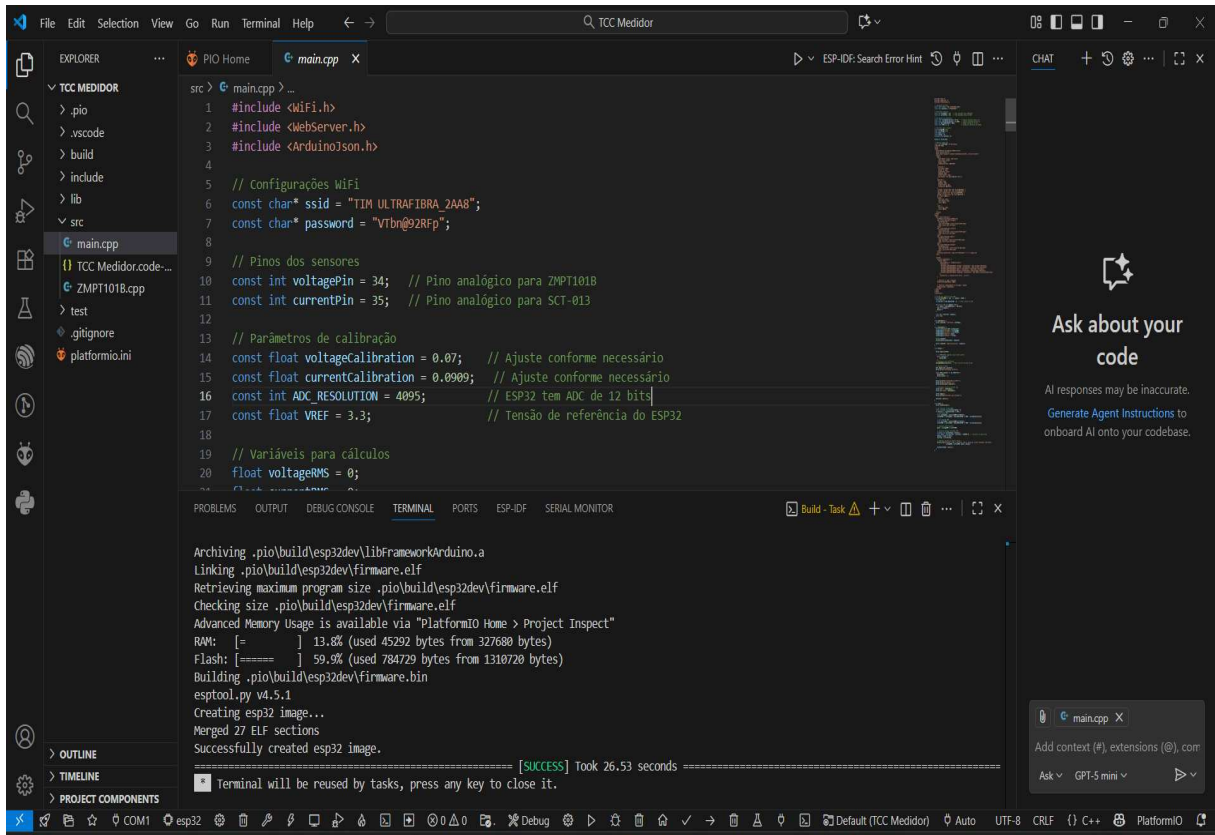
3.3.2 Platform IO

Para o desenvolvimento do *firmware* do medidor inteligente, foi utilizado o *PlatformIO*, um ambiente de desenvolvimento profissional integrado ao *Visual Studio Code*. Esta ferramenta foi essencial para gerenciar todo o ciclo de vida do *software*, desde a codificação até o *upload* para o microcontrolador. A *PlatformIO* simplificou significativamente o processo de desenvolvimento através de seu sistema de gerenciamento de bibliotecas, controle de dependências e ferramentas de *debug* integradas.

A implementação do *software* foi realizada integralmente na linguagem C++, seguindo os princípios de programação orientada a objetos para criar uma arquitetura modular e organizada como demonstra a figura 10.

Através da *PlatformIO*, todo o código foi integrado e compilado para o ESP32-WROOM-32, aproveitando as bibliotecas do *ESP-IDF* (*Espressif IoT Development Framework*) para acesso aos periféricos de *hardware* e funcionalidades de rede. A plataforma também permitiu a implementação robusta da comunicação com o *site* desenvolvido, utilizando bibliotecas especializadas para protocolos *HTTP/HTTPS* e *MQTT*. O *firmware* envia os dados de consumo energético para uma *API REST* personalizada, enquanto recebe comandos de configuração em tempo real, criando um sistema bidirecional completo entre o *hardware* e a plataforma *web*. Esta abordagem proporcionou um ambiente de desenvolvimento eficiente, permitindo a criação de um *firmware* confiável e de alto desempenho, totalmente integrado com a infraestrutura *web* do projeto.

Figura 11 - Interface PlatformIO



Fonte: Os Autores (2025)

3.3.3 Fusion 360

Para o desenvolvimento físico do medidor de energia inteligente, utilizou-se a plataforma *Autodesk Fusion 360*, que proporcionou um ambiente integrado para modelagem 3D, projeto eletrônico e *design* de PCB. Esta ferramenta permitiu a criação de um projeto completo e coeso, desde a concepção dos componentes até a definição do *layout* da placa de circuito impresso.

Foram modelados tridimensionalmente todos os componentes do sistema, incluindo:

- Caracterização dimensional do ESP32-WROOM-32, sensores SCT-013-050 e ZMPT101B
- Modelagem dos componentes em 3D
- Simulação de montagem para verificação de interferências e garantia de compatibilidade mecânica

No ambiente de Projeto Eletrônico, desenvolveu-se:

- Esquemático completo do circuito, definindo as conexões entre microcontrolador, sensores e circuitos de condicionamento de sinal
- Layout da PCB com roteamento otimizado de trilhas, considerando critérios de isolamento e compatibilidade eletromagnética

Uma contribuição fundamental do *Fusion 360* foi a extração precisa das dimensões físicas da placa, permitindo determinar o formato final para o medidor. Esta definição dimensional foi crucial para projetar o invólucro protetor com tolerâncias adequadas e planejar a disposição dos componentes.

A integração entre os módulos de projeto garantiu que todas as partes do sistema fossem desenvolvidas de forma sincronizada, resultando em um projeto final coeso e funcional, pronto para prototipagem e fabricação que será realizada através do método de fresagem em uma placa de fenolite e cobre.

3.3.4 LTSpice

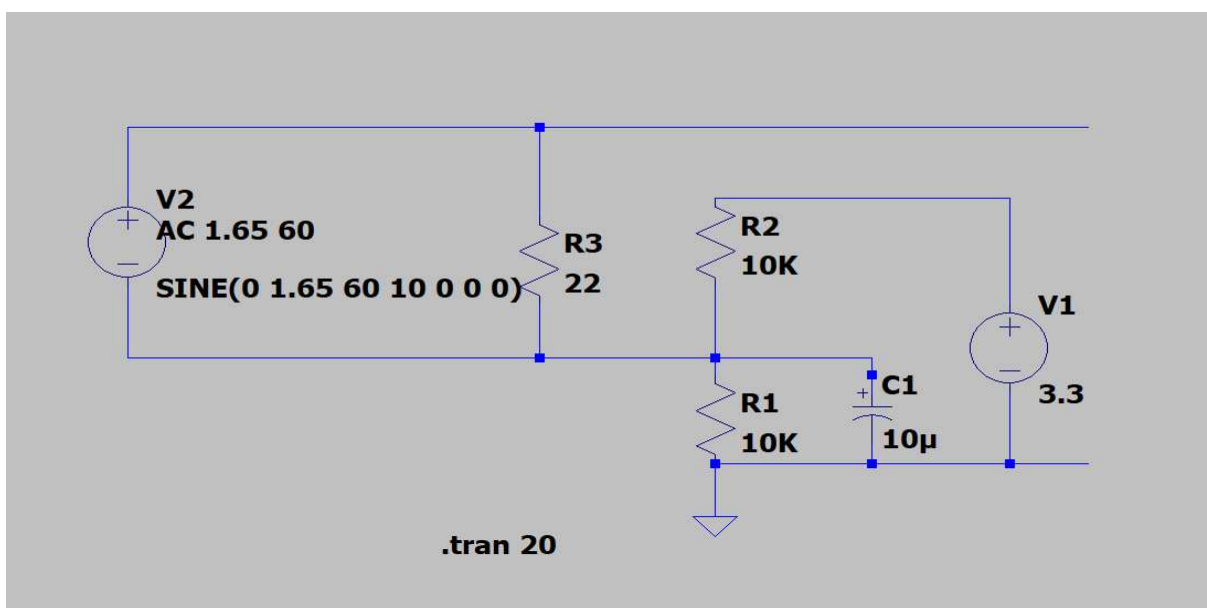
No desenvolvimento do protótipo de medição de energia elétrica, a fase de projeto e validação dos circuitos analógicos de condicionamento de sinal revelou-se crítica para garantir a precisão e confiabilidade do sistema. Para esta etapa fundamental, foi utilizado o *software LTspice*, uma ferramenta de simulação de circuitos eletrônicos baseada na linguagem *SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)*. Desenvolvido pela *Analog Devices*, o *LTspice* destaca-se por seu robusto *motor de simulação* e vasta biblioteca de modelos de componentes, sendo amplamente reconhecido tanto na indústria quanto no meio acadêmico para a análise e projeto de circuitos analógicos.

A aplicação específica do *LTspice* neste trabalho concentrou-se no projeto de um circuito de condicionamento para o sensor de corrente *SCT-013* RATED INPUT CURRENT, 2025. Este sensor, do tipo transformador de corrente, fornece como saída um sinal de tensão alternada centrado em zero volts. No entanto, o conversor analógico-digital (ADC) integrado ao microcontrolador *ESP32* *ESP32 DATASHEET*, 2025, que é o núcleo de processamento do protótipo, opera exclusivamente com tensões positivas, em uma faixa de 0 a 3,3 volts. Sem um circuito adequado, os semiciclos negativos do sinal do sensor seriam truncados,

resultando em uma medição de corrente incorreta e comprometendo todo o cálculo de potência e energia.

Para resolver essa incompatibilidade, foi projetado no *LTspice* um circuito divisor de tensão com a função de adicionar um *offset* (deslocamento) de nível *DC* ao sinal alternado do sensor. O objetivo era deslocar a forma de onda original, que oscilava simetricamente acima e abaixo de 0V, para uma nova faixa dinâmica que se situa inteiramente dentro da janela de operação do *ADC* do *ESP32*. A simulação permitiu visualizar a forma de onda de entrada como mostra a figura 16, proveniente do sensor, e a forma de onda de saída, já com o *offset* aplicado, confirmando visual e numericamente que o sinal condicionado permanecia entre os limites de 0V e 3,3V em todos os instantes do ciclo. Os detalhes do circuito simulado e montado estão no tópico 3.2.2.

Figura 12 - Simulação de Divisor de Tensão



Fonte: Os Autores (2025)

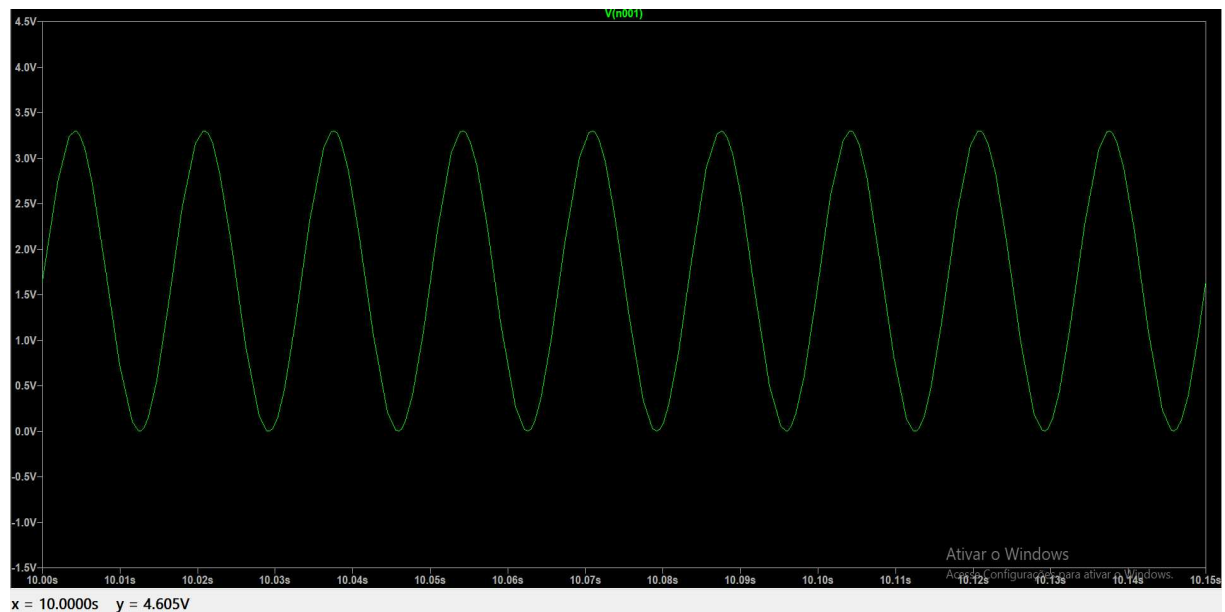
Na figura 11 visualiza-se o circuito montado para validar o circuito de condicionamento proposto, realizou-se uma simulação eletrônica. A montagem do circuito virtual empregou os seguintes componentes:

- 1 resistor de 22 Ω : Representando o resistor de carga.

- 2 resistores de 10 k Ω : Constituindo o divisor de tensão para geração do offset.
- 1 capacitor de 10 μ F: Atuando como capacitor de acoplamento para isolamento *DC/AC*.
- 2 fontes de tensão independentes:
- Uma fonte de tensão alternada (CA), configurada para simular o sinal de saída do sensor de corrente SCT-013.
- Uma fonte de tensão contínua (CC) de 3,3 V, simulando o barramento de alimentação do microcontrolador ESP32.

O procedimento de simulação consistiu na medição da tensão de saída do circuito de condicionamento. Esta leitura foi efetuada entre o terminal de terra (*GND*) e o nó de sinal, localizado após a passagem do sinal pelo sensor simulado, pelo resistor de carga e pelo estágio do divisor de tensão com o capacitor de acoplamento. Como a figura 12 nos mostra, esta medição permitiu a verificação da forma de onda condicionada, garantindo sua adequação à faixa de entrada de 0 a 3,3 V do *ADC*.

Figura 13 - Simulação de Tensão de Saída do Divisor de Tensão



Fonte: Os Autores (2025)

4 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Este capítulo detalha as etapas de concepção, implementação e integração do protótipo do medidor de energia elétrica inteligente. Aborda-se desde a arquitetura geral do sistema até os detalhes de *hardware* e *software*, incluindo a placa de circuito impresso, a programação do microcontrolador e do *website*, e o condicionamento de sinal para os sensores.

4.1 Placa de circuito impresso (PCI)

Para garantir robustez, confiabilidade e uma integração física compacta dos componentes, foi projetada uma Placa de Circuito Impresso (PCI) dedicada como mostra a figura 13 e 14. A PCI foi desenvolvida utilizando o *software Autodesk Fusion 360*, seguindo as melhores práticas de design para circuitos de baixa tensão e sinais analógicos.

Para roteamento de trilhas, foi utilizado 1,5mm para *GND* e 2mm para as demais conexões (alimentações e sinais). E espaçamento entre trilhas de 0,5mm.

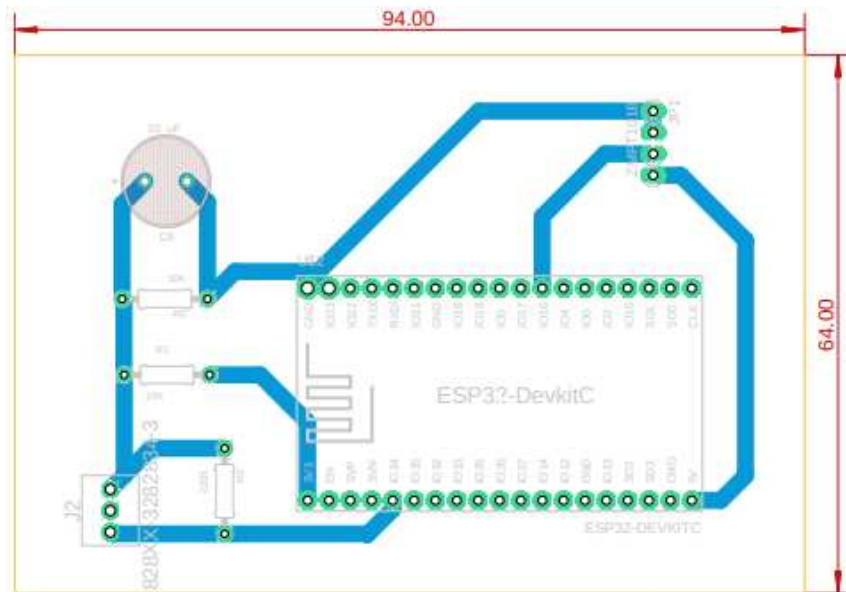
Para confecção da *PCI* foram utilizados os seguintes componentes:

- 1 ESP32-WROOM (38PINOS)
- 1 Conector fêmea tipo barra 4 pinos
- 4 Cabos flexíveis tipo jumper fêmea - fêmea
- 1 Borne KRE 2 vias
- 2 resistores de 10k OHMS (trocar por símbolo)
- 1 Resistor de 22 OHMs
- 1 Capacitor de 10 Microfaraday

O conector fêmea tipo barra de quatro pinos foi conectado com os quatro condutores tipo jumper para fazer a ligação do sensor de tensão ZMPT101B. A conexão dos sinais do sensor ficou disposta da seguinte maneira:

- 2 pinos de GND conectado na porta de *GND* do ESP32 (pino 38)
- Pino de saída de tensão (*OUT*) conectado na porta GPIO16 (pino 27)
- Pino de VCC conectado ao 5V do ESP32 (pino 19).

Figura 14 - Layout da PCI.

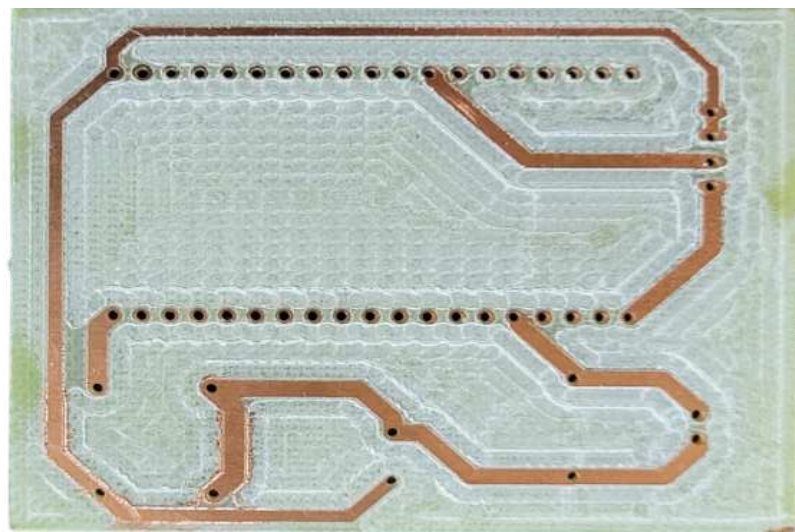


Fonte: Os Autores (2025)

Borne KRE 2 vias foi utilizado para conexão do sensor SCT-013, o sinal de saída passa pelo resistor de carga de 22 OHMS e vai para a porta GPIO34. O resistor de carga está conectado com o divisor de tensão para *offset* e um capacitor de 10 μ F para atenuação de tensão.

Os 2 resistores de 10k foram utilizados no circuito divisor de tensão para ajuste de *offset* (desvio) de sinal de corrente, o resistor R1 está conectado na porta de 3,3V para condicionamento de *offset*. O capacitor de 10 μ F foi utilizado para atenuação de tensão de saída do sensor SCT-013.

Figura 15 - Placa de Circuito Impresso.



Fonte: Os Autores (2025)

4.2 Programação

O código desenvolvido para o sistema de aquisição de dados de tensão e corrente implementa uma arquitetura de *software* embarcado que combina aquisição analógica, processamento digital de sinais e comunicação de rede. Desenvolvido em **C++** utilizando o *framework Arduino*, o *software* opera sobre o microcontrolador *ESP32*, aproveitando suas capacidades de processamento *dual-core* e conectividade *WiFi*.

A estrutura do programa segue o paradigma clássico de sistemas embarcados com as funções *setup()* e *loop()*. Na inicialização (*setup()*), o código configura os parâmetros fundamentais do sistema: estabelece a comunicação *serial* para *debug* e monitoramento, configura a resolução do conversor analógico-digital (*ADC*), inicializa a conexão *WiFi* com as credenciais fornecidas, e configura o servidor *web embarcado* com as rotas necessárias para atendimento das requisições *HTTP*. Esta fase inclui mecanismos de tolerância a falhas, com tentativas repetidas de conexão à rede *WiFi* e validação de sucesso antes de prosseguir.

O núcleo do sistema reside na função *loop()*, que implementa um esquema de execução contínua com temporização controlada. A aquisição dos dados dos sensores ocorre em intervalos regulares de 500 milissegundos, garantindo uma taxa de amostragem adequada para sinais de 50/60 Hz. Para cada ciclo de aquisição, o sistema realiza a leitura dos pinos analógicos conectados aos sensores de tensão *ZMPT101B* e corrente *SCT-013*. Os valores brutos do *ADC* são processados através de um algoritmo de cálculo *Root Mean Square (RMS)*, que implementa a fórmula matemática padrão para determinação de valores eficazes em sinais alternados. Este algoritmo realiza múltiplas amostras, 1000 por padrão para cada medição, calcula o quadrado de cada amostra, determina a média dos quadrados e extrai a raiz quadrada do resultado, aplicando posteriormente fatores de calibração específicos para cada sensor.

O processamento dos dados inclui o cálculo de parâmetros elétricos derivados. A potência aparente é calculada através do produto entre tensão e corrente RMS, enquanto o consumo energético é determinado pela integração

temporal da 58 potência ao longo do tempo de operação. O sistema mantém um contador acumulativo de energia consumida em *watt-hora*, atualizado a cada ciclo com base no tempo decorrido desde a última medição.

A comunicação em rede é implementada através de um servidor *web embarcado* que responde a duas rotas principais: a rota raiz ("/") que serve a página *HTML* completa da interface de usuário, e a rota *"/data"* que fornece os dados dos sensores em formato *JSON*. A geração das respostas *JSON* utiliza a biblioteca *ArduinoJson* para serialização eficiente dos dados, incluindo tensão, corrente, potência e energia consumida, com estrutura otimizada para consumo pela interface *web*.

O sistema incorpora técnicas de otimização para ambientes com recursos limitados, incluindo o uso de variáveis estáticas para minimizar alocações dinâmicas, *buffers* reutilizáveis para operações de *network*, e cálculo incremental para evitar processamento redundante. A gestão de memória é cuidadosamente controlada, com alocação estática de objetos *JSON* e reutilização de *buffers* de comunicação.

Para robustez operacional, o *código* inclui tratamento de desconexões *WiFi* com mecanismos de reconexão automática, validação de faixas de valores dos sensores para detecção de leituras inválidas, e temporização precisa para garantir a consistência temporal dos cálculos de energia. A calibração dos sensores é parametrizada através de constantes ajustáveis, permitindo a compensação de *ganhos* e *offsets* específicos de cada unidade de *hardware*.

O resultado é um sistema embarcado completo que performa aquisição precisa de grandezas elétricas, processamento em tempo real dos sinais capturados, e disponibilização remota dos dados através de interfaces *web* padrão, formando uma base sólida para aplicações de monitoramento energético e automação residencial ou industrial.

4.2.1 Desenvolvimento de *web* site

A interface *web* desenvolvida para o sistema de monitoramento implementa uma arquitetura *client-side* moderna que combina *HTML5* semântico, *CSS3* responsivo e *JavaScript* assíncrono para criar uma experiência de usuário eficiente e

intuitiva. A estrutura fundamental é construída em *HTML5*, utilizando elementos semânticos que organizam o conteúdo de forma lógica e acessível. A página é estruturada em seções distintas para cada grandeza elétrica monitorada, com *containers* dedicados para tensão, corrente, potência e energia consumida, cada um identificado semanticamente para melhor indexação e acessibilidade.

O *design* responsivo é alcançado através de *CSS3* avançado, implementando um sistema de *layout flexbox* que se adapta dinamicamente a diferentes tamanhos de tela e dispositivos. A estilização emprega variáveis *CSS* para manter consistência visual em todo o sistema, com esquema de cores baseado em princípios de *design* modernos que facilitam a interpretação rápida dos dados. Cada métrica é apresentada em *cards* visuais distintos com indicadores cromáticos laterais que permitem identificação imediata do parâmetro representado, enquanto tipografia clara e hierarquia visual adequada garantem legibilidade sob diversas condições de visualização.

A interatividade e atualização dinâmica são implementadas em *JavaScript vanilla*, sem dependência de *frameworks* externos, resultando em carregamento rápido e operação eficiente. O núcleo da lógica *client-side* baseia-se no padrão de programação assíncrona com *async/await*, utilizando a *API Fetch* para comunicação com o servidor embarcado no *ESP32* *ESP32 DATASHEET* (2025). O sistema estabelece um ciclo de atualização automática configurável, que periodicamente solicita dados atualizados ao servidor sem necessidade de recarregamento da página.

A manipulação do *Document Object Model (DOM)* é otimizada através de técnicas de atualização seletiva, onde apenas os elementos que apresentam mudanças são modificados, reduzindo o *overhead* computacional e proporcionando transições suaves entre estados. Os valores numéricos são formatados com precisão decimal consistente, e as unidades de medida são claramente associadas a cada grandeza, seguindo convenções padrão da engenharia elétrica.

O sistema de comunicação implementa um padrão *RESTful*, com o *client* solicitando dados através de requisições *HTTP GET* para o *endpoint* *"/data"* do servidor embarcado. Os dados são transferidos em formato *JSON*, proporcionando

uma estrutura leve e *parse* eficiente no lado do *client*. A interface inclui tratamento robusto de erros, com mecanismos para detectar falhas de comunicação, *timeouts* de rede e respostas inválidas, proporcionando *feedback* visual adequado ao usuário em condições de operação degradadas.

A temporização das atualizações é gerenciada através da função *setInterval()*, estabelecendo um ciclo fixo de *polling* que balanceia atualização oportuna dos dados com carga computacional no servidor embarcado. Cada atualização bem-sucedida inclui carimbo de tempo que reflete o momento da última aquisição, fornecendo transparência sobre a atualidade das informações apresentadas.

A arquitetura da interface separa claramente as responsabilidades entre estrutura (*HTML*), apresentação (*CSS*) e comportamento (*JavaScript*), seguindo as melhores práticas de desenvolvimento *web front-end*. Esta separação facilita a manutenção e evolução do sistema, permitindo modificações em cada camada sem impacto nas demais. O resultado é uma interface *web* responsiva, eficiente e intuitiva que transforma dados brutos de sensores em informações acionáveis para monitoramento e análise de parâmetros elétricos em tempo real.

4.3 Conexão do protótipo à rede elétrica

Para a conexão do protótipo à rede elétrica e a consequente realização das medições, faz-se necessário conectar a carga à rede de 127 V. O sensor de tensão ZMPT101B deve ser ligado em paralelo à alimentação da carga, de modo que se obtenha a medição de tensão no mesmo ponto de alimentação do dispositivo sob ensaio.

Para a leitura da corrente elétrica, o sensor SCT-013 deve ser entrelaçado em apenas uma das fases do cabo de conexão da carga medida. Este procedimento é essencial, pois o entrelaçamento de duas fases no mesmo sensor resulta na anulação mútua dos campos magnéticos gerados por cada condutor, inviabilizando a leitura correta da corrente. Portanto, a medição deve ser realizada em um único condutor fase para garantir a fidelidade dos dados adquiridos.

A figura 15 ilustra a conexão do protótipo à rede de 127V CA. O sensor de tensão ZMPT101B é conectado em paralelo à carga, entre fase e neutro. O sensor de corrente SCT-013 envolve apenas um condutor fase da carga para medição. Os sinais dos sensores passam por um circuito de condicionamento (resistor de 10 k Ω e capacitor de 10 μ F) e são direcionados à placa de aquisição ESP32, que processa os dados e os transmite via interface *web*. O terra (GND) é comum em todos os circuitos.

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a montagem final das partes do protótipo, interface do site *web* desenvolvido e os resultados de testes realizados e a análise gráfica dos respectivos resultados. Testes foram realizados em bancada medindo consumo energético de um eletrodoméstico, para comprovação e validação de dados obtidos com o protótipo, utilizou-se o alicate

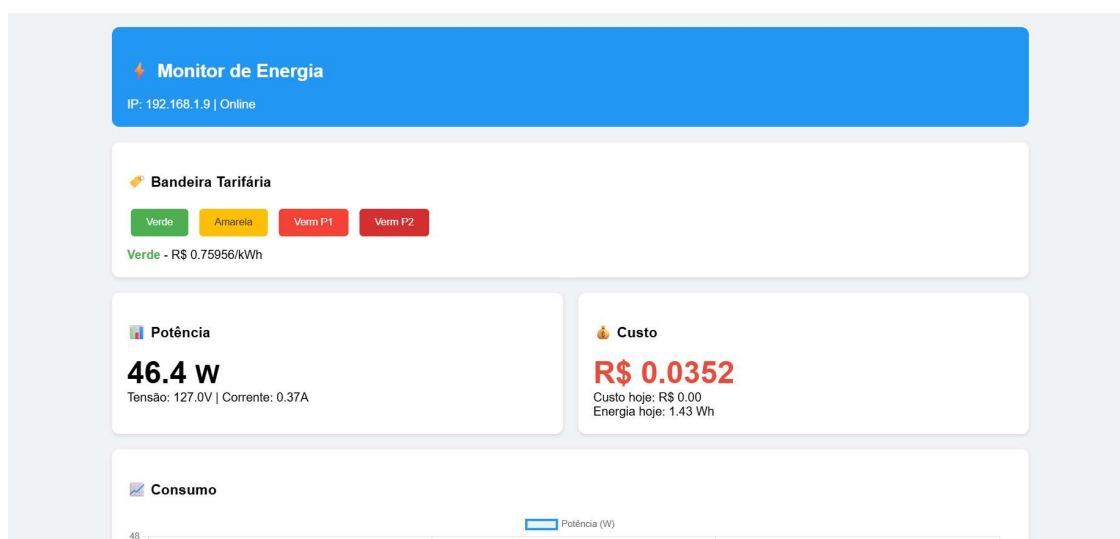
amperímetro Minipa ET-3166B, considerando um consumidor do grupo B1 residencial e o custo adicional de bandeiras tarifárias desconsiderando o acréscimo de impostos. Apresentação de dados será dividida em 3 partes: interface do site *web*, teste realizados com uma TV e a análise de gráficos obtido pela aquisição serial de dados.

5.1 Interface Site *Web*

Com a construção da interface *web*, teve-se como intuito proporcionar uma experiência simples e interativa, de modo que o usuário conseguisse interpretar os dados apresentados e compreendesse as opções de escolha disponíveis no site.

Conforme ilustra a Figura 16, em uma primeira percepção, o usuário consegue determinar qual bandeira tarifária deseja utilizar como referência para a leitura do seu consumo, podendo escolher entre as quatro opções disponíveis: verde, amarela, vermelha P1 e vermelha P2. Adicionalmente, a interface exibe, em formato numérico, os valores da potência consumida e do custo instantâneo. Em caracteres menores, no quadro da potência consumida, apresentam-se os valores de tensão e corrente obtidos. No quadro do custo, por sua vez, informam-se o custo total no dia e a energia total consumida.

Figura 17 - primeira vista Interface de site *web*



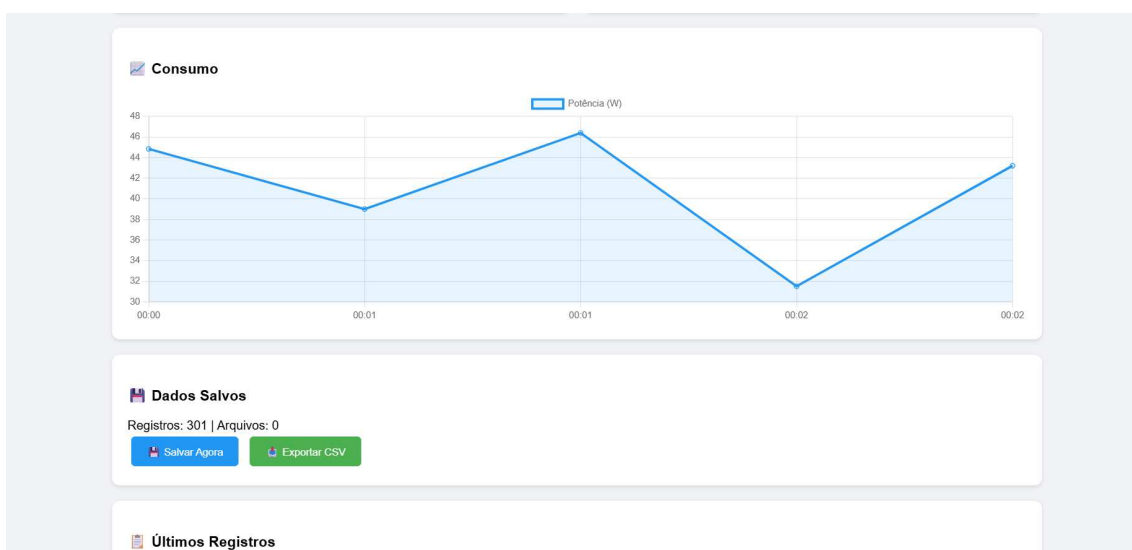
Fonte: Os Autores (2026)

Ao rolar a página do site, visualiza-se a vista ilustrada na Figura 17, na qual se apresenta o gráfico da potência consumida ao longo do tempo, bem como a

quantidade de registros armazenados e o número de arquivos salvos. Os registros correspondem à quantidade de dados lidos, incluindo potência, corrente, tensão, custo, bandeira tarifária e consumo energético.

Ao clicar no botão azul denominado "Salvar agora", o sistema armazena a quantidade de dados adquiridos até o momento da leitura. Por sua vez, ao clicar no botão verde de "Exportar CSV", realiza-se o download de uma planilha em formato CSV contendo os dados previamente salvos por meio do botão "Salvar agora".

Figura 18 - Segunda vista interface site web



Fonte: Os Autores (2026)

A Figura 18 ilustra o formato da tabela gerada no software Microsoft Excel, a qual é salva como um arquivo no formato CSV (Comma-Separated Values). A referida tabela é composta por sete colunas, organizadas na seguinte ordem sequencial:

- DataHora: Apresenta a quantidade de dias decorridos desde o início do processo de medição e o horário correspondente, discriminado em horas, minutos e segundos.
- Tensão: Expressa em volts (V).
- Corrente: Expressa em ampères (A).
- Potência: Expressa em watts (W).
- Custo: Expresso em reais por hora (R\$/h).
- Energia (Consumo): Expresso em watts-hora (Wh).

- **Bandeira Tarifária:** Indica a bandeira tarifária selecionada no momento da medição.

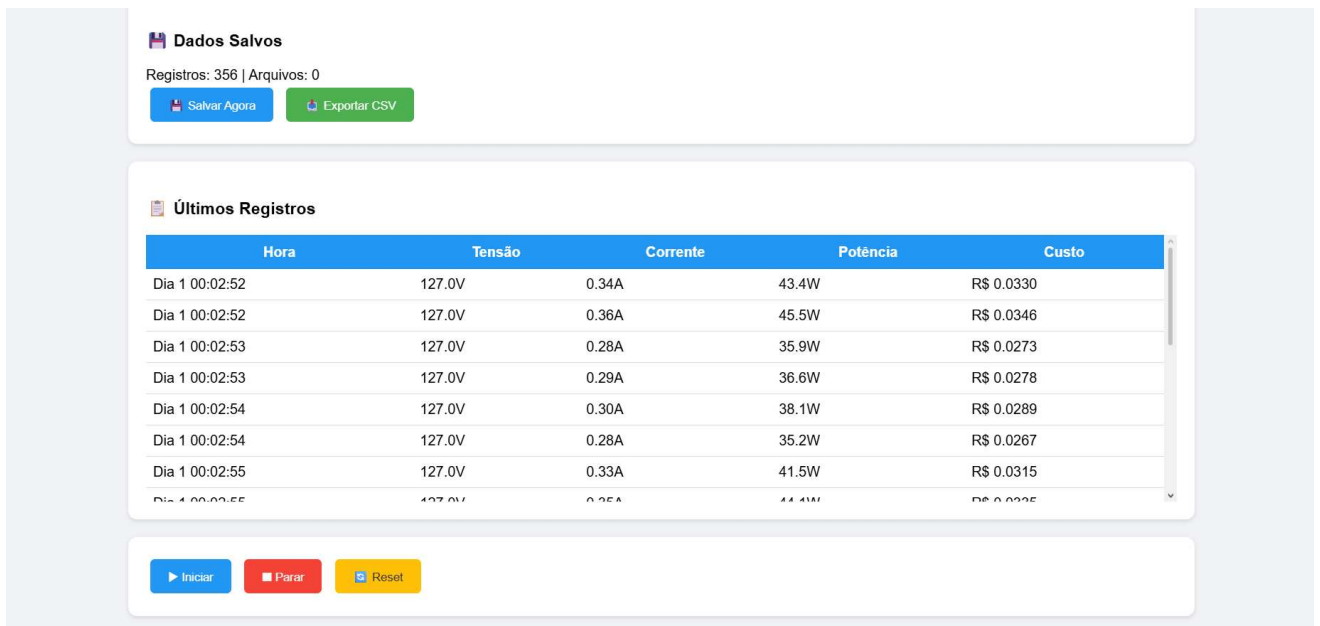
Figura 19 - Planilha de arquivo CSV de dados salvos.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
DataHora	Tensao(V)	Corrente(A)	Potencia(W)	Custo(R\$)	Energia(kWh)	Bandeira																			
1	Dia 1 00:12:19	127.7	0.57	73.01	0.06	15.38	Verde																		
2	Dia 1 00:12:20	127.7	0.62	79.14	0.06	15.39	Verde																		
3	Dia 1 00:12:20	127.7	0.57	72.81	0.06	15.40	Verde																		
4	Dia 1 00:12:21	127.7	0.58	73.63	0.06	15.41	Verde																		
5	Dia 1 00:12:21	127.7	0.57	71.84	0.05	15.42	Verde																		
6	Dia 1 00:12:22	127.7	0.55	70.04	0.05	15.43	Verde																		
7	Dia 1 00:12:22	127.7	0.50	63.74	0.05	15.44	Verde																		
8	Dia 1 00:12:23	127.7	0.52	66.40	0.05	15.45	Verde																		
9	Dia 1 00:12:23	127.7	0.52	65.89	0.05	15.46	Verde																		
10	Dia 1 00:12:24	127.7	0.50	64.12	0.05	15.47	Verde																		
11	Dia 1 00:12:24	127.7	0.55	69.96	0.05	15.48	Verde																		
12	Dia 1 00:12:25	127.7	0.51	64.92	0.05	15.49	Verde																		
13	Dia 1 00:12:25	127.7	0.52	66.36	0.05	15.50	Verde																		
14	Dia 1 00:12:26	127.7	0.53	67.10	0.05	15.51	Verde																		
15	Dia 1 00:12:26	127.7	0.51	65.17	0.05	15.52	Verde																		
16	Dia 1 00:12:27	127.7	0.53	67.13	0.05	15.53	Verde																		
17	Dia 1 00:12:27	127.7	0.56	71.31	0.05	15.54	Verde																		
18	Dia 1 00:12:28	127.7	0.52	65.80	0.05	15.54	Verde																		
19	Dia 1 00:12:29	127.7	0.52	65.93	0.05	15.55	Verde																		
20	Dia 1 00:12:29	127.7	0.52	66.62	0.05	15.56	Verde																		
21	Dia 1 00:12:30	127.7	0.55	69.25	0.05	15.57	Verde																		
22	Dia 1 00:12:30	127.7	0.56	71.62	0.05	15.58	Verde																		
23	Dia 1 00:12:31	127.7	0.59	75.26	0.06	15.59	Verde																		
24	Dia 1 00:12:31	127.7	0.56	71.50	0.05	15.60	Verde																		
25	Dia 1 00:12:32	127.7	0.58	73.56	0.06	15.61	Verde																		
26	Dia 1 00:12:32	127.7	0.55	70.00	0.05	15.62	Verde																		
27	Dia 1 00:12:33	127.7	0.56	71.12	0.05	15.63	Verde																		
28	Dia 1 00:12:33	127.7	0.58	73.40	0.06	15.64	Verde																		
29	Dia 1 00:12:34	127.7	0.61	77.22	0.06	15.65	Verde																		
30	Dia 1 00:12:34	127.7	0.60	75.81	0.06	15.66	Verde																		
31	Dia 1 00:12:35	127.7	0.56	70.77	0.05	15.67	Verde																		
32	Dia 1 00:12:35	127.7	0.59	74.42	0.06	15.68	Verde																		
33	Dia 1 00:12:36	127.7	0.58	73.06	0.06	15.69	Verde																		
34	Dia 1 00:12:36	128.6	0.60	75.62	0.06	15.71	Verde																		

Fonte: Os Autores (2026)

Para acompanhamento em tempo real a terceira vista do site web (figura 19), mostra: dia, horas, minutos, segundos , tensão , corrente, potência e custo em formato de tabela. Na mesma vista, tem-se 3 botões para interação: Botão azul como a tag “iniciar”, para se iniciar a leitura; Botão vermelho com tag “parar”, para parar a aquisição de dados e o botão amarelo com a tag “reset” para se resetar a leitura de dados.

Figura 20 - Terceira vista interface site web



Fonte: Os Autores (2026)

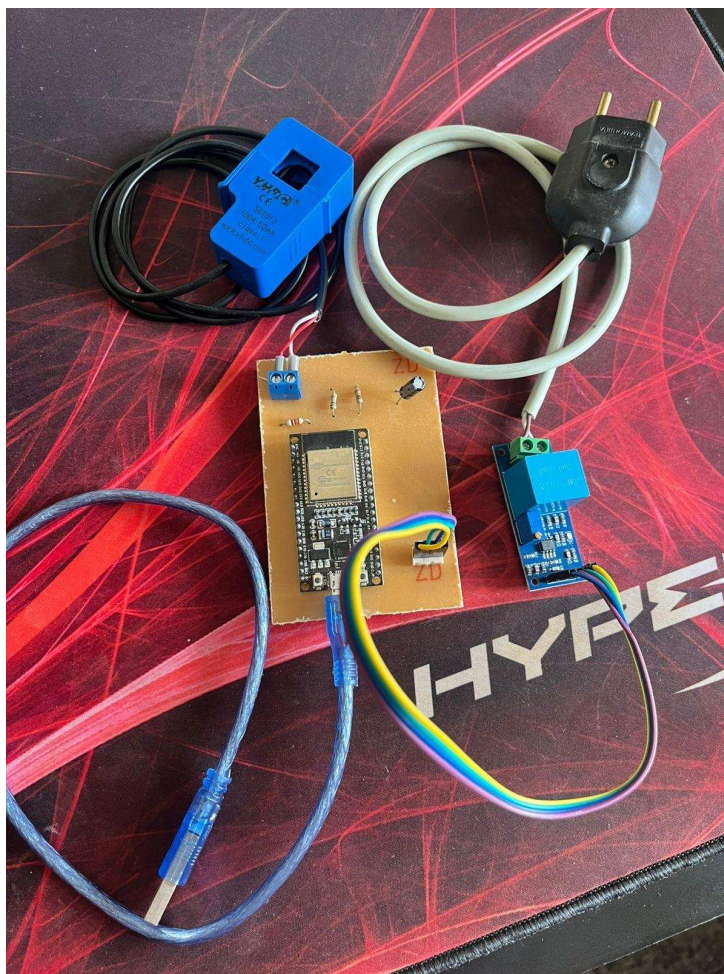
5.2 Procedimento Experimental e Validação de Medições

O ensaio experimental foi conduzido por meio da medição do consumo energético de uma Smart TV Britânia de 43 polegadas, modelo BTV43G7PR2CSBLF, durante o período de 1 hora, com o dispositivo operando em regime normal, incluindo a exibição de imagens e a reprodução de áudio. Para a execução dos testes, foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Dois prolongadores de conexão elétrica;
- Um conector elétrico tipo "T";
- Um alicate amperímetro digital da marca Minipa, modelo ET-3166B;
- O protótipo de medidor de energia desenvolvido.
- Dois conectores de 2 pinos tipo JST e um conector tipo KRE06.

Na Fotografia 1, apresenta-se a visualização da arquitetura final de hardware do protótipo, com a conexão de todos os componentes integrados. Os componentes eletrônicos, incluindo o microcontrolador ESP32, o capacitor, os resistores e os conectores, foram devidamente soldados à placa de circuito impresso (PCI).

Fotografia 1 - Arquitetura final de hardware

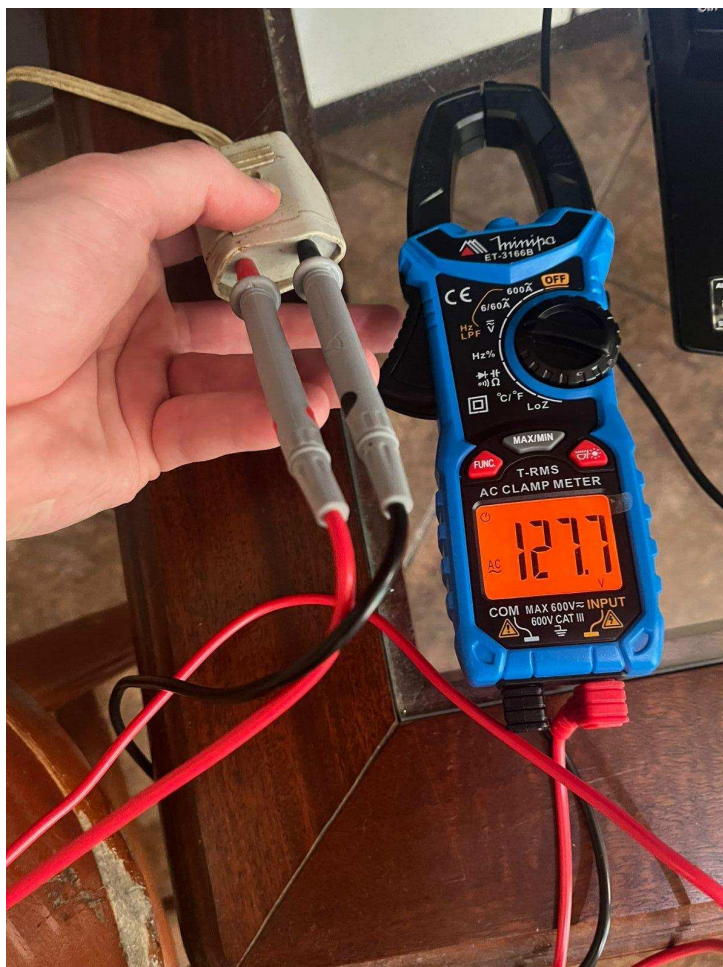


Fonte: Os Autores (2026)

No sensor de tensão ZMPT101B, observa-se a presença de um dos prolongadores de conexão elétrica, utilizado para a leitura da tensão da rede. Para realizar a conexão deste sensor à placa, empregou-se dois conectores JST de 2 pinos. A interligação entre o conector JST e o sensor foi executada por meio de quatro jumpers.

Para a conexão do sensor de corrente SCT-013, utilizou-se um conector KRE0, garantindo assim a interface adequada para a transmissão do sinal de corrente ao circuito de condicionamento e, subsequentemente, ao microcontrolador.

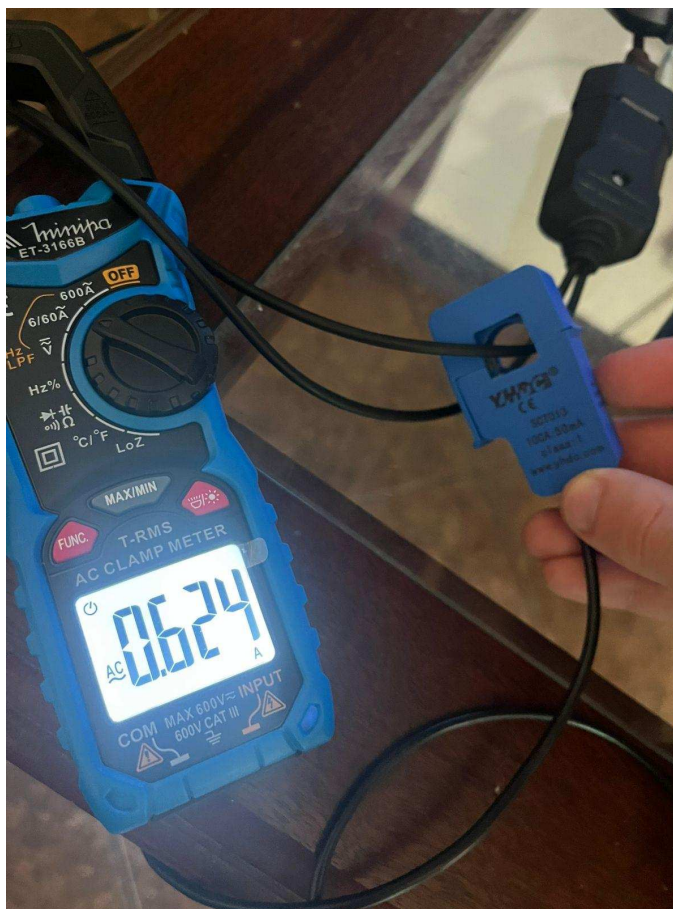
Fotografia 2 - Medição de tensão com multímetro



Fonte: Os Autores (2026)

Os dois condutores de um dos conjuntos da extensão foram conectados ao sensor ZMPT101B, destinado à aquisição do sinal de tensão. Como procedimento de validação e comparação de leituras, empregou-se o alicate amperímetro Minipa ET-3166B. Conforme ilustrado na Fotografia 1, a tensão foi medida com as pontas de prova do multímetro conectadas ao terminal fêmea da extensão associada ao conector tipo "T", obtendo-se o valor de 127,7 V. Simultaneamente, a leitura instantânea realizada pelo sensor ZMPT101B resultou no valor de 127,46 V. Considerando a diferença de 0,26 V entre as duas medições, o valor foi considerado válido.

Fotografia 3 - Medição de corrente com alicate amperímetro



Fonte: Os Autores (2026)

5.3 Análise Gráfica de Dados

O arquivo no formato CSV, obtido a partir da leitura do consumo energético da televisão durante o período de 1 hora, foi utilizado como base de dados para a realização de uma breve análise no software Power BI.

Conforme ilustrado na Figura 20, apresenta-se a leitura da corrente elétrica em função do tempo. Observa-se que a média de corrente variou entre 0,55 A e 0,60 A. De modo similar, identificaram-se alguns picos de corrente em instantes específicos, atingindo o valor de 0,70 A. Os valores mantiveram-se dentro da média previamente verificada pelo alicate amperímetro, o que confirmou a repetibilidade e a precisão do protótipo desenvolvido.

Quanto às legendas apresentadas nos gráficos, as bandeiras tarifárias variaram ao longo do período de leitura, resultando em diferentes comportamentos do custo observado na Figura 20. A codificação cromática adotada foi a seguinte:

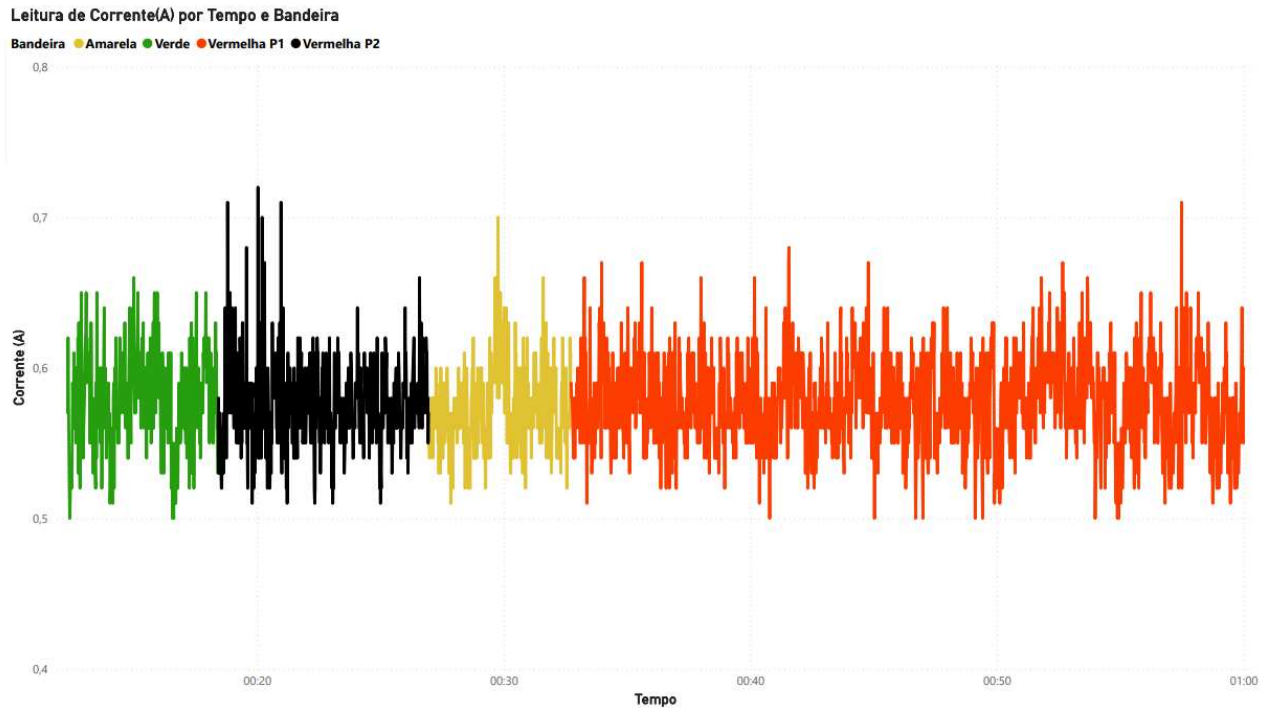
- Cor verde: representa a bandeira tarifária verde;
- Cor amarela: representa a bandeira tarifária amarela;
- Cor preta: representa a tarifa vermelha P2;
- Cor vermelha: representa a tarifa vermelha P1.

Durante o procedimento de medição, realizou-se a variação intencional da seleção das bandeiras tarifárias no sistema, com o objetivo de observar a resposta dinâmica da interface *web* e, consequentemente, obter os valores de custo de energia elétrica de acordo com a tarifa aplicada.

Para tal, alternou-se entre as quatro modalidades de bandeiras tarifárias disponíveis no sistema — verde, amarela, vermelha P1 e vermelha P2 — enquanto se mantinha a medição contínua dos parâmetros elétricos da carga (tensão, corrente e potência). Esta abordagem permitiu verificar se o microcontrolador ESP32 e a interface *web* respondiam corretamente às mudanças de tarifa, atualizando em tempo real o valor do custo energético instantâneo e do custo total acumulado no período.

Os resultados obtidos demonstraram que o sistema foi capaz de recalculiar o custo da energia consumida de forma imediata sempre que a bandeira tarifária selecionada era alterada, refletindo com precisão os diferentes valores de acréscimo por kWh estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para cada bandeira. Esta funcionalidade mostrou-se relevante para o propósito do protótipo, qual seja, o de conscientizar o usuário sobre o impacto das bandeiras tarifárias no valor final da conta de energia elétrica.

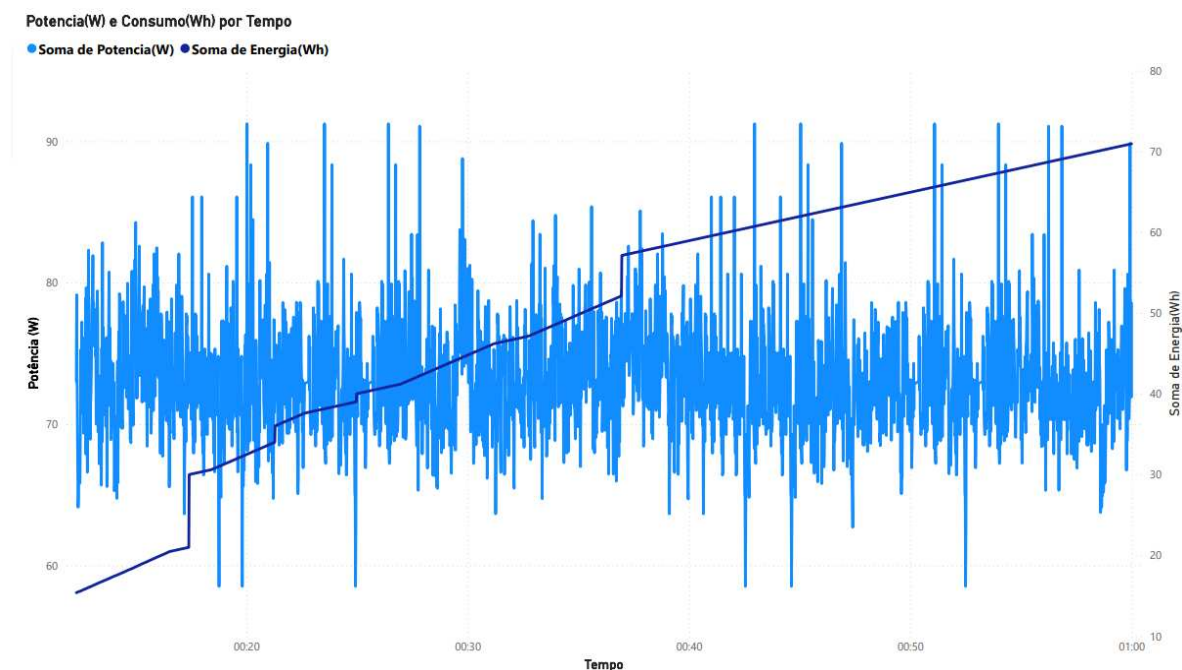
Figura 21 - Gráfico de Corrente x Tempo com legenda de tarifas



Fonte: Os Autores (2026)

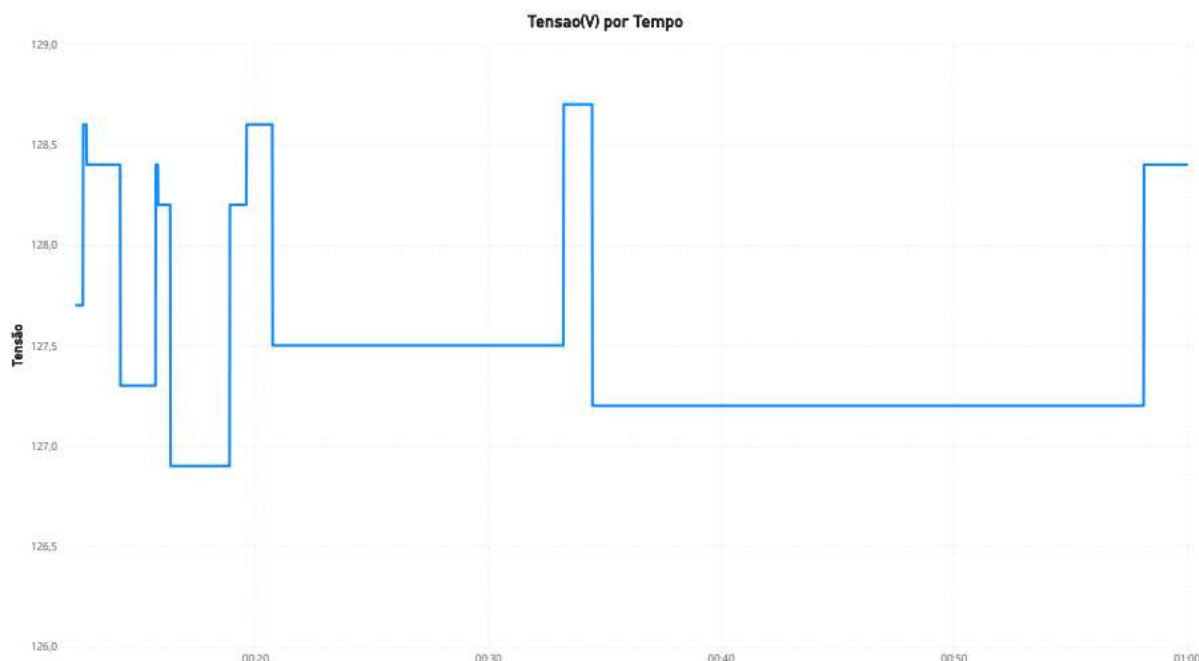
Na Figura 21, objetivou-se ilustrar a variação e a leitura da potência consumida pelo eletrodoméstico (televisão). Na cor azul clara, observaram-se alguns picos de potência, os quais podem ser atribuídos a dois fatores principais: (i) variação da tensão da rede distribuidora e (ii) variação da corrente consumida pelo eletrodoméstico, decorrente da alternância de imagens exibidas e do funcionamento interno do aparelho. Já na cor azul escura, representou-se uma linha com tendência crescente, a qual corresponde à energia consumida durante o período de leitura, expressa em quilowatt-hora [kWh].

Figura 22 - Potência e Consumo x Tempo



Fonte: Os Autores (2026)

A Figura 22 apresenta a leitura da tensão elétrica da rede distribuidora da concessionária Copel em função do tempo, durante o período de 1 hora de monitoramento. Observou-se que a tensão manteve-se dentro de uma faixa estável, variando entre 126,9 V e 127,7 V. Esta pequena oscilação, da ordem de 0,8 V, pode ser atribuída a flutuações características da rede elétrica de distribuição, decorrentes de variações na demanda de carga ou de transitórios na rede, ou variação de leitura do sensor de corrente. A ausência de picos abruptos ou quedas significativas de tensão indicou que o fornecimento de energia elétrica pela concessionária manteve-se dentro dos padrões regulatórios estabelecidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), os quais definem a zona adequada de operação para tensão nominal de 127 V. Dessa forma, a estabilidade da tensão observada ao longo do ensaio contribuiu para a confiabilidade das medições de potência e consumo realizadas pelo protótipo.

Figura 23 - Gráfico de Tensão x Tempo

Fonte: Os Autores (2026)

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal a construção de um protótipo de medidor de energia elétrica de baixo custo, capaz de realizar a aquisição de grandezas elétricas (tensão, corrente, potência e consumo) e transmitir os dados em tempo real por meio de uma interface *web*. Este objetivo foi plenamente alcançado, tendo-se desenvolvido um dispositivo funcional baseado no microcontrolador ESP32, nos sensores SCT-013 (corrente) e ZMPT101B (tensão), e em um circuito de condicionamento de sinal adequado às faixas de leitura do conversor analógico-digital.

A motivação para o desenvolvimento deste protótipo reside na crescente necessidade de conscientização sobre o consumo de energia elétrica. Crises climáticas, caracterizadas por longos períodos de estiagem, têm se tornado recorrentes no cotidiano da sociedade brasileira. Considerando que a matriz energética do país depende majoritariamente de usinas hidrelétricas, a redução dos níveis dos reservatórios impacta diretamente o custo da energia, com o acionamento de usinas termelétricas e a consequente elevação das bandeiras tarifárias. Nesse contexto, dispor de um instrumento de medição acessível que permita ao usuário

final monitorar seu consumo em tempo real revela-se uma ferramenta relevante para o gerenciamento eficiente da energia elétrica doméstica.

Os experimentos realizados com uma Smart TV de 43 polegadas, durante o período de uma hora, demonstraram que o protótipo desenvolvido apresentou medições compatíveis com as realizadas por um alicate amperímetro de referência (Minipa ET-3166B), com variações consideradas aceitáveis: 0,26 V para tensão e 0,004 A para corrente. Tais resultados confirmam a repetibilidade e a precisão do sistema proposto, atestando sua viabilidade técnica para aplicações de monitoramento residencial.

Como contribuições deste trabalho, destacam-se: (i) o desenvolvimento de uma placa de circuito impresso (PCI) personalizada que integrou todos os componentes eletrônicos, garantindo robustez e confiabilidade às conexões; (ii) a implementação de um circuito de condicionamento de sinal que adequou corretamente os sinais dos sensores à faixa de 0 a 3,3 V do ESP32; (iii) a geração automática de arquivos CSV contendo dados estruturados de consumo, possibilitando análises posteriores em ferramentas como Power BI; e (iv) a visualização em tempo real dos parâmetros elétricos por meio de uma interface *web* hospedada no próprio microcontrolador.

Além das contribuições já elencadas, o protótipo desenvolvido apresenta um amplo espectro de possibilidades de aplicação prática, seja para fins informativos, seja para a busca ativa da eficiência energética, incluindo o suporte à implementação de ações de Conservação de Energia e Inovação Tecnológica (CICE). No âmbito residencial, o dispositivo pode ser empregado para o monitoramento individualizado de eletrodomésticos de alto consumo, como chuveiros elétricos, condicionadores de ar, geladeiras e máquinas de lavar, permitindo ao usuário identificar quais equipamentos apresentam maior impacto na fatura de energia e promover mudanças comportamentais. No contexto comercial e de pequenos negócios, o protótipo auxilia na gestão energética de padarias, lanchonetes, lojas e pequenos escritórios, viabilizando auditorias energéticas simplificadas. No campo educacional, o dispositivo mostra-se relevante como ferramenta didática em laboratórios de cursos técnicos e superiores de Engenharia Elétrica, permitindo que os estudantes compreendam na prática os conceitos de aquisição e condicionamento de sinais, transmissão de dados e análise de consumo

energético. Adicionalmente, o protótipo pode ser aplicado em projetos de eficiência energética em escolas públicas, iniciativas de conscientização em comunidades de baixa renda, pesquisas acadêmicas sobre comportamento do consumidor e integração com sistemas de automação residencial para desligamento automático de cargas em horários de bandeira tarifária elevada.

Por fim, conclui-se que o protótipo desenvolvido atendeu aos objetivos propostos, constituindo-se como uma solução de baixo custo com um valor investido de R\$ 139,97, e tecnicamente viável para o monitoramento do consumo de energia elétrica residencial, contribuindo para a conscientização do usuário, para o uso mais racional deste recurso essencial e para o avanço de iniciativas voltadas à eficiência energética e à conservação de energia no Brasil.

6.1 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se a substituição do microcontrolador ESP32-WROOM-32 38 pinos por um modelo de maior capacidade de processamento e memória, tal como o ESP32-S3 ou plataformas baseadas em ARM Cortex. Tal alteração permitirá o desenvolvimento de uma interface *web* com sistema de autenticação por login e senha, possibilitando a identificação do usuário e a associação dos dados de medição à sua respectiva conta, bem como o acesso remoto a históricos de consumo e a personalização das configurações do sistema.

Do mesmo modo, o aumento da capacidade de processamento viabilizará a conexão de múltiplos conjuntos de sensores de tensão e corrente, permitindo a medição simultânea de diversos dispositivos elétricos.

Adicionalmente, sugere-se a utilização de uma fonte de alimentação móvel, do tipo power bank, a fim de tornar o protótipo independente de um computador notebook para sua operação, conferindo-lhe portabilidade para medições em campo. Complementarmente, recomenda-se a incorporação de um display de LED ou LCD ao protótipo, com o objetivo de fornecer diretamente ao usuário as principais grandezas elétricas medidas, tais como: tensão (V), corrente (A), potência consumida (W) e custo associado (R\$), dispensando a necessidade de acesso à interface *web* para consultas rápidas.

No âmbito da eficiência energética, recomenda-se o desenvolvimento de um sistema de acionamento automático de cargas, no qual o protótipo, ao identificar a vigência de bandeira tarifária vermelha ou a ultrapassagem de um limite pré-estabelecido de consumo, envie comandos para relés ou tomadas inteligentes desligarem equipamentos não prioritários, contribuindo ativamente para a redução do consumo nos horários de maior custo.

Por fim, sugere-se a realização de estudos de campo mais abrangentes, com a instalação de múltiplos protótipos em residências reais durante períodos prolongados (ex.: 30 a 90 dias), a fim de avaliar a usabilidade, a confiabilidade e o impacto efetivo no comportamento dos usuários. Tais estudos poderiam incluir pesquisas de opinião para medir a percepção dos consumidores sobre a ferramenta e sua disposição a modificar hábitos de consumo com base nos dados apresentados. Adicionalmente, recomenda-se a utilização do protótipo em programas de Conservação de Energia e Inovação Tecnológica (CICE) em escolas técnicas e universidades, bem como em projetos de extensão voltados à conscientização de comunidades de baixa renda, considerando que o baixo custo do dispositivo o torna candidato potencial para iniciativas de distribuição em larga escala por parte de concessionárias de energia ou órgãos governamentais, alinhado às metas de eficiência energética estabelecidas pela Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia (Lei nº 10.295/2001).

REFERÊNCIAS

1. ALMEIDA, P. R. **Gestão da demanda e o consumidor ativo no setor elétrico**. 1. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2023.
2. CARVALHO, M. F. **Algoritmos preditivos aplicados ao consumo energético residencial**. Revista Brasileira de Inovação Tecnológica, v. 10, n. 2, p. 45-60, 2022.
3. FERNANDES, R. C. **A revolução dos eletrodomésticos e o impacto no consumo de energia no Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2020.
4. GOLDENBERG, J. **Políticas públicas para eficiência energética: uma análise histórica do PROCEL**. Brasília: Editora Ipea, 2021.
5. KAHNEMAN, D. **Rápido e devagar: duas formas de pensar**. 1. ed. Rio de Janeiro: Objetiva, 2011.
6. LIMA, A. B. **O impacto das bandeiras tarifárias no comportamento do consumidor residencial**. 2019. 150 f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
7. OLIVEIRA, S. T. **A influência da rotulagem na decisão de compra de eletrodomésticos eficientes**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 7., 2022, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: CBEE, 2022. p. 112-125.
8. PEREIRA, L. A. **Smart Grids: a revolução das redes elétricas inteligentes**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2023.
9. PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica). **Relatório de avaliação da economia de energia 2022**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2022.
Disponível em:
<https://www.eletrobras.com/pt/AreasdeAtuacao/procel/Documents/Relatorio-Anual-Procel-2022.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2025.
10. RODRIGUES, C. P. **Gestão coletiva da demanda por energia elétrica**. Revista de Engenharia Elétrica, v. 15, n. 1, p. 78-95, 2022.

11. SANTOS, E. M. **Internet das Coisas e monitoramento energético residencial em tempo real**. Curitiba: Editora CRV, 2021.
12. SILVA, J. A. **História da Energia Elétrica no Brasil: dos primórdios à era digital**. 1. ed. Salvador: Edufba, 2019.
13. THALER, R. H.; SUNSTEIN, C. R. **Nudge: como tomar melhores decisões sobre saúde, dinheiro e felicidade**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.
14. ZHOU, W. **Smart Meters and the Data-Driven Energy Transition**. Energy Policy Journal, v. 45, n. 4, p. 102-118, 2022.
15. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Histórico de Bandeiras Tarifárias**. Brasília: ANEEL, 2024. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>. Acesso em: 15 ago. 2025.
16. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Sistema de Bandeiras Tarifárias**. Brasília: ANEEL, 2023. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/sistema-de-bandeiras-tarifarias>. Acesso em: 15 ago. 2025.
17. CARVALHO, M. F. **Estratégias de Eficiência Energética Residencial: Otimização do Consumo sem Perda de Conforto**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2022.
18. LIMA, A. B. **O Impacto das Bandeiras Tarifárias no Comportamento do Consumidor Residencial**. 2019. 150 f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
19. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Relatório de Análise de Segurança Energética 2023**. Brasília: ONS, 2023. Disponível em: <http://www.ons.org.br/>. Acesso em: 15 ago. 2025.
20. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico - 2023**. Brasília: ONS, 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/energa-agora/boletins>. Acesso em: 15 ago. 2025.
21. PEREIRA, L. A. **Smart Grids: A Revolução das Redes Elétricas Inteligentes no Ambiente Residencial**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2023.

22. TOLMASQUIM, M. T. (Org.). **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2016.
23. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023: informação e documentação: referências: elaboração**. Rio de Janeiro, 2002.
24. DEMETRAS, Ezequiel. **[Tutorial] SCT-013 - Sensor de Corrente Alternada com Arduino - Portal Vida de Silício**. Disponível em:
<https://portal.vidadesilicio.com.br/sct-013-sensor-de-corrente-alternada>. Acesso em: 21 out. 2025.
25. **SCT013**. Disponível em: <https://en.yhdc.com/product1311.html?productId=401>. Acesso em: 21 out. 2025.
26. **Sensor de Tensão AC 0-250V Zmpt101b / Voltímetro para Arduino**. Disponível em:
<https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-tensao-arduino/sensor-de-tensao-ac-0-250v-zmpt101b-voltmetro-para-arduino-5658.html?srsltid=AfmBOopOK-g4hyQu15KG2-y8Yk8J6tWPP4ze3DhULqQYmYFmS9j4WRLG>. Acesso em: 21 out. 2025.
27. **ZMPT101B AC voltage sensor module - pinout, schematic, and calibration**. Disponível em:
<https://datacapturecontrol.com/articles/io-components/sensors/voltage/zmpt101b-ac-voltage-transformer-sensor-module>. Acesso em: 21 out. 2025.
28. **ESP32 Pinout: How use GPIO pins?** Disponível em:
https://www.upesy.com/blogs/tutorials/esp32-pinout-reference-gpio-pins-ultimate-guide?srsltid=AfmBOopyn9A75oouRGny1-mTKklJbdhbNUMsDzGUMd-h_8qQ1cv8LGcb. Acesso em: 21 out. 2025.
29. ANDRADE, M. M. **Competências requeridas pelos gestores de Instituições de ensino superior privadas: um estudo em Curitiba e região Metropolitana**. 2005. 173 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

30. BARROS, A. J. S.; LEHFELD, N. A. S. **Fundamentos de metodologia: um guia para a iniciação científica**. 2. ed. São Paulo: Makron, 2000.
31. **CÓDIGO de Catalogação Anglo-Americano**. 2. ed. São Paulo: FEBAB, 1983-1985.
32. MONTEIRO, S. **Breve espaço entre cor e sombra: o romance da maturidade literária de Cristóvão Tezza**. Revista de Letras, Curitiba (PR), v. 13, n. 11, p. 183-200, dez. 2009.
33. RENAUX, D. P. B.; et al. **Gestão do conhecimento de um laboratório de pesquisa: uma abordagem prática**. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GESTÃO DO CONHECIMENTO. 4., 2001, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: PUC-PR, 2001. p. 195-208.
34. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Sistema de Bibliotecas. **Normas para elaboração de trabalhos acadêmicos**. Curitiba: UTFPR, 2009. Disponível em: http://www.utfpr.edu.br/documentos/normas_trabalhos_utfpr.pdf. Acesso em: 11 nov. 2011.
35. IPEM-SP (Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo). **Medidor de energia elétrica**. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://ipemsp.wordpress.com/category/metrologia-legal/instrumentos-de-medicao/medidor-energia-eletrica/>. Acesso em: 15 ago. 2025.
36. CG SOLUÇÕES. **Medidor de energia monofasico**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://cg-solucoes.com.br/produtos/medicao-de-energia/monofasico/medidor-de-energia-monofasico/>. Acesso em: 15 ago. 2025.
37. CONSUMO EM PAUTA. **O que é medidor inteligente de energia elétrica e como ele beneficia você?**. [S. l.], 25 out. 2022. Disponível em: <https://consumoempauta.com.br/o-que-e-medidor-inteligente-de-energia-eletrica-e-como-ele-beneficia-voce/>. Acesso em: 15 ago. 2025.

38. ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa nº 1.000, de 11 de julho de 2018**. Estabelece as diretrizes para o Programa de Medição Avançada no Sistema Elétrico Nacional. Brasília: ANEEL, 2018. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/resolucoes-aneel>. Acesso em: 15 ago. 2025.

39. IEC (International Electrotechnical Commission). **IEC 62052-11:2020 - Electricity metering equipment (AC) - General requirements, tests and test conditions**. Genebra: IEC, 2020.

40. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). **IEEE Std 2030.5-2018 - IEEE Standard for Smart Energy Profile Application Protocol**. Nova York: IEEE, 2018.

41. ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). **Procedimentos de Rede - Submódulo 3.6: Medição**. Brasília: ONS, 2022. Disponível em: <http://www.ons.org.br/caderno-de-procedimentos>. Acesso em: 15 ago. 2025.

42. RATED INPUT CURRENT. **Split core current transformer**. Disponível em: <https://www.rhydolabz.com/documents/Specification%20of%20%20SCT013.pdf>. Acesso em: 26 out. 2025.

43. **ESP32 Datasheet**. Disponível em: https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 27 out. 2025.

44. MOTTER, Giuliano Galhardi. **Projeto e desenvolvimento de um protótipo de medidor inteligente para grandezas elétricas**. 2020. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

45. OLIVEIRA, Noharti Afonso de. **Medição de energia em circuitos segmentados e apresentação via web**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, 2019.

ANEXO A - Direitos autorais - Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998.

Disposições preliminares



Presidência da República

Casa Civil

Subchefia para Assuntos Jurídicos

LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998.

Mensagem de veto

Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

O PRESIDENTE DA REPÚBLICA Faço saber que o Congresso Nacional decreta e eu sanciono a seguinte Lei:

Título I

Disposições Preliminares

Art. 1º Esta Lei regula os direitos autorais, entendendo-se sob esta denominação os direitos de autor e os que lhes são conexos.

Art. 2º Os estrangeiros domiciliados no exterior gozarão da proteção assegurada nos acordos, convenções e tratados em vigor no Brasil.

Parágrafo único. Aplica-se o disposto nesta Lei aos nacionais ou pessoas domiciliadas em país que assegure aos brasileiros ou pessoas domiciliadas no Brasil a reciprocidade na proteção aos direitos autorais ou equivalentes.

Art. 3º Os direitos autorais reputam-se, para os efeitos legais, bens móveis.

Art. 4º Interpretam-se restritivamente os negócios jurídicos sobre os direitos autorais.

Art. 5º Para os efeitos desta Lei, considera-se:

I - publicação - o oferecimento de obra literária, artística ou científica ao conhecimento do público, com o consentimento do autor, ou de qualquer outro titular de direito de autor, por qualquer forma ou processo;

II - transmissão ou emissão - a difusão de sons ou de sons e imagens, por meio de ondas radioelétricas; sinais de satélite; fio, cabo ou outro condutor; meios óticos ou qualquer outro processo eletromagnético;

III - retransmissão - a emissão simultânea da transmissão de uma empresa por outra;

IV - distribuição - a colocação à disposição do público do original ou cópia de obras literárias, artísticas ou científicas, interpretações ou execuções fixadas e fonogramas, mediante a venda, locação ou qualquer outra forma de transferência de propriedade ou posse;

V - comunicação ao público - ato mediante o qual a obra é colocada ao alcance do público, por qualquer meio ou procedimento e que não consista na distribuição de exemplares;

VI - reprodução - a cópia de um ou vários exemplares de uma obra literária, artística ou científica ou de um fonograma, de qualquer forma tangível, incluindo qualquer armazenamento permanente ou temporário por meios eletrônicos ou qualquer outro meio de fixação que venha a ser desenvolvido;

VII - contrafação - a reprodução não autorizada;

VIII - obra:

a) em co-autoria - quando é criada em comum, por dois ou mais autores;

b) anônima - quando não se indica o nome do autor, por sua vontade ou por ser desconhecido;

c) pseudônima - quando o autor se oculta sob nome suposto;

d) inédita - a que não haja sido objeto de publicação;

e) póstuma - a que se publique após a morte do autor;

f) originária - a criação primígena;

g) derivada - a que, constituindo criação intelectual nova, resulta da transformação de obra originária;

h) coletiva - a criada por iniciativa, organização e responsabilidade de uma pessoa física ou jurídica, que a publica sob seu nome ou marca e que é constituída pela participação de diferentes autores, cujas contribuições se fundem numa criação autônoma;

i) audiovisual - a que resulta da fixação de imagens com ou sem som, que tenha a finalidade de criar, por meio de sua reprodução, a impressão de movimento, independentemente dos processos de sua captação, do suporte usado inicial ou posteriormente para fixá-lo, bem como dos meios utilizados para sua veiculação;

IX - fonograma - toda fixação de sons de uma execução ou interpretação ou de outros sons, ou de uma representação de sons que não seja uma fixação incluída em uma obra audiovisual;

X - editor - a pessoa física ou jurídica à qual se atribui o direito exclusivo de reprodução da obra e o dever de divulgá-la, nos limites previstos no contrato de edição;

XI - produtor - a pessoa física ou jurídica que toma a iniciativa e tem a responsabilidade econômica da primeira fixação do fonograma ou da obra audiovisual, qualquer que seja a natureza do suporte utilizado;

XII - radiodifusão - a transmissão sem fio, inclusive por satélites, de sons ou imagens e sons ou das representações desses, para recepção ao público e a transmissão de sinais codificados, quando os meios de decodificação sejam oferecidos ao público pelo organismo de radiodifusão ou com seu consentimento;

XIII - artistas intérpretes ou executantes - todos os atores, cantores, músicos, bailarinos ou outras pessoas que representem um papel, cantem, recitem, declamem, interpretem ou executem em qualquer forma obras literárias ou artísticas ou expressões do folclore.

Art. 6º Não serão de domínio da União, dos Estados, do Distrito Federal ou dos Municípios as obras por eles simplesmente subvencionadas.