



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS QUIXADÁ**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**

**RAFAEL DA SILVA GONÇALVES**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO E ANÁLISE  
ONLINE DE CORRENTE E TENSÃO**

**QUIXADÁ**

**2026**

RAFAEL DA SILVA GONÇALVES

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO E ANÁLISE ONLINE  
DE CORRENTE E TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia De Computação do Campus Quixadá da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia De Computação.

Orientador: Prof. Dr. Luis Rodolfo Rebouças Coutinho.

QUIXADÁ

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

G628d Gonçalves, Rafael da Silva.

Desenvolvimento de um sistema de monitoramento e análise online de corrente e tensão / Rafael da Silva Gonçalves. – 2026.

66 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá, Curso de Engenharia de Computação, Quixadá, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Luis Rodolfo Rebouças Coutinho.

1. Potência ativa, reativa. 2. Monitoramento online. 3. Análise de sinais elétricos. I. Título.

CDD 621.39

---

RAFAEL DA SILVA GONÇALVES

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO E ANÁLISE ONLINE  
DE CORRENTE E TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia De Computação do Campus Quixadá da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia De Computação.

Aprovada em: 19/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Luis Rodolfo Rebouças  
Coutinho (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Thiago Werlley Bandeira da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. André Ribeiro Braga  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho a Deus, à minha família, aos amigos e aos professores, por todo o apoio e confiança depositados em mim. Sem esse suporte, eu não chegaria aqui.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado saúde e forças para superar as dificuldades e chegar ao final desta etapa tão importante.

Também gostaria de expressar a minha eterna gratidão aos meus pais, Maria Edwiges e Francisco de Assis, e à minha irmã, Radyja. Mãe, obrigado por todo o cuidado, pelos conselhos e por nunca deixar minha esperança falhar. Pai, obrigado por ser meu porto seguro e garantir que nunca me faltasse nada. À minha irmã, agradeço pelo companheirismo e por estar ao meu lado em todas as etapas. Tudo o que sou e conquistei devo a Deus, aos sacrifícios e ao amor de vocês.

À minha namorada, Tânia, pelo apoio incondicional, paciência e companheirismo que tornaram meus dias mais leves. Obrigado por estar ao meu lado em todos os momentos desta caminhada e por me incentivar a concluir este ciclo, sua presença foi o incentivo que precisei para chegar até aqui.

Aos meus amigos de jornada, especialmente Natalia Guimarães, Robert Vinícius e Larissa Matos, pelas noites de estudo, luta, loucura, pelo companheirismo nos momentos de tensão e pelas risadas que tornaram o caminho mais leve. Petrócio, Paula e Mogleson, por todas as brincadeiras que vivemos no pebolim antes de ele ‘sumir’ e, principalmente, por terem entrado na minha vida e deixado essa jornada mais leve. A todos os outros amigos que não mencionei aqui, deixo meu sincero agradecimento. Cada palavra de incentivo, cada risada e cada gesto de apoio fez diferença para eu chegar até aqui.

Ao Prof. Thiago Werley, por sua amizade, companheirismo e por todos os conselhos e auxílios durante a caminhada desta graduação e na realização deste trabalho.

Ao servidor técnico Abdul Hamid, também por sua amizade, parceria e por todo o suporte prestado durante a minha graduação.

Ao meu orientador, Prof. Rodolfo, pela paciência, pelas correções e por compartilhar seu conhecimento, guiando-me no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do campus Quixadá, que contribuíram para a minha formação profissional, compartilhando experiências que levarei para a vida.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha vida acadêmica e torceram pelo meu sucesso.

"Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos." (Provérbios 16:3)

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema embarcado para monitoramento e análise de grandezas elétricas em circuitos de corrente alternada monofásicos, com ênfase na aquisição e processamento digital de sinais. Assim, o hardware baseia-se no microcontrolador ESP32-C6 integrado ao circuito de medição de energia BL0942. Com isso, para a instrumentação, foram utilizados o sensor de corrente não intrusivo PZKHCT e o sensor de tensão ZMPT101B, cujos sinais passam por etapas de condicionamento analógico e filtragem antes da digitalização. Desta maneira, a coleta dos dados é realizada de forma contínua, permitindo o cálculo das potências ativa, reativa e aparente, bem como do fator de potência. Portanto, a validação experimental incluiu a comparação dos sinais adquiridos com instrumentos de referência, como osciloscópio e multímetro, além da análise espectral via Transformada Rápida de Fourier (FFT). Sendo assim, esse procedimento possibilitou a verificação da fidelidade da forma de onda, e a análise de distorções harmônicas, demonstrando a utilidade da solução proposta para aplicações de monitoramento energético residencial.

**Palavras-chave:** Monitoramento online; Análise de sinais elétricos; Transformada Rápida de Fourier (FFT), Potência ativa, reativa; aparente.

## ABSTRACT

This work presents the development of an embedded system for monitoring and analyzing electrical quantities in single-phase alternating current (AC) circuits, with an emphasis on digital signal acquisition and processing. The hardware architecture is based on the ESP32-C6 microcontroller integrated with the BL0942 energy measurement circuit. For instrumentation purposes, a non-intrusive current sensor (PZKHCT) and a voltage sensor (ZMPT101B) were employed, whose signals undergo analog conditioning and filtering stages prior to digitization. Data acquisition is performed continuously, enabling the calculation of active, reactive, and apparent power, as well as the power factor. Experimental validation included comparison of the acquired signals with reference instruments, such as an oscilloscope and a multimeter, in addition to spectral analysis using the Fast Fourier Transform (FFT). This procedure allowed the verification of waveform fidelity, the analysis of harmonic distortions, and the identification of peak values, demonstrating the usefulness of the proposed solution for residential energy monitoring applications.

**Keywords:** Real-time monitoring; Electrical signal analysis; Fast Fourier Transform (FFT); Active; reactive; apparent power.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo simplificado de geração e distribuição de energia . . . . .	20
Figura 2 – Gráfico de corrente e tensão em um circuito puramente resistivo. . . . .	21
Figura 3 – Gráfico de corrente e tensão em um circuito puramente indutivo (com indutor). . . . .	22
Figura 4 – Gráfico de corrente e tensão em um circuito puramente capacitivo (com capacitor). . . . .	22
Figura 5 – Triângulo das potências. . . . .	25
Figura 6 – Arquitetura do Sensor PZKHCT . . . . .	28
Figura 7 – Diagrama de Blocos da ESP32-C6-Wroom-1 . . . . .	30
Figura 8 – Fluxo de aquisição, exportação e validação das grandezas elétricas. . . . .	43
Figura 9 – Esquemático completo da placa embarcada . . . . .	49
Figura 10 – Foto da bancada completa do ensaio, evidenciando: (i) carga (lâmpada), (ii) posicionamento do TC PZKHCT no condutor de fase, (iii) ligação do ZMPT101B em paralelo, (iv) placa com BL0942 e ESP32-C6, (v) fonte/regulador e (vi) conexão USB para exportação e/ou conexão Wi-Fi (quando aplicável). . . . .	50
Figura 11 – Diagrama de ligação do ensaio ( <i>test setup</i> ) indicando rede AC, carga, pontos de medição do multímetro e o caminho do sinal até o BL0942 e o ESP32-C6. . . . .	51
Figura 12 – Recorte do canal de corrente: TC, <i>burden</i> , filtragem RC e interface com o BL0942 (IP/IN). . . . .	51
Figura 13 – Recorte do canal de tensão: ZMPT101B, acoplamento/polarização e interface com o BL0942 (VP/VN). . . . .	52
Figura 14 – Captura do osciloscópio com tensão e corrente simultâneas na carga de 70 W, evidenciando a coincidência temporal entre os sinais e referência à frequência nominal (60 Hz). . . . .	53
Figura 15 – Evidência de rastreabilidade: trecho do <i>log</i> serial do ESP32-C6 exibindo $V_{rms}$ , $I_{rms}$ , $P$ , $S$ , $Q$ e FP durante o ensaio com carga nominal. . . . .	55
Figura 16 – Forma de onda da corrente no domínio do tempo (amostras normalizadas) para carga resistiva de 70 W. . . . .	57
Figura 17 – Forma de onda da corrente no domínio do tempo (amostras normalizadas) para a carga secador. . . . .	58

Figura 18 – Evidência de rastreabilidade: trecho do *log* serial do ESP32-C6 exibindo  $V_{rms}$ ,  $I_{rms}$ ,  $P$ ,  $S$ ,  $Q$  e FP durante o ensaio com **secador de cabelo** (carga predominantemente indutiva), evidenciando consumo na ordem de  $\approx 502 W$  e  $FP \approx 0,93$ . . . . . 60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do BL0942 . . . . .	34
Tabela 2 – Configuração dos pinos do BL0942 . . . . .	35
Tabela 3 – Registos de medição do BL0942 . . . . .	36
Tabela 4 – Resumo dos filtros analógicos utilizados no projeto. . . . .	46
Tabela 5 – Resumo das configurações do ensaio ( <i>test setup</i> ) para assegurar reprodutibilidade. . . . .	53
Tabela 6 – Comparativo entre grandezas medidas e valores de referência (carga: lâmpada incandescente 70 W). . . . .	55

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Comparação entre Trabalhos Relacionados e o Presente Estudo . . . . .	41
--	----

## LISTA DE SÍMBOLOS

$W$	Potência ativa em Watts
$J$	Joules
$s$	Segundos
$Q$	Potência reativa em Volt-Ampere Reativo (VAR)
$S$	Potência aparente em Volt-Ampere (VA)
$V$	Tensão em Volts (V)
$I$	Corrente em Ampere (A)
$\phi$	Ângulo de fase
$\pi$	Pi, uma constante matemática aproximadamente igual a 3.14159
$\Sigma$	Símbolo de somatório
$e$	Base do logaritmo natural, aproximadamente igual a 2.718
$j$	Unidade imaginária, igual a $\sqrt{-1}$
$A$	Amplitude
$f$	Frequência em Hertz (Hz)
$t$	Tempo em segundos (s)
$\cos$	Função cosseno
$kW$	Quilowatt
$kVA$	Quilovolt-Ampere
$\omega$	Frequência angular

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Qualidade de Energia Elétrica</b>	<b>18</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Potência</b>	<b>20</b>
<b>2.1.1.1</b>	<i>Potência Ativa</i>	<b>20</b>
<b>2.1.1.2</b>	<i>Potência Reativa</i>	<b>21</b>
<b>2.1.1.3</b>	<i>Potência Aparente</i>	<b>24</b>
<b>2.2</b>	<b>Monitoramento de Cargas Elétricas</b>	<b>26</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Sensores</b>	<b>27</b>
<b>2.2.1.1</b>	<i>Sensor de Corrente PZKHCT</i>	<b>27</b>
<b>2.3</b>	<b>Sistemas Embarcados</b>	<b>28</b>
<b>2.3.1</b>	<i>Microcontrolador ESP32-C6-Wroom-1</i>	<b>29</b>
<b>2.4</b>	<b>Sistemas Embarcados em Monitoramento de Energia</b>	<b>30</b>
<b>2.5</b>	<b>Conversor Analógico-Digital</b>	<b>32</b>
<b>2.6</b>	<b>Transformada Rápida de Fourier (FFT)</b>	<b>33</b>
<b>2.7</b>	<b>BL0942 – Circuito integrado de medição sem calibração</b>	<b>34</b>
<b>2.7.1</b>	<i>Características principais</i>	<b>34</b>
<b>2.7.2</b>	<i>Diagrama de blocos e funcionamento</i>	<b>35</b>
<b>2.7.3</b>	<i>Configuração de pinos</i>	<b>35</b>
<b>2.7.4</b>	<i>Registos de medição</i>	<b>36</b>
<b>2.7.5</b>	<i>Circuito de aplicação e equações de conversão</i>	<b>36</b>
<b>2.7.5.1</b>	<i>Amostragem com resistor</i>	<b>36</b>
<b>2.7.5.2</b>	<i>Amostragem com transformadores de corrente (CT) e potencial (PT)</i>	<b>37</b>
<b>2.7.5.3</b>	<i>Função de anti-creep</i>	<b>37</b>
<b>2.7.6</b>	<i>Boas práticas de layout PCB</i>	<b>37</b>
<b>2.7.7</b>	<i>Aplicações e conclusões</i>	<b>38</b>
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	<b>39</b>

3.1	<b>Energy and Power Quality Measurement for Electrical Distribution in AC and DC Microgrid Buildings (Gerber <i>et al.</i>, 2022)</b> . . . . .	39
3.2	<b>Generating Realistic Load Profiles in Smart Grids: An Approach Based on Nonlinear Independent Component Estimation (NICE) and Convolutional Layers (Silva <i>et al.</i>, 2023)</b> . . . . .	39
3.3	<b>Challenges and Opportunities in European Smart Buildings Energy Management: A Critical Review (Hernández <i>et al.</i>, 2024)</b> . . . . .	40
3.4	<b>Development of an IoT Smart Energy Meter with Power Quality Features for a Smart Grid Architecture (Munoz <i>et al.</i>, 2024)</b> . . . . .	40
3.5	<b>Smart Campus—A Sketch (Min-Allah; Alrashed, 2020)</b> . . . . .	40
3.6	<b>Tabela Comparativa</b> . . . . .	40
4	<b>METODOLOGIA</b> . . . . .	42
4.1	<b>Modelo do Sistema</b> . . . . .	42
4.1.1	<i>Premissas e limitações</i> . . . . .	43
4.2	<b>Coleta de grandezas elétricas e condicionamento</b> . . . . .	44
4.2.1	<i>Filtragem analógica e adequação de amplitude</i> . . . . .	44
4.2.1.1	<i>Filtro passa-baixa (RC)</i> . . . . .	44
4.2.1.2	<i>Filtro passa-alta (acoplamento capacitivo)</i> . . . . .	45
4.2.2	<i>Digitalização e comunicação com o BL0942</i> . . . . .	46
4.2.3	<i>Calibração e fatores de escala</i> . . . . .	46
4.3	<b>Exportação do vetor e pós-processamento em Python</b> . . . . .	46
4.4	<b>Publicação HTTP Post e estrutura dos dados</b> . . . . .	47
4.5	<b>Ambiente experimental e metodologia de validação</b> . . . . .	47
4.6	<b>Desenvolvimento da placa embarcada</b> . . . . .	48
5	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> . . . . .	50
5.1	<b>Configuração experimental e instrumentos de referência</b> . . . . .	50
5.2	<b>Condicionamento de Sinais e Integração de Hardware</b> . . . . .	51
5.2.1	<i>Canal de tensão (ZMPT101B) e interface com o BL0942</i> . . . . .	52
5.2.2	<i>Observações de validação em bancada</i> . . . . .	53
5.3	<b>Leituras RMS e grandezas de potência</b> . . . . .	54
5.4	<b>Discretização da forma de onda e análise espectral (FFT em Python)</b> . . . . .	56
5.5	<b>Validação por instrumentação de bancada</b> . . . . .	59

<b>5.6</b>	<b>Discussão, limitações e próximos testes . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>5.7</b>	<b>Considerações finais do capítulo . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>61</b>
<b>6.1</b>	<b>Trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>64</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O monitoramento e a análise da qualidade da energia elétrica são fundamentais para garantir a eficiência e segurança dos sistemas elétricos. Com a crescente demanda energética, torna-se essencial desenvolver soluções que possibilitem a aquisição e processamento de sinais elétricos, facilitando a detecção de anomalias e contribuindo para a otimização do consumo energético (Munoz *et al.*, 2024; Min-Allah; Alrashed, 2020).

Estudos recentes demonstram a importância do monitoramento inteligente da energia elétrica e a necessidade de ferramentas eficientes para essa finalidade. Os Autores (Munoz *et al.*, 2024) desenvolveram um medidor de energia IoT para redes elétricas inteligentes, permitindo medições detalhadas de harmônicos e potência reativa, o que reforça a importância da análise espectral presente neste trabalho. Além disso, Min-Allah et al. (Min-Allah; Alrashed, 2020) propuseram um modelo de campus inteligente baseado em redes elétricas sustentáveis, evidenciando o impacto de sistemas de monitoramento na gestão eficiente da energia.

No campo do monitoramento não intrusivo, (Liu *et al.*, 2024) propuseram um modelo baseado em *Factorial Hidden Markov Models* (FHMM) para análise de consumo energético residencial, demonstrando a eficácia de modelos matemáticos para desagregação de carga.

Complementando essa abordagem, (Liu *et al.*, 2024) exploraram o uso de modelos probabilísticos avançados (como os Modelos Ocultos de Markov Fatoriais) para a desagregação e otimização do monitoramento energético em residências inteligentes, destacando a relevância do processamento de dados comportamentais (Internet of Behavior) para a melhoria da eficiência.

Outras pesquisas recentes enfatizam a importância da qualidade dos dados e da inteligência artificial na gestão energética (Aguilar *et al.*, 2021) e (Lillstrang *et al.*, 2022) discutem a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina e a integridade dos dados de sensores, ressaltando que análises detalhadas são cruciais para garantir a confiabilidade das aplicações em edifícios inteligentes. No âmbito da implementação física, Munoz et al. (Munoz *et al.*, 2024) e García-Monge et al. (García-Monge *et al.*, 2023) demonstraram que a integração de medidores IoT dedicados com sistemas de monitoramento contínuo fornece diagnósticos mais precisos, auxiliando diretamente no desenvolvimento de estratégias de controle e eficiência operacional.

Neste contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento e análise em tempo real de corrente e tensão em circuitos de corrente alternada (AC). O sistema utiliza um sensor de corrente não invasivo de base dividida PZKHCT de 100A, adaptado

para medições, com a leitura dos sinais aprimorada por meio de um chip de energia BL0942, otimizando a leitura analógica-digital (ADC) para a placa microcontroladora. A coleta ocorre de forma *online*, permitindo a recepção dos sinais em tempo real, embora o envio dos dados não ocorra imediatamente. A validação do sistema é realizada por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), permitindo a análise espectral dos sinais e a extração de parâmetros elétricos essenciais, como potência ativa, reativa e aparente, além da detecção de distorções harmônicas e valores de pico.

Com base nesses estudos, este trabalho busca contribuir com a área de monitoramento elétrico ao desenvolver um sistema acessível e eficiente para análise em tempo real de corrente e tensão AC. A proposta visa oferecer uma solução prática para identificação de variações e anomalias na rede elétrica, permitindo a implementação de estratégias de eficiência energética e manutenção preditiva em diferentes aplicações.

## 1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de monitoramento e análise online da corrente e tensão, utilizando sensores e processamento digital para capturar, calcular e comparar parâmetros elétricos, garantindo maior precisão na avaliação da qualidade da energia elétrica.

## 1.2 Objetivos Específicos

1. Implementar a leitura e captura de dados elétricos provenientes de sensor corrente e tensão, garantindo a aquisição precisa dos valores de corrente e tensão em um circuito AC.
2. Realizar a discretização e o processamento digital das amostras, com foco na análise das componentes harmônicas
3. Estabelecer um critério de validação dos dados coletados, garantindo que apenas medições confiáveis sejam utilizadas para os cálculos elétricos subsequentes.
4. Executar os cálculos de potência ativa, reativa e aparente, permitindo uma avaliação detalhada do comportamento da energia elétrica no circuito monitorado.
5. Analisar as distorções harmônicas.
6. Verificar a confiabilidade do sistema por validação matemática das potências e por análise qualitativa da forma de onda de corrente, observando distorções e variações conforme o tipo de carga.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, apresentam-se os fundamentos teóricos necessários para a compreensão do trabalho desenvolvido. A Seção 2.1 discorre sobre a qualidade de energia elétrica e seus principais indicadores, definindo conceitos fundamentais como potência ativa, reativa e aparente, fator de potência, além de abordar a influência da frequência e do valor de pico nos sistemas elétricos. Na sequência, a Seção 2.2 aborda o monitoramento de cargas elétricas, contextualizando as técnicas de Monitoramento Não Intrusivo de Carga (NILM) e detalhando o funcionamento de sensores, com ênfase no sensor de corrente não intrusivo PZKHCT e suas equações de transformação. Já, a Seção 2.3 trata dos sistemas embarcados de forma geral. Logo, a Seção 2.4 trata dos sistemas embarcados aplicados ao monitoramento de energia, apresentando as características de processamento e conectividade do microcontrolador ESP32-C6-WROOM-1, escolhido para este projeto. Posteriormente, a Seção 2.5 explora os conceitos de conversão analógico-digital (ADC). Em seguida a Seção 2.6 explora a fundamentação matemática da Transformada Rápida de Fourier (FFT), essencial para a análise espectral de sinais. Por fim, a Seção 2.7 detalha as especificações técnicas, registros e modos de operação do circuito integrado de medição de energia BL0942, abordando sua arquitetura interna e interfaces de comunicação.

### 2.1 Qualidade de Energia Elétrica

A qualidade de energia elétrica é um aspecto importante da engenharia elétrica e da gestão de energia, que se refere à manutenção de fornecimento elétrico dentro de parâmetros que garantem a segurança e eficiência dos equipamentos elétricos. Ela é caracterizada por um conjunto de fatores como a estabilidade da tensão e frequência, a simetria das fases, a pureza da forma de onda e a confiabilidade do fornecimento. Como destacado em Rodríguez-Pajarón *et al.* (2020), diferentes classificações de transformadores impactam diretamente nos índices de qualidade de energia, como desequilíbrio de tensão e distorção harmônica total (THD), elementos essenciais na avaliação da qualidade de fornecimento em redes residenciais de baixa tensão.

Os problemas relacionados à qualidade de energia, incluindo variações de tensão, distúrbios transitórios, interrupções, flutuações de frequência e distorções harmônicas, podem gerar danos aos dispositivos, reduzir a eficiência operacional e aumentar os custos com manutenção. Como evidenciado por Buddhi *et al.* (2022), a implementação de Filtros de Potência Ativos Shunt (SAPF) é uma das maneiras mais eficientes de mitigar harmônicos em um sistema

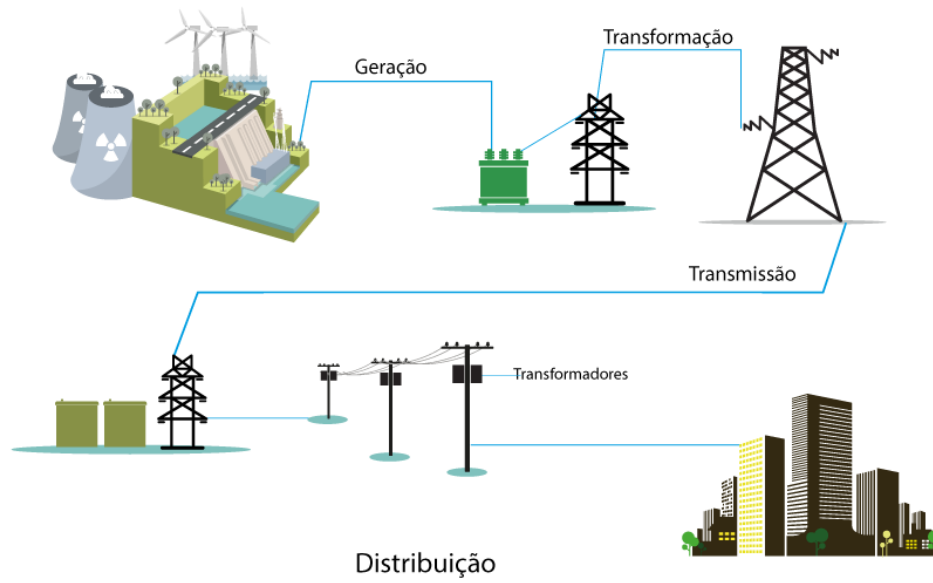
de energia, abordando um dos distúrbios mais preocupantes nas redes residenciais.

Diversas medidas podem ser adotadas para melhorar a qualidade da energia, como a utilização de filtros, condicionadores de linha, sistemas UPS e reguladores de tensão. Desse modo, o monitoramento contínuo e o diagnóstico de problemas de qualidade também são essenciais para uma gestão eficaz, permitindo intervenções proativas para mitigar impactos adversos. Com a nova metodologia proposta por Meitei *et al.* (2021) para relatar análise harmônica em sistemas de distribuição ressalta a necessidade de abordagens de análise de dados mais abrangentes, que ajudam a gerenciar os grandes volumes de dados provenientes de instrumentos de medição e melhorar a qualidade geral da energia.

Além disso, a resposta à demanda (Demand Response - DR) surge como uma estratégia importante, conforme discutido por Gado *et al.* (2023). Este artigo destaca como a integração de DR às operações dos microgrids ajuda a estabilizar a carga na rede, reduzindo a necessidade de novas instalações de geração de energia e minimizando impactos ambientais adversos. Com isso, o DR beneficia tanto operadores de sistemas de transmissão quanto de distribuição ao melhorar a confiabilidade da transmissão, gerenciar restrições da rede e melhorar a qualidade do serviço (Gado *et al.*, 2023).

A importância de manter uma boa qualidade de energia é amplamente reconhecida por regulamentações globais, que impõem padrões rigorosos a serem seguidos pelos fornecedores de energia. Desta maneira, fazendo com que o cumprimento dessas normas não só evita penalidades, mas também garante a satisfação dos consumidores e a eficiência energética, contribuindo para a sustentabilidade e a responsabilidade ambiental.

Figura 1 – Fluxo simplificado de geração e distribuição de energia



Fonte: baseado em (UFJF, 2024).

### 2.1.1 Potência

A potência elétrica é um conceito central na engenharia elétrica, essencial para o funcionamento e análise de sistemas elétricos. Nos últimos anos, pesquisas têm se concentrado em otimizar o uso da potência elétrica para melhorar a eficiência energética e a sustentabilidade dos sistemas de energia. Por exemplo, estudos publicados do trabalho de (Juliani *et al.*, 2023), as concessionárias de energia no Brasil tarifam clientes de média e alta tensão com base em sua demanda de potência, sendo a otimização dessa demanda essencial para reduzir os custos com tarifas.

#### 2.1.1.1 Potência Ativa

A potência ativa é a quantidade de energia elétrica que é efetivamente convertida em trabalho útil ou calor em um circuito, sendo medida em Watts (W). Ela representa o consumo real de energia e está diretamente relacionada à eficiência dos sistemas elétricos. Essa grandeza surge da relação entre corrente e tensão em um determinado intervalo de tempo, e seu cálculo é fundamental para o dimensionamento adequado de equipamentos elétricos. Em sistemas de energia renovável, a otimização da potência ativa é crucial para aumentar a eficiência operacional (Boylestad, 2012). Pode-se definir a potência conforme a equação (2.1).

$$W = V \cdot I \cdot \cos(\phi) [W] \quad (2.1)$$

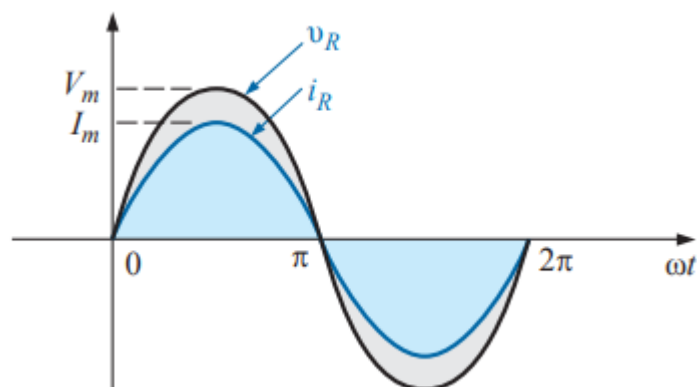
### 2.1.1.2 Potência Reativa

A potência reativa, medida em volt-ampere reativo (var), é a parte da potência que oscila entre a fonte e a carga sem ser convertida em trabalho útil. Ela está associada aos campos magnéticos e elétricos necessários para o funcionamento de equipamentos como motores e transformadores. Assim, a gestão eficaz da potência reativa é essencial para melhorar a qualidade da energia e reduzir perdas no sistema elétrico.

Estudos recentes, como Filho *et al.* (2021) sugerem, a injeção de potência reativa em uma rede de distribuição elétrica por meio de inversores fotovoltaicos pode contribuir significativamente para a regulação da tensão e a minimização de perdas elétricas. Com isso, o estudo propõe um algoritmo de controle que utiliza a geração fotovoltaica para injetar potência reativa de forma distribuída, destacando-se por obter os menores níveis de perda e o melhor perfil de tensão nos cenários simulados em uma rede monofásica rural.

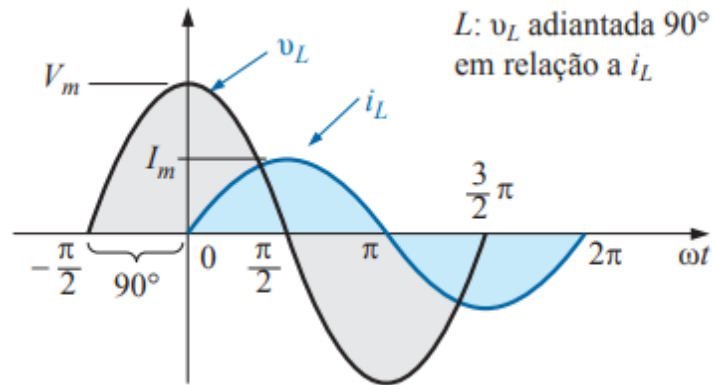
Portanto, a potência reativa é gerada pela presença de elementos reativos em um circuito, como indutores e capacitores, que acumulam energia de forma temporária. Dessa maneira, ela se caracteriza, graficamente, pelo deslocamento entre as curvas de corrente e tensão, evidenciando um avanço ou atraso da corrente em relação à tensão. Por fim, quando ambas estão em fase, ou seja, atingem o ponto zero simultaneamente, diz-se que estão perfeitamente alinhadas (Boylestad, 2012).

Figura 2 – Gráfico de corrente e tensão em um circuito puramente resistivo.



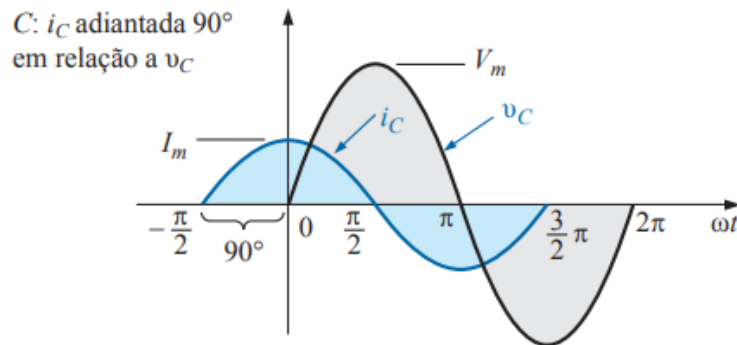
Fonte: (Boylestad, 2012)

Figura 3 – Gráfico de corrente e tensão em um circuito puramente indutivo (com indutor).



Fonte: (Boylestad, 2012)

Figura 4 – Gráfico de corrente e tensão em um circuito puramente capacitivo (com capacitor).



Fonte: (Boylestad, 2012)

Na Figura 2, a curva preta representa a tensão  $v_R$  e a senoide azul representa a corrente  $i_R$  em um circuito puramente resistivo. Nesse caso, a corrente e a tensão estão em fase, ou seja, ambas atingem seus valores máximos e mínimos ao mesmo tempo, conforme a equação (2.2).

$$v_R(t) = V_m \sin(\omega t) \quad \text{e} \quad i_R(t) = I_m \sin(\omega t) \quad (2.2)$$

Portanto, na Figura 2 não há deslocamento de fase entre as duas grandezas, e a potência ativa é a única potência presente.

A Figura 3, a senoide preta representa a tensão  $v_L$  em um indutor e a senoide azul representa a corrente  $i_L$ . Em um circuito puramente indutivo, a tensão está adiantada em 90 graus em relação à corrente:

Esse atraso ocorre porque os indutores armazenam energia no campo magnético, gerando potência reativa.

Por fim, a Figura 4, a senoide preta mostra a tensão  $v_C$  em um capacitor (equação (2.4)), enquanto a senoide azul mostra a corrente  $i_C$  (equação (2.5)). Em um circuito puramente capacitivo, a corrente está adiantada em 90 graus em relação à tensão.

$$v_C(t) = V_m \sin(\omega t) \quad (2.4)$$

em que  $V_m$  é a tensão do circuito puramente resistivo, em função do seno,  $\sin(\omega t)$ , que descreve o comportamento oscilatório da tensão ao longo do tempo.

$$i_C(t) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.5)$$

onde  $I_m$  é a corrente do circuito puramente resistivo, em função seno com um deslocamento de fase de 90 graus,  $\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ .

Neste caso, os capacitores armazenam energia em seu campo elétrico, também produzindo *potência reativa*.

Dessa maneira, após esse entendimento sobre a energia que oscila no sistema sem realizar trabalho útil, vale comentar também sobre outros fatores que afetam o comportamento da potência reativa, como, a frequência de operação que refere-se ao número de ciclos completos que uma onda alternada realiza por segundo, expressa em hertz (Hz) e o valor de pico é a amplitude máxima de uma onda alternada. Assim, ele indica o ponto mais alto que a tensão ou corrente atinge em um ciclo completo. Já para ondas senoidais, o valor de pico ( $V_p$ ) está relacionado ao valor eficaz (RMS) conforme a equação (2.6).

$$V_p = \sqrt{2} \cdot V_{rms} \quad (2.6)$$

Portanto, a frequência de operação e o valor de pico estão diretamente relacionados ao comportamento da corrente e da tensão em circuitos CA (corrente alternada). A frequência afeta a reatância de indutores e capacitores no circuito, alterando a quantidade de corrente reativa presente. A potência reativa, por sua vez, é influenciada pela fase entre corrente e tensão, modulada pela frequência.

Além disso, o valor de pico determina a magnitude máxima da corrente ou tensão, que afeta diretamente a potência reativa, especialmente em circuitos que contêm componentes reativos (indutores e capacitores). Dessa forma, a frequência de operação e o valor de pico são cruciais para o controle e a eficiência dos sistemas elétricos.

### 2.1.1.3 Potência Aparente

A potência aparente, medida em volt-ampères (VA), representa a totalidade da energia fornecida a um circuito de corrente alternada. Ela inclui tanto a energia efetivamente consumida quanto a que é temporariamente armazenada em elementos reativos, como indutores e capacitores. Essa potência é obtida pela soma vetorial entre a potência ativa e a potência reativa.

Para simplificar a análise de circuitos elétricos em regime senoidal, utiliza-se a representação matemática chamada fasor. Fasores permitem a visualização de grandezas senoidais, como a tensão e a corrente alternada, no domínio da frequência, facilitando os cálculos em comparação ao uso direto das funções senoidais no domínio do tempo.

Além disso, a potência aparente desempenha um papel crucial na especificação da capacidade máxima de componentes e sistemas elétricos em circuitos de corrente alternada senoidal (Boylestad, 2012). A equação para calcular a potência aparente é,

$$S = V \cdot I^* \quad (2.7)$$

Onde  $V$  e  $I$  são valores eficazes (RMS) representados no domínio fasorial, esta fórmula,  $S$  representa a potência aparente, expressa em volt-ampères (VA). O termo  $V$  refere-se à tensão complexa aplicada ao circuito, enquanto  $I^*$  é o conjugado da corrente complexa. O uso do conjugado da corrente,  $I^*$ , é necessário para calcular corretamente a potência aparente, pois ele ajusta a fase entre a tensão e a corrente no circuito.

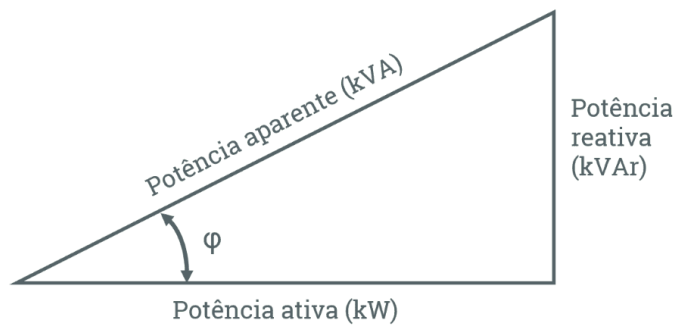
A operação de multiplicação complexa entre  $V$  e  $I^*$  reflete a relação vetorial entre a tensão e a corrente em sistemas de corrente alternada. Esta equação fornece uma visão abrangente da energia fornecida ao circuito, incluindo tanto a potência ativa, que é a energia efetivamente consumida pelos componentes resistivos, quanto a potência reativa, que é a energia armazenada e devolvida ao sistema por elementos reativos, como capacitores e indutores.

A análise de  $S$  é fundamental para avaliar o desempenho e a capacidade de sistemas elétricos em corrente alternada, permitindo determinar a energia total entregue ao circuito.

Esses valores de potência são fontes importantes de informação e podem contribuir para aumentar a eficiência no uso da energia elétrica. Um exemplo é quando a potência aparente excede a potência ativa, indicando a presença de potência reativa, que não realiza trabalho útil.

Com base na obtenção desses valores de potência, é possível representar a relação entre as potências mencionadas por meio de um triângulo, conforme ilustrado na Figura 5, e calcular o fator de potência.

Figura 5 – Triângulo das potências.



Fonte: (LUTERLED, 2024)

O fator de potência indica a eficácia com que a energia elétrica é utilizada. Assim, o ângulo  $\varphi$  na Figura 5 mostra a defasagem entre a potência ativa e a potência aparente. Desta maneira, o fator de potência pode ser determinado pelo cosseno desse ângulo ou pela divisão da potência ativa pela aparente. Com isso, esse índice é crucial para avaliar a eficiência do consumo energético, pois um fator de potência baixo implica desperdício de energia e custos adicionais devido à presença de potência reativa que não contribui para o trabalho útil. (LUTERLED, 2024)

$$FP = \frac{kW}{kVA} \quad (2.8)$$

Dessa maneira, o fator de potência (FP) é a relação entre a potência ativa (kW) e a potência aparente (kVA), indicando a eficiência com que a energia elétrica é utilizada em um sistema, conforme a equação (2.8). Assim, um FP próximo de 1 significa que quase toda a energia fornecida está sendo convertida em trabalho útil, enquanto valores mais baixos indicam a presença de energia reativa, resultando em ineficiência. Segundo, a Resolução Normativa N° 414/2010 da ANEEL exige um FP mínimo de 0,92 para pontos comerciais, dessa maneira, valores abaixo disso podem resultar em multas. Portanto, é fundamental manter o FP elevado para otimizar o uso da energia e evitar penalidades. (ANEEL, 2017). Mesmo em instalações residenciais, ainda

que não exista obrigação de atender ao fator de potência exigido para unidades consumidoras do grupo A, permanecem os problemas elétricos inerentes à rede, como aumento de perdas, aquecimento de condutores, maior demanda de corrente e possíveis distorções harmônicas. Desta maneira, que podendo afetar o desempenho e a eficiência dos equipamentos.

## 2.2 Monitoramento de Cargas Elétricas

O monitoramento de cargas elétricas em ambientes industriais e residenciais é um campo crucial para a gestão eficiente da energia. Assim, nos últimos anos, técnicas avançadas de desagregação de cargas não-intrusivas (NILM) têm sido exploradas para identificar e monitorar o consumo de energia de aparelhos individuais a partir de um único ponto de medição, sem necessidade de instalação de sensores adicionais em cada aparelho (Aravind; Sarath, 2022).

Um dos métodos promissores no campo de NILM é o uso de redes neurais Long Short-Term Memory (LSTM), que se mostram eficazes na desagregação de cargas de resfriamento em instalações industriais, como evidenciado por (Eiraudó *et al.*, 2022). Eles aplicaram um método inovador que combina decomposição baseada em literatura com um algoritmo de decomposição baseado em rede neural LSTM para avaliar a demanda de resfriamento em edifícios de telecomunicações (Eiraudó *et al.*, 2022).

Por outro lado, Aravind e Sarath (2022), investigaram a eficácia de diferentes arquiteturas de aprendizado profundo, como redes neurais convolucionais (CNN) e Bi-GRU, na desagregação do consumo de energia em edifícios residenciais, usando o dataset UKDALE. Assim, os resultados mostram que as arquiteturas complexas do Bi-GRU identificam melhor aparelhos com atividades esporádicas, enquanto CNN teve um desempenho superior em aparelhos que exibem periodicidade (Aravind; Sarath, 2022).

Estas técnicas de NILM não apenas facilitam a monitorização do consumo de energia em tempo real, mas também permitem ações eficientes de gestão de energia, otimizando o uso e reduzindo potencialmente os custos associados (Eiraudó *et al.*, 2022). Assim, a integração de tais tecnologias promove uma maior consciência energética e suporta iniciativas de eficiência energética em diversos setores (Stephen *et al.*, 2022).

Através destas inovações, o monitoramento de cargas elétricas está se tornando uma prática mais acessível e menos intrusiva, contribuindo significativamente para a sustentabilidade e eficiência energética global (Aravind; Sarath, 2022).

### 2.2.1 Sensores

Segundo Amurim (2022), os sensores desempenham um papel crucial na aquisição de dados em diferentes contextos, capturando e processando informações para detectar mudanças em ambientes físicos. Assim, quando ocorre uma alteração no ambiente monitorado, o sensor gera uma resposta, geralmente na forma de um sinal elétrico.

Desta maneira, atualmente, há uma ampla variedade de sensores disponíveis, adaptados para diferentes projetos de IoT. Com isso, esses sensores podem ser classificados com base em diversas características, como especificações técnicas, método de conversão, material de fabricação, fenômeno físico de detecção, propriedades medidas e campo de aplicação.

Portanto, de modo similar à abordagem de Amurim (2022), este projeto utiliza um sensor de corrente não intrusivo. Contudo, optou-se pelo modelo PZKHCT, com a finalidade de capturar as amostras de corrente em diferente amplitude no condutor que conecta o equipamento a ser identificado à rede elétrica.

#### 2.2.1.1 Sensor de Corrente PZKHCT

No trabalho de Amurim (2022) é relatado que os sensores Split-core Current Transformer (SCT) utilizam o princípio do eletromagnetismo para medir correntes elétricas de forma não intrusiva, sendo amplamente aplicados em sistemas de monitoramento. Assim, o modelo PZKHCT, por exemplo, possui um núcleo dividido, o que permite sua instalação sem a necessidade de interromper o circuito elétrico. Como pode ser observado na Figura 6

Com isso, o funcionamento se baseia na Lei de Ampère, que estabelece que a corrente elétrica em um fio gera um campo magnético ao seu redor, e na Lei de Faraday, que descreve a indução de uma força eletromotriz em uma bobina quando submetida a um campo magnético variável. Portanto, a composição do sensor é ponderado por dois núcleos magnéticos, o primário, formado pelo fio condutor da corrente, e o secundário, que contém uma bobina com 1000 espiras que pode ser observado na Figura 6. Com isso, sendo o valor da corrente medido pelo sensor é proporcional ao número de espiras da bobina secundária, como descrito pela equação dos transformadores:

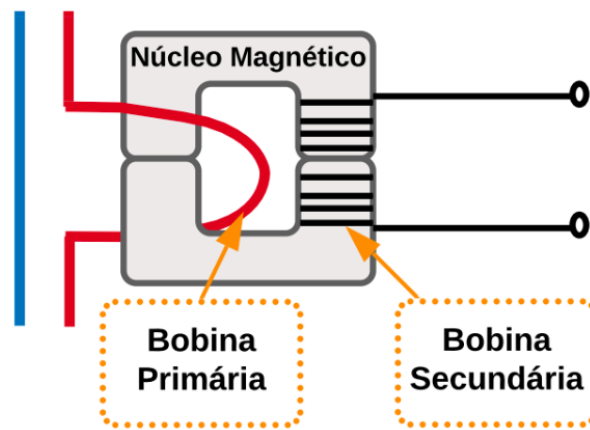
$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.9)$$

onde  $N_1$  é o número de espiras do primário (1 espira),  $N_2$  é o número de espiras

do secundário (1000 espiras),  $I_1$  é a corrente no fio condutor, e  $I_2$  é a corrente induzida na bobina. Com isso, o sensor *PZKHCT* foi projetado para medir correntes de até 100 A RMS, fornecendo uma saída proporcional de 100 mA RMS.

Além de sua precisão, outra vantagem é o fato de ser um dispositivo "não invasivo", pois não há necessidade de interromper o fio elétrico para realizar a medição, tornando sua instalação segura e prática. Isso faz com que os sensores de núcleo dividido sejam amplamente utilizados em automação, medição de consumo de energia e sistemas de proteção elétrica, devido à sua versatilidade e confiabilidade.

Figura 6 – Arquitetura do Sensor PZKHCT



Fonte: baseado em (Amurim, 2022).

### 2.3 Sistemas Embarcados

Nesta seção é relatado sobre sistemas embarcados que são dispositivos especializados com hardware e software integrados que operam de maneira contínua e confiável, frequentemente em tempo real. Segundo Rosário (2012), esses sistemas têm aplicações em áreas como automação industrial, automotiva e dispositivos de consumo. Além disso, de acordo com Corrêa (2007), a otimização de recursos, como processamento e consumo de energia, é crucial, pois sistemas embarcados são tipicamente limitados em termos de hardware e precisam operar em ambientes restritivos, garantindo alta eficiência e confiabilidade.

Em vista disso, o autor Amurim (2022) cita que na atualidade, existe diversas placas de desenvolvimento são oferecidas tanto pela comunidade quanto por fabricantes. Assim, entre elas, destacam-se aquelas desenvolvidas pela Texas Instruments (como BeagleBoard e Beagle-

Bone), Raspberry Pi, Arduino e Espressif,STM, que têm ganhado maior popularidade.Com isso, na escolha da placa ideal para um projeto de sistema embarcado, é essencial considerar variáveis como a capacidade de memória (RAM e Flash), a quantidade de pinos de entrada/saída de propósito geral (GPIO), a arquitetura do núcleo de processamento (microprocessador ou microcontrolador), sistemas operacionais compatíveis, conectividade, suporte técnico e compatibilidade com sensores e atuadores (Games; Smith, 2020). Além disso, o custo é um fator crucial, especialmente quando se considera a escalabilidade do projeto.

### **2.3.1 *Microcontrolador ESP32-C6-Wroom-1***

A ESP32-C6-WROOM-1 é um microcontrolador da família ESP32, desenvolvido pela Espressif Systems, amplamente utilizado em sistemas embarcados devido à sua alta performance, conectividade avançada e eficiência energética. Baseado na arquitetura RISC-V de 32 bits, o ESP32-C6-WROOM-1 é uma solução poderosa e versátil, aplicada em diversas áreas, incluindo automação residencial, monitoramento industrial, IoT (Internet das Coisas) e dispositivos inteligentes.

Uma das principais características do ESP32-C6-WROOM-1 é sua frequência de operação de 160 MHz, proporcionando um desempenho computacional robusto para aplicações em tempo real. O microcontrolador possui 512 KB de SRAM e suporte para até 8 MB de Flash, permitindo o armazenamento eficiente de programas e dados. Além disso, oferece múltiplas interfaces de comunicação, como Wi-Fi 6 (2,4 GHz), Bluetooth 5 (LE), IEEE 802.15.4 (suporte a Zigbee/Thread) e interfaces tradicionais como UART, SPI, I2C e I2S, facilitando a integração com sensores, atuadores e outros dispositivos essenciais para sistemas de monitoramento e controle.

Em projetos de automação e monitoramento residencial, o ESP32-C6-WROOM-1 tem sido amplamente utilizado devido à sua capacidade de processar e transmitir dados de sensores ambientais de maneira eficiente. Por exemplo, em um sistema de monitoramento residencial, este microcontrolador pode coletar e processar dados de sensores como o DHT22 (para temperatura e umidade), BH1750 (para medição de luminosidade) e MQ135 (para qualidade do ar), enviando as informações para um servidor remoto via Wi-Fi 6 ou protocolos de baixo consumo como Zigbee.

Além disso, a ESP32-C6-WROOM-1 pode ser combinada com módulos LoRa ou MQTT, permitindo a transmissão segura dos dados monitorados para uma aplicação móvel ou um



partir de um único ponto de medição. Isso é possível através de medidores inteligentes que integram funcionalidades de análise de carga, otimizando o consumo de energia em tempo real e promovendo a eficiência energética através da identificação precisa do uso de energia de cada aparelho dentro de um edifício ou residência (Cheng *et al.*, 2022).

Esses sistemas podem, por exemplo, distinguir o consumo de diferentes dispositivos com base em suas assinaturas de carga únicas, facilitando a identificação e o monitoramento de padrões de consumo sem a necessidade de instalar sensores individuais em cada aparelho. Isso não apenas reduz os custos de hardware, mas também minimiza a intrusão e a complexidade da instalação (Cheng *et al.*, 2022).

Além disso, a integração de técnicas avançadas como redes neurais ResNet-seq2seq melhora significativamente a precisão da desagregação de carga. Essas redes lidam com problemas de degradação do modelo e desvanecimento do gradiente à medida que a profundidade da rede aumenta, o que é essencial para manter a precisão em sistemas complexos de monitoramento de energia (Zhang *et al.*, 2023).

Os sistemas também se beneficiam da aplicação de técnicas de pós-processamento, que ajustam e refinam os dados de saída da rede para melhorar a precisão da desagregação. Isso é crítico para assegurar que os dados de consumo reportados reflitam com precisão o uso real de energia, permitindo que os gestores de energia implementem estratégias mais eficazes para economia de energia (Zhang *et al.*, 2023).

Finalmente, os sistemas embarcados de monitoramento de energia são projetados para serem altamente escaláveis e adaptáveis a diferentes ambientes e necessidades de monitoramento. Eles oferecem uma solução versátil que pode ser facilmente integrada a sistemas de gestão de edifícios inteligentes, contribuindo para o avanço geral da eficiência energética e gestão sustentável de recursos (Metallidou *et al.*, 2020).

Cada uma dessas características fundamenta a aplicação de sistemas embarcados no monitoramento de energia, destacando a sua importância e eficácia em um mundo cada vez mais focado na otimização de recursos e sustentabilidade.

Desta maneira, este trabalho não implementa técnicas de NILM baseadas em aprendizado de máquina, limitando-se à extração de características elétricas fundamentais que podem servir como base para tais métodos.

## 2.5 Conversor Analógico-Digital

Os conversores analógico-digitais (ADC) desempenham um papel crucial em sistemas modernos, convertendo sinais analógicos contínuos em dados digitais discretos que podem ser processados por sistemas eletrônicos. Essa funcionalidade é amplamente usada em áreas como instrumentação, controle automático e sistemas de comunicação. A precisão e o desempenho de um ADC dependem de vários fatores, incluindo a resolução, a taxa de amostragem e a capacidade de minimizar distorções durante a conversão, como observado nos estudos de (Torshin *et al.*, 2022).

Outro aspecto importante abordado por Torshin *et al.* (2022) é a precisão do conversor em termos de SFDR (faixa dinâmica livre de espúrios) e o número efetivo de bits (ENOB). Eles demonstraram como a degradação desses parâmetros pode afetar diretamente a funcionalidade do ADC sob condições de radiação, usando o método de teste FFT para calcular essas métricas e observar suas variações ao longo do tempo.

Assim, a importância dos ADCs se destaca em sistemas de aquisição de dados, onde parâmetros como resolução, faixa de tensões e frequência de amostragem são críticos para garantir a precisão necessária ao projeto. Por exemplo, a resolução de um ADC define o número de níveis discretos ao longo da faixa de valores analógicos permitida. ADCs de 16 bits, como o descrito no estudo sobre os efeitos de dose total de ionização, oferecem 65.536 níveis possíveis, o que proporciona uma alta precisão, especialmente em aplicações que envolvem sinais de baixa amplitude (Torshin *et al.*, 2022).

Adicionalmente, as tecnologias modernas de ADCs, como as abordadas no artigo sobre "Dynamic Predictive Sampling", visam otimizar o processo de amostragem e conversão, especialmente para sinais esparsos. Essa abordagem reduz o número de pontos amostrados sem comprometer a integridade do sinal, economizando energia e diminuindo a quantidade de dados a serem processados. Isso é especialmente relevante em aplicações de sensores biomédicos e IoT, onde a economia de energia é essencial (Tang *et al.*, 2023).

Portanto, para selecionar um ADC adequado para um projeto, é crucial considerar a aplicação e o ambiente onde será utilizado, especialmente em cenários que envolvem alta exposição à radiação. A compreensão detalhada dos parâmetros de precisão e a capacidade de realizar testes rigorosos sob diferentes condições são essenciais para garantir que o ADC escolhido possa fornecer resultados precisos e confiáveis.

## 2.6 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é um algoritmo eficiente para calcular a Transformada Discreta de Fourier (DFT), reduzindo significativamente o número de operações necessárias para converter um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. Segundo Lathi (1998), a DFT é definida matematicamente pela equação:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j2\pi kn/N}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.10)$$

onde  $X[k]$  representa os coeficientes espectrais do sinal discreto  $x[n]$ ,  $N$  é o número total de amostras e  $e^{-j2\pi kn/N}$  é o termo exponencial complexo que realiza a decomposição do sinal em suas componentes de frequência. O cálculo direto dessa equação exige  $O(N^2)$  operações, o que se torna inviável para grandes conjuntos de dados.

Para otimizar esse processamento, a FFT, proposta inicialmente por Cooley e Tukey, reduz a complexidade computacional para  $O(N \log N)$  ao dividir a DFT em subsequências menores, explorando a simetria e periodicidade da função exponencial complexa. Como destacado por Lathi (1998), a FFT é particularmente útil na análise espectral de sinais em sistemas de comunicação, permitindo a identificação e filtragem de componentes espectrais indesejadas. Um dos métodos mais conhecidos é a FFT baseada na decomposição em tempo (DIT-FFT), onde o sinal é subdividido recursivamente em partes pares e ímpares, possibilitando uma computação mais eficiente:

$$X[k] = X_{\text{par}}[k] + e^{-j2\pi k/N} X_{\text{ímpar}}[k] \quad (2.11)$$

Essa abordagem é amplamente aplicada em telecomunicações, processamento de áudio, imagens e até na solução de equações diferenciais em engenharia. Além disso, a FFT é essencial em aplicações de tempo real, como radares, compressão de dados e síntese de voz. Em seu estudo sobre sistemas de comunicação, Lathi (1998) enfatiza que a capacidade de analisar sinais no domínio da frequência com alta eficiência computacional torna a FFT uma ferramenta indispensável para engenheiros e cientistas da computação, permitindo uma melhor compreensão e manipulação das características espectrais de sinais digitais.

## 2.7 BL0942 – Circuito integrado de medição sem calibração

O BL0942 é um circuito integrado para medição de energia desenvolvido pela Shanghai Belling. Desta maneira, o chip possui dois conversores sigma–delta independentes (um para corrente e outro para tensão) integrados a um núcleo digital de medição de energia, permitindo medir corrente, tensão e potência com elevada precisão. Assim, segundo a folha de dados, o chip mede tensão e corrente instantâneas e calcula energia activa, possui uma saída de pulsos configurável proporcional à energia activa e saídas de cruzamento por zero para corrente e tensão Belling (2023). Além de que, o dispositivo inclui um detector de carga nula patenteado que inibe a contagem de energia quando há apenas ruído.

### 2.7.1 Características principais

A Tabela 1 resume as principais características destacadas na versão V1.06 da folha de dados e na nota de aplicação em chinês.

Tabela 1 – Características do BL0942

<b>Característica</b>	<b>Descrição</b>
ADCs	Dois conversores sigma–delta independentes (um para corrente e outro para tensão).
Faixa dinâmica	Erro < 0,1 % na medição de energia activa com uma dinâmica de 4000 : 1.
Corrente RMS	Faixa de corrente RMS de 10 mA a 30 A usando um resistor de amostragem de 1 mΩ.
Medição	Medição de corrente, tensão RMS, corrente RMS rápida, potência activa e forma de onda amostrada.
Fábrica	Erro de ganho de fábrica < 1 %, permitindo periféricos sem calibração se a precisão externa for adequada.
Detecção de sobrecorrente	Limite programável para sobrecorrente.
Saídas ZX_V / ZX_I	Saídas de cruzamento por zero da tensão e corrente.
Comunicação	Interface SPI (até 900 kHz) ou UART (4 800–38 400 bps). Os pinos SEL e SCLK_BPS seleccionam o modo.
Referência interna	Referência de 1,218 V e oscilador interno (~ 4 MHz).
Alimentação	3,3 V, consumo típico ~ 10 mW.
Package	Encapsulamentos SSOP-10L ou TSSOP-14L.

Fonte: baseado em Belling (2023).

### 2.7.2 Diagrama de blocos e funcionamento

O bloco interno inclui dois amplificadores de ganho programável (PGAs) para ajustar os sinais de entrada, dois moduladores sigma–delta que digitalizam as formas de onda de corrente e tensão e um núcleo DSP que calcula as grandezas RMS e a energia activa. Uma LDO interna gera a referência de 1,218 V, e um oscilador interno de cerca de 4 MHz fornece o clock, dispensando cristal externo. O chip comunica com microcontroladores através de UART ou SPI, o pino *SEL* selecciona o modo e *SCLK\_BPS* configura a taxa de comunicação. Há pinos para *CF1/CF2* (saídas de pulsos de energia ou alarme de sobrecorrente), *ZX* (cruzamento por zero) e *TX/RX* para dados.

### 2.7.3 Configuração de pinos

A Tabela 2 resume a função dos pinos no encapsulamento SSOP-10L segundo a nota de aplicação valores entre parênteses são para o encapsulamento TSSOP-14L.

Tabela 2 – Configuração dos pinos do BL0942

Pino	Nome	Função
1	<i>VDD</i>	Alimentação de 3,3 V.
2–3	<i>IP/IN</i>	Entrada diferencial da corrente; tensão máxima $\pm 42$ mV pico–a–pico (30 mV RMS).
4	<i>VP</i>	Entrada de tensão; tensão máxima $\pm 100$ mV pico–a–pico (70 mV RMS).
5	<i>GND</i>	Terra.
6	<i>CF1</i>	Saída de pulsos de energia ou alarme programado.
7 (10)	<i>SEL</i>	Selecciona UART (0) ou SPI (1); nível baixo com resistor de <i>pull–down</i> interno.
8	<i>SCLK_BPS</i>	Clock SPI ou configuração do baud da UART.
9	<i>RX/SDI</i>	Entrada UART (RX) ou entrada SPI; necessita <i>pull–up</i> em UART.
10	<i>TX/SDO</i>	Saída UART (TX) ou saída SPI; requer <i>pull–up</i> em UART.
CF2 (TSSOP-14)	<i>CF2</i>	Saída alternativa de energia/alarmes.
ZX (TSSOP-14)	<i>ZX</i>	Saída de cruzamento por zero.
A1/A2_NCS (TSSOP-14)	<i>A1/A2_NCS</i>	Definição de endereço para UART ou <i>chip–select</i> para SPI.

Fonte: baseado em Belling (2023).

### 2.7.4 Registos de medição

O BL0942 armazena as medidas em registos acessíveis via SPI ou UART. A Tabela 3 lista os principais registos e a sua função.

Tabela 3 – Registos de medição do BL0942

Endereço	Nome	Descrição
0x01	<i>I_WAVE</i>	Forma de onda da corrente, 20 bits com sinal.
0x02	<i>V_WAVE</i>	Forma de onda da tensão, 20 bits com sinal.
0x03	<i>I_RMS</i>	Valor eficaz (RMS) da corrente, 24 bits sem sinal.
0x04	<i>V_RMS</i>	Valor eficaz da tensão, 24 bits sem sinal.
0x05	<i>I_FAST_RMS</i>	RMS da corrente em um ciclo mais curto, 24 bits.
0x06	<i>WATT</i>	Potência activa, 24 bits com sinal.
0x07	<i>CF_CNT</i>	Contador de pulsos de energia activa.
0x08	<i>FREQ</i>	Frequência da linha, 16 bits.
0x09	<i>STATUS</i>	Estado do sistema.
0x18	<i>OT_FUNX</i>	Configuração das saídas lógicas CF1/CF2/ZX.
0x1A	<i>GAIN_CR</i>	Ganho do canal de corrente.
0x14	<i>WA_CREEP</i>	Limite da função antirruído (anti-creep).

Fonte: baseado em Belling (2023).

### 2.7.5 Circuito de aplicação e equações de conversão

#### 2.7.5.1 Amostragem com resistor

A nota de aplicação apresenta um circuito típico em que a corrente é medida com um resistor de amostragem de 1 mΩ, e a tensão de rede (220 V) é reduzida para cerca de 57,5 mV RMS por um divisor resistivo de 390 kΩ × 5 + 0,51 kΩ. O microcontrolador comunica via UART (4,800bps, N 8 1) para ler os registos de corrente, tensão, potência e contador de pulsos.

Com esse circuito, os valores reais podem ser obtidos a partir dos registos usando as seguintes equações da nota de aplicação:

- **Corrente real (A):**  $I = \frac{I_{RMS} \times V_{REF}}{305978 \times R_L}$ . Para  $R_L = 1 \text{ m}\Omega$  e  $V_{REF} = 1,218 \text{ V}$ , a constante é aproximadamente 1/305978 A por unidade.
- **Tensão real (V):**  $V = \frac{V_{RMS} \times V_{REF} \times (R_2 + R_1)}{73989 \times R_1 \times 1000}$ .
- **Potência activa (W):**  $P = \frac{WATT \times V_{REF}^2 \times (R_2 + R_1)}{3537 \times R_L \times R_1 \times 1000}$ .
- **Energia por pulso CF1/CF2 (kWh):** Cada pulso corresponde a uma energia de  $E = \frac{1638,4 \times 256 \times V_{REF}^2 \times (R_2 + R_1)}{3600000 \times 3537 \times R_L \times R_1 \times 1000}$ .

A nota oferece um exemplo numérico em que  $I_{RMS} = 251\,213$ ,  $V_{RMS} = 3\,494\,335$ ,

WATT = 137 146 e CF\_CNT = 1 200, resultando em corrente  $\approx 1$  A, tensão  $\approx 220$  V, potência  $\approx 220$  W e energia acumulada  $\approx 0,224$  kWh.

#### 2.7.5.2 Amostragem com transformadores de corrente (CT) e potencial (PT)

Quando se utilizam transformadores, as equações mudam para incluir o rácio de transformação. Por exemplo, com um CT de relação 2000:1 e resistor de carga de  $3,3\ \Omega$ , e um PT de 1:1 com carga de  $24,9\ \Omega$ , a corrente real é dada por  $I = \frac{I_{RMS} \times 1,218}{305978 \times (R_5 \times 1000 / R_t)}$ . Com isso, as fórmulas de tensão, potência e energia seguem a mesma lógica, substituindo os divisores resistivos e relações dos transformadores.

#### 2.7.5.3 Função de anti-creep

Para evitar que ruído acumulado gere energia fictícia, o BL0942 possui um registo WA\_CREEP (endereço 0x14). O manual recomenda ajustar esse registo com base no valor do registo de potência (WATT); a relação é  $WA\_CREEP = \frac{WATT \times 256}{3125}$ . Assim, a configuração padrão (0x0B) corresponde a WATT  $\approx 134$ , equivalente a aproximadamente 0,215 W com um resistor de  $1\ m\Omega$  e divisor de  $390\ k\Omega / 0,51\ k\Omega$ . Para desconsiderar consumos inferiores a 1 W, a nota sugere ajustar WA\_CREEP para 0x33.

#### 2.7.6 Boas práticas de layout PCB

A precisão de medição depende do layout físico da placa de circuito impresso (PCB). O documento recomenda:

- Manter o resistor de amostragem e capacitores próximos aos pinos *IP/IN* para minimizar ruído.
- Separar a malha de terra da amostragem de corrente da terra do resto do circuito e garantir que os sinais de *IP* e *IN* sejam roteados paralelamente e o mais curto possível.
- Usar traços largos para o resistor de amostragem, pois a corrente pode atingir 16 A.
- Separar os traços do divisor de tensão dos traços de corrente para evitar interferência e garantir isolamento adequado para 220 V.
- Colocar o capacitor de desacoplamento de 3,3 V próximo ao pino *VDD*.

### ***2.7.7 Aplicações e conclusões***

O BL0942 destina-se a produtos de casa inteligente e medidores que necessitam de estimativa de energia sem alta precisão de faturação. Segundo a Shanghai Belling, o chip é calibrado em fábrica e, com periféricos de 1 % de tolerância, o erro total pode ficar abaixo de 2 % sem calibração adicional. Isso simplifica o desenvolvimento de tomadas inteligentes, medidores de consumo em eletrodomésticos e outros equipamentos de monitorização. A interface UART/SPI simplifica a conexão com microcontroladores, e os registos e saídas de pulsos facilitam a conversão de medidas em energia consumida.

A incorporação de funções como anti-creep, detecção de sobrecorrente e saídas de cruzamento por zero faz do BL0942 uma solução completa para medição de energia em aplicações residenciais. É importante, porém, seguir as recomendações de layout e dimensionamento de componentes para garantir que a precisão inerente do chip seja mantida.

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção, apresentam-se trabalhos que abordam monitoramento energético e qualidade de energia em sistemas elétricos, destacando suas abordagens, vantagens e limitações. Cada estudo é comparado com o trabalho proposto, considerando aspectos como cálculos de potência ativa, reativa e aparente, além da análise de distorções harmônicas e valores de pico.

#### 3.1 Energy and Power Quality Measurement for Electrical Distribution in AC and DC Microgrid Buildings (Gerber *et al.*, 2022)

Gerber *et al.* (Gerber *et al.*, 2022) desenvolveram um procedimento de medição e verificação (*Measurement and Verification - M&V*) para avaliar a eficiência energética e a qualidade da energia em edifícios que utilizam redes AC e DC. O estudo propõe o índice de qualidade da tensão (*Voltage Quality Index - VQI*) para quantificar a qualidade da energia elétrica. Enquanto esse trabalho se concentra na análise da energia em microgrids AC e DC, o trabalho proposto amplia a abordagem para análise espectral em formato online, utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Além disso, o trabalho proposto incorpora o enfoque prático em medir tensão e corrente e observar distorções a partir das formas de onda, o que não é realizado na abordagem de Gerber *et al.*

#### 3.2 Generating Realistic Load Profiles in Smart Grids: An Approach Based on Nonlinear Independent Component Estimation (NICE) and Convolutional Layers (Silva *et al.*, 2023)

Silva *et al.* (Silva *et al.*, 2023) propõem um modelo baseado em estimativa de componentes independentes não lineares e redes neurais convolucionais para gerar perfis realistas de carga elétrica. O estudo foca na modelagem de perfis de carga para previsão do consumo energético. Diferente do trabalho proposto, que realiza medições diretas e análise espectral dos sinais elétricos, o estudo de Silva *et al.* concentra-se na geração sintética de perfis de consumo, sem incluir medições de potência ativa, reativa e aparente ou distorções harmônicas.

### **3.3 Challenges and Opportunities in European Smart Buildings Energy Management: A Critical Review (Hernández *et al.*, 2024)**

Hernández *et al.* (Hernández *et al.*, 2024) realizam uma revisão sobre os desafios e oportunidades na gestão energética de edifícios inteligentes, com foco no uso de inteligência artificial e digital twins. Diferentemente do trabalho proposto, que apresenta medições diretas da qualidade da energia, o trabalho de Hernández *et al.* é uma análise teórica sem experimentação prática.

### **3.4 Development of an IoT Smart Energy Meter with Power Quality Features for a Smart Grid Architecture (Munoz *et al.*, 2024)**

Munoz *et al.* (Munoz *et al.*, 2024) apresentam um medidor IoT para redes elétricas inteligentes, capaz de medir potência ativa, reativa e aparente, além de analisar distorções harmônicas. Embora o trabalho tenha similaridades com o trabalho proposto, a principal diferença seria que o trabalho proposto é focado em um protótipo mais simples e replicável para baixa tensão, com medições em formato online e análise do sinal.

está na validação experimental, uma vez que o trabalho proposto utiliza um osciloscópio para comparação direta dos sinais elétricos e aplica a FFT para análise espectral.

### **3.5 Smart Campus—A Sketch (Min-Allah; Alrashed, 2020)**

Min-Allah e Alrashed (Min-Allah; Alrashed, 2020) discutem um conceito de *smart campus*, utilizando sensores IoT para otimização de recursos. Diferente do trabalho proposto, que realiza medições diretas e análise espectral detalhada dos sinais elétricos, o estudo de Min-Allah *et al.* não inclui avaliação de potência elétrica ou distorções harmônicas.

### **3.6 Tabela Comparativa**

Nesta seção, trata-se de uma comparação entre os trabalhos relacionados e o presente trabalho, destacando suas principais características, vantagens e limitações. A análise inclui a verificação dos métodos utilizados em cada pesquisa, bem como a avaliação dos cálculos de potência ativa, reativa e aparente. Além disso, examinam-se a presença de análise de distorções harmônicas e a medição de valores de pico, aspectos essenciais para a caracterização da qualidade

da energia elétrica.

Quadro 1 – Comparação entre Trabalhos Relacionados e o Presente Estudo

<b>Trabalho</b>	<b>Prós</b>	<b>Limitações</b>	<b>Potência Ativa</b>	<b>Potência Reativa</b>	<b>Potência Aparente</b>	<b>Distorções Harmônicas</b>
(Munoz <i>et al.</i> , 2024)	Medidor IoT com recursos de qualidade da energia para smart grids	Foco em arquitetura trifásica de quadro, o que pode ser superdimensionado para cenários estritamente monofásicos de baixo custo.	Sim	Sim	Sim	Sim
(Gerber <i>et al.</i> , 2022)	Avaliação de qualidade da energia em microgrids AC/DC por meio do VQI	Não realiza uma avaliação completa de qualidade baseada na corrente	Sim	Sim	Sim	Parcial
(Silva <i>et al.</i> , 2023)	Geração de perfis de carga realistas para smart grids	Não realiza medições elétricas reais	Não	Não	Não	Não
(Hernández <i>et al.</i> , 2024)	Revisão crítica sobre desafios e oportunidades em edifícios inteligentes	Estudo teórico sem validação experimental	Não	Não	Não	Não
(Min-Allah; Al-rashed, 2020)	Proposta conceitual de campus inteligente baseado em IoT	Não aborda medições elétricas nem qualidade da energia	Não	Não	Não	Não
<b>Este Trabalho</b>	Monitoramento elétrico em tempo real com análise espectral e validação experimental	Não integra técnicas avançadas de predição baseada em IA	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

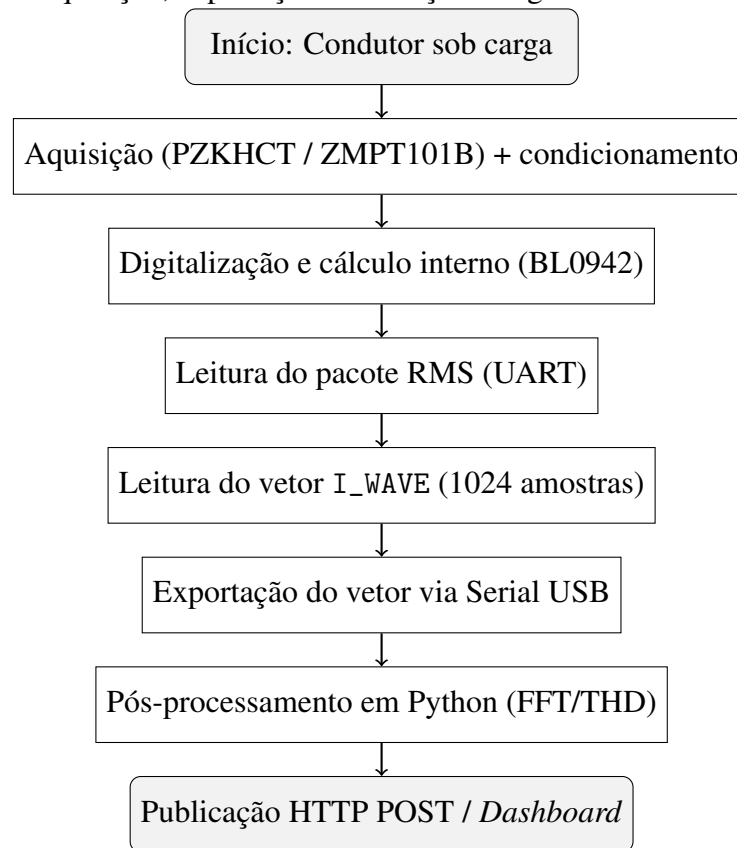
## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Modelo do Sistema

O monitoramento de corrente e tensão segue o fluxo apresentado na Figura 8. Inicialmente, um condutor sob carga é instrumentado por sensores de corrente e tensão, cujos sinais são condicionados e encaminhados ao circuito integrado BL0942. Na sequência, o microcontrolador realiza: (i) leitura periódica do pacote padrão do BL0942 (grandezas RMS e potência); e (ii) leitura do registrador de forma de onda (I\_WAVE) para aquisição de um vetor de 1024 amostras. O vetor é exportado via interface serial USB para análise espectral em ambiente Python. Por fim, os dados de grandezas são publicados via *HTTP POST* para visualização. Assim, as grandezas obtidas e/ou derivadas incluem:

- **Tensão e corrente eficazes** ( $V_{rms}$  e  $I_{rms}$ ): grandezas base para cálculo de potência;
- **Potência ativa** ( $P$ ): energia convertida em trabalho útil;
- **Potência aparente** ( $S$ ): produto de  $V_{rms}$  e  $I_{rms}$ ;
- **Potência reativa** ( $Q$ ): derivada pelo triângulo de potências, quando aplicável;
- **Fator de potência** (**FP**): razão entre  $P$  e  $S$ ;
- **Conteúdo harmônico/THD**: obtido por análise espectral (FFT) em pós-processamento.

Figura 8 – Fluxo de aquisição, exportação e validação das grandezas elétricas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

#### 4.1.1 Premissas e limitações

Este trabalho propõe um **protótipo de baixo custo**, voltado a fins acadêmicos e experimentais, cuja ênfase está em **monitoramento online** (com atualização periódica podendo varia de 30 à 60 segundos) e não em **processamento em tempo real com garantias rígidas de latência**. Assim, a visualização em dashboard e o registro em nuvem podem apresentar **taxa de atualização baixa/variável**, pois dependem do tempo de aquisição por janelas (cálculos de RMS e potências), do tempo de comunicação com o BL0942, e principalmente da **infraestrutura externa** (Wi-Fi/Internet, serviço de planilhas/servidor e eventuais limites de requisição). Ainda assim, o protótipo mantém utilidade prática para acompanhamento de consumo e comparação entre perfis de carga. Em termos de custo, o presente hardware utiliza componentes adquiridos no AliExpress (BL0942  $\approx$  R\$ 35; TC  $\approx$  R\$ 25; ZMPT101B  $\approx$  R\$ 13; ESP32-C6-Wroom  $\approx$  R\$ 30), totalizando  $\approx$  R\$ 103, valor **inferior** ao limite de **US\$ 80** reportado por (Munoz *et al.*, 2024) para uma solução de baixo custo. Desta maneira,

- O sistema foi projetado para redes **monofásicas** de corrente alternada.
- O sistema realiza **monitoramento online (não determinístico)**: não há garantia de tempo

real estrito, e a taxa de atualização do dashboard depende de:

- janela de aquisição/integração necessária para  $V_{\text{rms}}$ ,  $I_{\text{rms}}$  e potências;
- latência e estabilidade da rede Wi-Fi/Internet;
- tempo de resposta do serviço em nuvem (ex.: escrita em planilha/API) e possíveis limites de requisições.
- A análise espectral (FFT/THD) é realizada como **pós-processamento em Python**, a partir do vetor exportado pelo microcontrolador.
- A validação inicial utiliza uma carga de referência predominantemente resistiva (lâmpada incandescente), permitindo comparação direta com valores esperados.
- Por se tratar de **protótipo**, não contempla certificações e requisitos completos de produto (ex.: ensaios normativos, robustez eletromagnética, encapsulamento e requisitos formais de segurança elétrica), ficando restrito ao contexto experimental/laboratorial.

## 4.2 Coleta de grandezas elétricas e condicionamento

A coleta das grandezas elétricas é realizada por meio de dois sensores: (i) o transformador de corrente PZKHCT, instalado ao redor do condutor de fase para medição não intrusiva da corrente alternada; e (ii) o sensor de tensão ZMPT101B, conectado em paralelo à rede para obtenção do sinal proporcional à tensão. Em ambos os casos, os sinais passam por condicionamento analógico para adequação de amplitude e mitigação de ruídos, garantindo compatibilidade com a entrada do BL0942.

### 4.2.1 Filtragem analógica e adequação de amplitude

Para garantir estabilidade e robustez frente a ruídos e offsets do sinal, foram implementados estágios de filtragem analógica de primeira ordem, combinando um filtro passa-baixa (atenuação de ruído de alta frequência) e um filtro passa-alta (remoção de componente DC e estabilização do nível de referência na entrada).

#### 4.2.1.1 Filtro passa-baixa (RC)

Para reduzir interferências de alta frequência e oscilações espúrias no sinal, foi implementado um filtro passivo passa-baixa de primeira ordem (RC). Para os componentes

empregados ( $R = 1 \text{ k}\Omega$  e  $C = 33 \text{ nF}$ ), a frequência de corte é dada por:

$$f_{c,LP} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 1000 \cdot 33 \cdot 10^{-9}} \approx 4,82 \text{ kHz} \quad (4.1)$$

Essa banda preserva a componente fundamental de 60 Hz e harmônicas de baixa ordem, enquanto atenua perturbações em frequências elevadas associadas a EMI e ruídos de comutação.

Adicionalmente, como  $f_{c,LP} \gg 60 \text{ Hz}$ , a defasagem introduzida na componente fundamental é pequena, dado que, para um passa-baixa de 1ª ordem,  $\varphi_{LP}(f) = -\arctan\left(\frac{f}{f_{c,LP}}\right)$ , resultando em  $\varphi_{LP}(60 \text{ Hz}) \approx -\arctan(60/4820) \approx -0,7^\circ$  (desprezível para o cálculo de FP e potência).

#### 4.2.1.2 Filtro passa-alta (acoplamento capacitivo)

Também foi implementado um filtro passa-alta de primeira ordem utilizando um capacitor de acoplamento  $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$  em série com a entrada e um resistor  $R = 1 \text{ M}\Omega$  para referência/polarização do nó de entrada. A frequência de corte correspondente é:

$$f_{c,HP} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} \approx 0,016 \text{ Hz} \quad (4.2)$$

Esse estágio atua principalmente na remoção de offsets (componente DC) e na estabilização do nível de referência na entrada do circuito de medição, reduzindo risco de saturação e melhorando a repetibilidade das leituras.

Quanto à fase, embora filtros RC introduzam defasagem, como  $f_{c,HP} \ll 60 \text{ Hz}$ , o efeito na componente fundamental é praticamente nulo. Para um passa-alta de 1ª ordem, a defasagem pode ser aproximada por  $\varphi_{HP}(f) \approx \arctan\left(\frac{f_{c,HP}}{f}\right)$ , resultando em  $\varphi_{HP}(60 \text{ Hz}) \approx \arctan(0,016/60) \approx 0,015^\circ$ , isto é, desprezível do ponto de vista prático.

Tabela 4 – Resumo dos filtros analógicos utilizados no projeto.

<b>Filtro</b>	<b>R</b>	<b>C</b>	$f_c$	<b>Objetivo</b>
Passa-baixa (RC)	1 k $\Omega$	33 nF	$\approx 4,82$ kHz	Atenuar ruído/EMI de alta frequência e melhorar estabilidade das leituras (anti-ruído).
Passa-alta (RC)	1 M $\Omega$	10 $\mu$ F	$\approx 0,016$ Hz	Remover componente DC e variações lentas ( <i>offset</i> ), estabilizando o ponto de operação sem impactar a componente de 60 Hz.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

#### 4.2.2 Digitalização e comunicação com o BL0942

O circuito integrado BL0942 é responsável por digitalizar as formas de onda e disponibilizar grandezas como  $V_{rms}$ ,  $I_{rms}$ , potência ativa e fator de potência. A comunicação entre o microcontrolador e o BL0942 ocorre via UART, configurada em 38.400 bps e formato 8N1. Duas rotinas principais são empregadas no *firmware*:

- **Leitura do pacote padrão:** obtenção de grandezas RMS e potência, com verificação de integridade por checksum;
- **Leitura do registrador I\_WAVE:** aquisição de 1024 amostras de corrente, interpretadas como valores assinados em complemento de dois, com extensão de sinal para reconstrução do semiciclo negativo.

#### 4.2.3 Calibração e fatores de escala

As grandezas físicas são obtidas a partir de registradores brutos do BL0942 por meio de fatores de escala ( $K_V$ ,  $K_I$ ,  $K_P$  e  $K_E$ ). Esses fatores consideram as características dos sensores (PZKHCT e ZMPT101B), do circuito de condicionamento (incluindo resistor de carga) e do próprio CI de medição. A consistência da calibração é verificada experimentalmente por comparação com instrumentos de referência durante os ensaios de bancada.

### 4.3 Exportação do vetor e pós-processamento em Python

Para análise espectral, o vetor de 1024 amostras de I\_WAVE é exportado pelo microcontrolador via interface serial USB em formato de lista separada por vírgulas. Em ambiente

Python, o vetor é processado com as seguintes etapas:

- aplicação de janela (por exemplo, Hann) para reduzir vazamento espectral;
- cálculo da FFT para identificação da componente fundamental e inspeção de harmônicas;
- estimativa de conteúdo harmônico e, quando aplicável, cálculo de THD.

A taxa de amostragem é estabelecida por estimativa experimental, preferencialmente a partir do tempo total de aquisição do vetor (medido durante a captura), uma vez que a taxa UART determina a vazão de transferência e a latência de leitura, não representando diretamente a taxa de amostragem interna do CI. Desta maneira, é possível captura pela UART até a quinta harmônica

Já para a análise espectral via FFT, aplica-se uma janela no sinal no domínio do tempo (por exemplo, a janela de Hann/Hanning) antes do cálculo da DFT/FFT, com o objetivo de reduzir o vazamento espectral. Esse vazamento ocorre porque a FFT opera sobre um trecho finito do sinal, equivalente a multiplicá-lo por uma janela retangular, o que introduz descontinuidades nas extremidades e gera lóbulos laterais no espectro. A janela de Hann suaviza as bordas do trecho amostrado, reduzindo os lóbulos laterais e, conseqüentemente, a interferência entre bins; como contrapartida, há alargamento do lóbulo principal e redução do pico, caracterizando um compromisso entre menor vazamento e menor resolução espectral (Lyons, 2011).

#### 4.4 Publicação HTTP Post e estrutura dos dados

As grandezas calculadas pelo microcontrolador são publicadas via *MQTT* sobre rede Wi-Fi. Para assegurar interoperabilidade com o *dashboard*, define-se uma estrutura de mensagem (por exemplo, em JSON) contendo campos mínimos como:  $V_{rms}$ ,  $I_{rms}$ ,  $P$ ,  $S$ ,  $Q$ , FP e um vetor de 1024 valores de corrente. A periodicidade de publicação é configurada no *firmware* de acordo com a necessidade de monitoramento e limitações de rede.

#### 4.5 Ambiente experimental e metodologia de validação

A validação experimental é realizada em bancada utilizando uma lâmpada incandescente de 70 W como carga de referência. O PZKHCT é posicionado ao redor do condutor de fase, enquanto o ZMPT101B é conectado em paralelo à rede. As grandezas obtidas pelo protótipo são comparadas com medições de referência (multímetro e osciloscópio).

Para avaliação quantitativa, utiliza-se o erro relativo percentual:

$$Erro(\%) = \left| \frac{x_{ref} - x_{med}}{x_{ref}} \right| \cdot 100 \quad (4.3)$$

onde  $x_{ref}$  é o valor medido pelo instrumento de referência e  $x_{med}$  é o valor fornecido pelo protótipo. Ensaios repetidos são realizados para verificar estabilidade e consistência das leituras.

#### 4.6 Desenvolvimento da placa embarcada

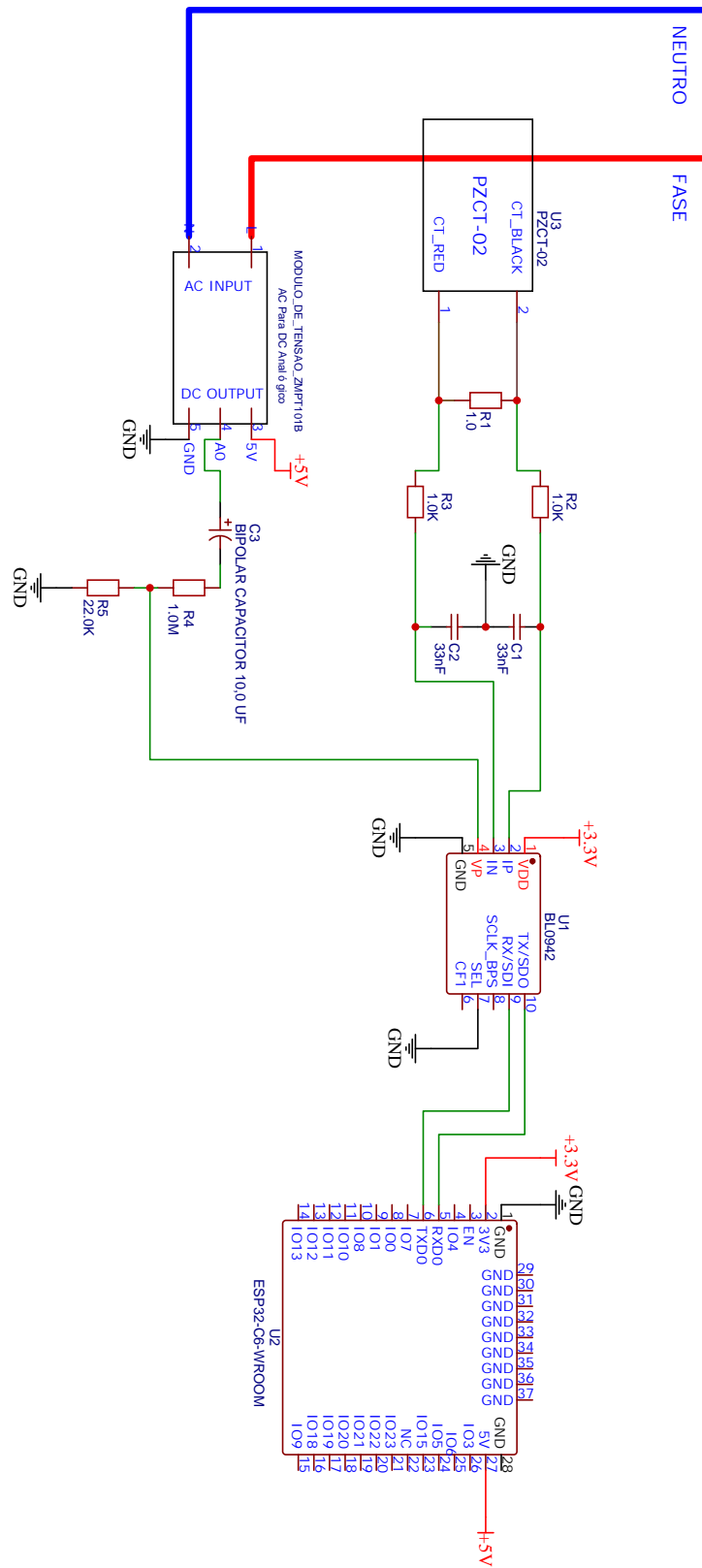
O dispositivo embarcado foi projetado para realizar a aquisição, o condicionamento, a digitalização e a transmissão de grandezas elétricas em redes residenciais monofásicas de corrente alternada. A seleção dos componentes priorizou baixo custo, disponibilidade e adequação elétrica, além de critérios de segurança por meio de sensores com isolamento galvanométrico na interface com a rede.

A arquitetura de hardware é composta por dois canais de medição. No canal de corrente, utiliza-se o transformador de corrente não intrusivo PZKHCT (PZCT-02), cuja saída é convertida em tensão por um resistor de carga (*burden*) e aplicada a um estágio de filtragem passiva passa-baixa (RC), responsável por atenuar interferências de alta frequência e reduzir ruídos de comutação antes da entrada do circuito de medição. No canal de tensão, emprega-se o módulo ZMPT101B conectado em paralelo à rede; o sinal é acoplado ao estágio de entrada por capacitor bipolar, caracterizando um passa-alta de baixa frequência de corte, de modo a remover offsets DC sem introduzir defasagem significativa na componente fundamental (60 Hz).

A Figura 9 ilustra o esquemático do sistema, evidenciando os estágios de condicionamento e as conexões entre sensores, CI de medição e microcontrolador. O circuito integrado BL0942 foi adotado por integrar a digitalização das formas de onda e o cálculo interno de grandezas como  $V_{rms}$ ,  $I_{rms}$ , potência ativa e fator de potência, além de disponibilizar o registrador de forma de onda (I\_WAVE) para aquisição de amostras. A comunicação entre o BL0942 e o controlador é realizada por UART, com seleção de modo via pino *SEL*, permitindo leitura do pacote padrão e do vetor de amostras para pós-processamento.

Para conectividade e publicação das medições, foi utilizado o microcontrolador ESP32-C6, que oferece capacidade de processamento compatível com a organização das leituras, além de interface Wi-Fi para envio periódico via *MQTT*. Essa combinação viabiliza uma solução integrada para monitoramento contínuo, com aquisição em tempo real, exportação de amostras para análise espectral e visualização remota em *dashboard*.

Figura 9 – Esquemático completo da placa embarcada



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

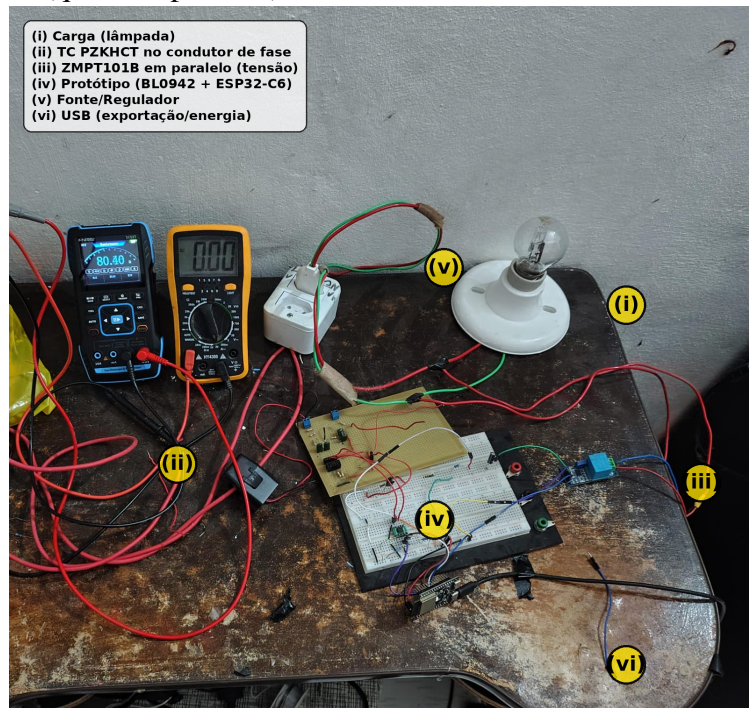
## 5 ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, apresentam-se os resultados experimentais obtidos com o protótipo de monitoramento energético desenvolvido. O sistema foi submetido a ensaios de bancada com uma carga predominantemente resistiva (lâmpada incandescente de 70 W), visando avaliar a integridade do condicionamento de sinal, a consistência das leituras RMS e a coerência da análise espectral realizada a partir do vetor de amostras exportado. Além disso, discute-se a publicação das grandezas via *HTTP POST* e a rastreabilidade das medições por comparação com instrumentação de referência.

### 5.1 Configuração experimental e instrumentos de referência

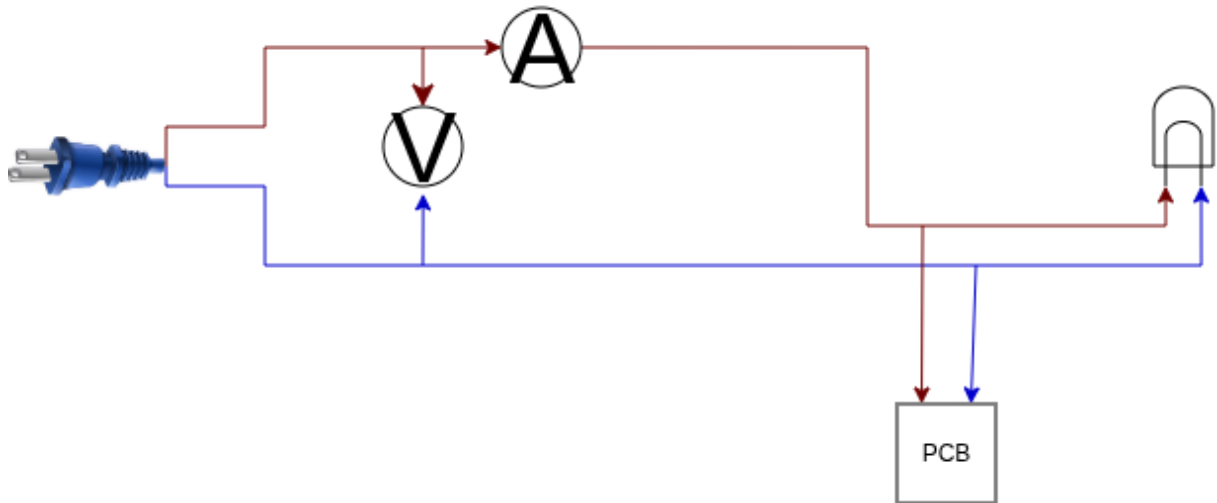
Para assegurar reprodutibilidade, os ensaios foram conduzidos em bancada com instrumentação de referência, incluindo multímetro de precisão e osciloscópio digital. A carga principal utilizada foi uma lâmpada incandescente de 70 W, escolhida por seu comportamento aproximadamente linear e fator de potência próximo de 1, o que facilita a validação inicial das grandezas de potência.

Figura 10 – Foto da bancada completa do ensaio, evidenciando: (i) carga (lâmpada), (ii) posicionamento do TC PZKHCT no condutor de fase, (iii) ligação do ZMPT101B em paralelo, (iv) placa com BL0942 e ESP32-C6, (v) fonte/regulador e (vi) conexão USB para exportação e/ou conexão Wi-Fi (quando aplicável).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 11 – Diagrama de ligação do ensaio (*test setup*) indicando rede AC, carga, pontos de medição do multímetro e o caminho do sinal até o BL0942 e o ESP32-C6.

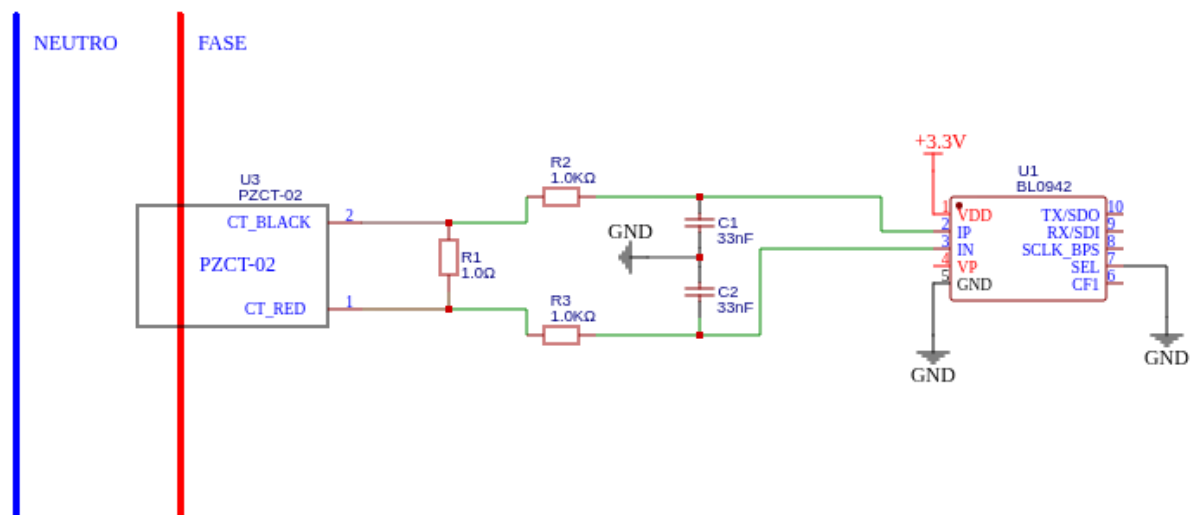


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

## 5.2 Condicionamento de Sinais e Integração de Hardware

A validação inicial concentrou-se na integridade do sinal aplicado às entradas do BL0942, contemplando os dois canais principais do sistema: corrente (Figura 12) e tensão (Figura 13). Na medição de corrente, o sensor PZKHCT foi utilizado com resistor de carga (*burden*) de  $1\ \Omega$ , convertendo a corrente secundária em tensão e mantendo a amplitude dentro de limites operacionais do circuito de medição (Figura 12).

Figura 12 – Recorte do canal de corrente: TC, *burden*, filtragem RC e interface com o BL0942 (IP/IN).



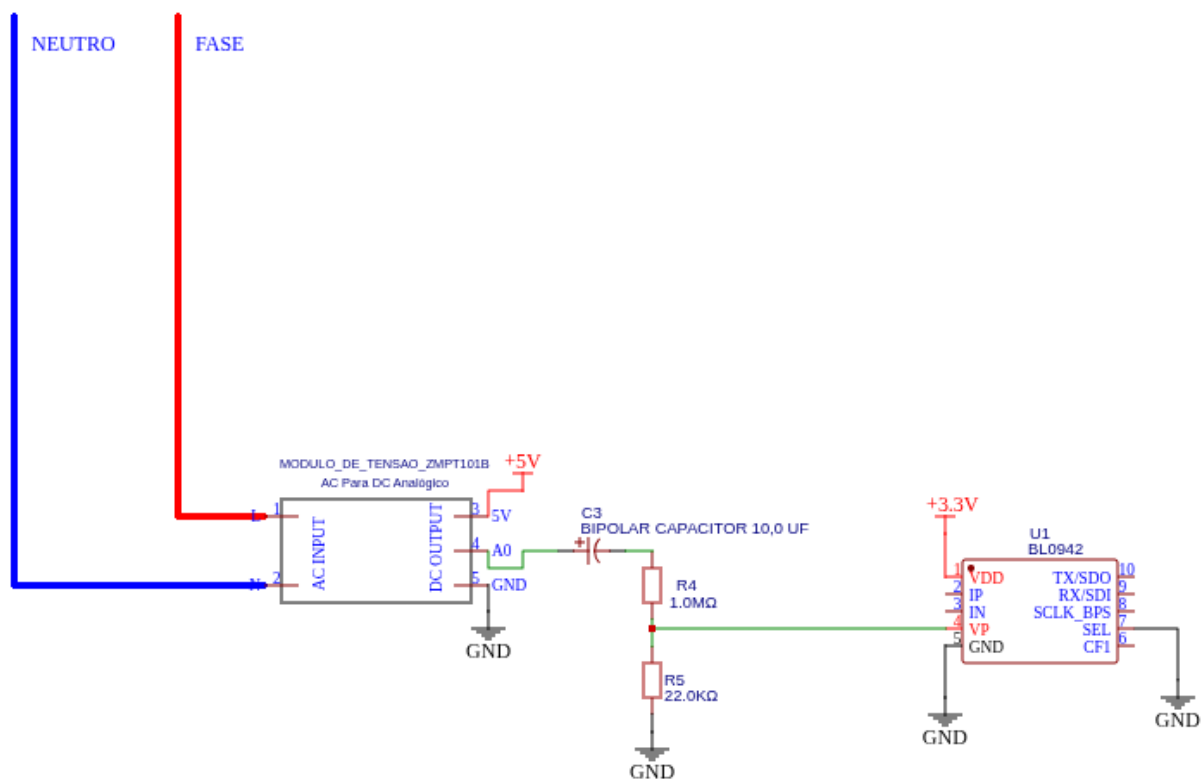
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No canal de corrente, além da conversão corrente–tensão promovida pelo *burden*, foi adotado um estágio passivo de condicionamento para aumentar a imunidade a ruídos. Resistores em série limitam correntes de entrada e, em conjunto com capacitores para referência ao terra, atenuam componentes de alta frequência provenientes de interferência eletromagnética (EMI) e ruídos de comutação, entregando ao BL0942 um sinal mais estável para digitalização.

### 5.2.1 Canal de tensão (ZMPT101B) e interface com o BL0942

No canal de tensão, empregou-se o módulo ZMPT101B como transformador de potencial (TP), fornecendo um sinal analógico proporcional à tensão da rede com isolamento e redução de amplitude. Para compatibilizar o nível do sinal com a entrada de tensão do BL0942 e evitar saturação, adotou-se uma rede de acoplamento e ajuste de amplitude (Figura 13). O acoplamento capacitivo garante a remoção de offsets indesejados e contribui para estabilizar o ponto de operação do canal de medição.

Figura 13 – Recorte do canal de tensão: ZMPT101B, acoplamento/polarização e interface com o BL0942 (VP/VN).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

### 5.2.2 Observações de validação em bancada

A integridade dos sinais condicionados foi verificada por instrumentação de bancada, priorizando a inspeção visual de forma de onda e a avaliação de estabilidade. Recomenda-se registrar capturas do osciloscópio de tensão e corrente simultaneamente, de modo a evidenciar baixa presença de ruído e defasagem coerente com a natureza da carga utilizada.

Figura 14 – Captura do osciloscópio com tensão e corrente simultâneas na carga de 70 W, evidenciando a coincidência temporal entre os sinais e referência à frequência nominal (60 Hz).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 5 – Resumo das configurações do ensaio (*test setup*) para assegurar reprodutibilidade.

Item	Configuração/Descrição
Carga de teste	Lâmpada incandescente 70 W (predominantemente resistiva).
Rede elétrica	Tensão nominal: 220 V (conforme local); frequência nominal: 60 Hz.
Canal de corrente	TC PZKHCT acoplado no condutor fase (L); resistor <i>burden</i> de 1 $\Omega$ ; filtragem RC no caminho do sinal.
Canal de tensão	ZMPT101B em paralelo L–N; rede de acoplamento/polarização; filtragem associada ao canal de tensão.
CI de medição	BL0942: leitura de pacote padrão (grandezas RMS/potência) e leitura do registrador I_WAVE (1024 amostras).

*Continua na próxima página*

Tabela 5 – Continuação

Item	Configuração/Descrição
Microcontrolador	ESP32-C6: processamento local das grandezas e exportação do vetor $I\_WAVE$ via Serial USB.
Comunicação BL0942–ESP32	UART 8N1; baud rate configurado em 38.400 bps (modo <i>turbo</i> ).
Exportação do vetor	Serial USB: vetor com 1024 amostras separado por vírgulas; janela de observação definida no <i>firmware</i> .
Instrumentos de referência	Multímetro de precisão (referência de $V_{rms}$ e, quando aplicável, $I_{rms}$ ); osciloscópio digital para inspeção de forma de onda e defasagem.
Osciloscópio (configurações)	CH1: tensão (L–N); CH2: sinal proporcional à corrente (ponto após <i>burden</i> /condicionamento). Escalas (V/div e s/div) ajustadas conforme amplitude; acoplamento AC/DC conforme a medição.
Critério de comparação	Erro relativo percentual entre protótipo e referência: $Erro(\%) = \left  \frac{x_{ref} - x_{med}}{x_{ref}} \right  \cdot 100.$
Taxa de aquisição/log	Intervalo de aquisição configurado no <i>firmware</i> ; tempo total de captura do vetor usado para estimar $F_s$ no pós-processamento em Python.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

### 5.3 Leituras RMS e grandezas de potência

As grandezas  $V_{rms}$ ,  $I_{rms}$ , potência ativa e fator de potência foram obtidas pelo pacote padrão do BL0942 e processadas no microcontrolador conforme as rotinas do *firmware*. Para avaliação quantitativa, as leituras do protótipo foram comparadas com valores de referência obtidos em bancada conforme ilustrado na Tabela 6.

A Tabela 6 apresenta o comparativo para a carga de 70 W.

Tabela 6: Comparativo entre grandezas medidas e valores de referência (carga: lâmpada incandescente 70 W).

Parâmetro	Referência	Protótipo	Erro (%)
Tensão ( $V_{rms}$ ) [V]	220.00	210.67	4.24
Corrente ( $I_{rms}$ ) [A]	0.318	0.315	0.94
Potência ativa ( $P$ ) [W]	70.00	66.32	5.26
Fator de potência (FP) [-]	1.000	1.000	0.00

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na Tabela 6 a potência reativa ( $Q$ ) foi estimada pela relação do triângulo de potências:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (5.1)$$

Que para a carga predominantemente resistiva utilizada, espera-se  $Q$  próximo de zero, coerente com  $FP \approx 1$ .

Figura 15: Evidência de rastreabilidade: trecho do *log* serial do ESP32-C6 exibindo  $V_{rms}$ ,  $I_{rms}$ ,  $P$ ,  $S$ ,  $Q$  e FP durante o ensaio com carga nominal.

```

--- Leitura BL0942 Integrada OK ---
Tensão:      210.67 V
Corrente:    0.315 A
Freq:        59.87 Hz
- Potência (Lógica P = S * PF delimitado) -
  iva (P):    66.32 W
  arente(S): 66.32 VA
Reativa (Q): 0.00 VAR
Fator Pot:   1.00
Fase (Ang):  0.00 graus
-----
--- Forma de Onda de Corrente (1024 pontos horizontais) ---
2433,1456,-76,-1578,-2417,-2481,-1586,-122,1431,2425,2468,
-----

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 15 apresenta a saída do firmware em modo de depuração, confirmando a leitura integrada do circuito de medição BL0942 e a estimativa das principais grandezas elétricas do sistema.

No topo, a mensagem “Leitura BL0942 Integrada OK” indica que a comunicação com o CI ocorreu corretamente e que os registradores necessários foram lidos com sucesso. Em seguida, são exibidos os valores medidos:

Tensão RMS: 210,67 V

Corrente RMS: 0,315 A

Frequência: 59,87 Hz

Logo abaixo, o sistema apresenta o bloco de potências. A observação *Potência* (lógica:  $P = S \cdot FP$ ) indica que a potência ativa  $P$  é obtida pela relação  $P = S \cdot FP$ , em que  $S$  é a potência aparente e  $FP$  é o fator de potência. No firmware, o valor de  $FP$  é limitado/tratado para evitar resultados inválidos. Para este cenário, coletando valores de uma lâmpada de 70w os resultados foram:

Potência ativa (P): 66,32 W

Potência aparente (S): 66,32 VA

Potência reativa (Q): 0,00 var

Fator de potência (FP): 1,00

Ângulo de fase: 0,00°

Esses valores indicam um comportamento predominantemente resistivo, pois  $FP \approx 1$  e  $Q \approx 0$ , o que significa que tensão e corrente estão praticamente em fase.

Na parte inferior, a seção “Forma de Onda de Corrente (1024 pontos horizontais)” mostra o vetor de 1024 amostras coletadas da corrente no domínio do tempo. Esses pontos são utilizados para análises posteriores, como visualização da forma de onda e pós-processamento em Python (por exemplo, FFT/THD), permitindo investigar distorções e conteúdo harmônico da corrente para diferentes tipos de carga.

#### 5.4 Discretização da forma de onda e análise espectral (FFT em Python)

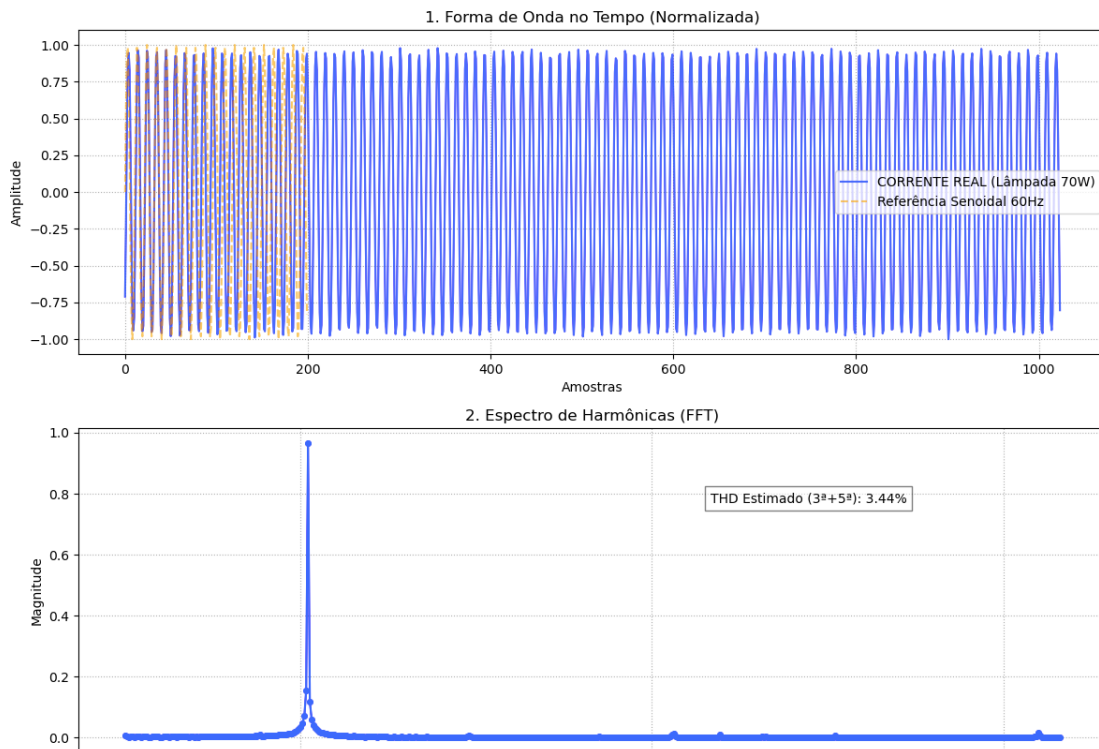
Para análise no domínio da frequência, o *firmware* realizou a leitura de 1024 amostras do registrador I\_WAVE do BL0942 e exportou o vetor via interface serial USB, em formato separado por vírgulas. O pós-processamento foi executado em Python, aplicando remoção de componente DC, normalização, aplicação de janela e FFT para identificação da frequência fundamental e inspeção de harmônicas.

Desta maneira na Figura 16 apresenta a validação do sinal de corrente capturado pelo protótipo utilizando uma carga resistiva linear (lâmpada incandescente de 70W). No gráfico

superior (Domínio do Tempo), observa-se que a forma de onda reconstruída a partir dos dados brutos do sensor (curva azul) apresenta alta fidelidade em relação à referência senoidal ideal de 60Hz (curva laranja), indicando ausência de distorções significativas de fase ou amplitude.

No gráfico inferior (Domínio da Frequência), a análise via FFT confirma a linearidade da carga: a magnitude do componente fundamental (60Hz) é predominante, enquanto as harmônicas de ordem ímpar (3ª e 5ª) apresentam amplitudes desprezíveis, resultando em um THD (Distorção Harmônica Total) baixo, condizente com o comportamento esperado de cargas puramente resistivas.

Figura 16: Forma de onda da corrente no domínio do tempo (amostras normalizadas) para carga resistiva de 70 W.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Agora na Figura 17 apresenta a análise da corrente elétrica de uma carga complexa não-linear (secador de cabelo em funcionamento). Diferente da carga resistiva pura, a análise no Domínio do Tempo (gráfico superior) revela uma assimetria acentuada na forma de onda da corrente. Observa-se que o semiciclo positivo da corrente (curva vermelha) apresenta maior amplitude e largura em comparação ao semiciclo negativo, que se encontra atenuado.

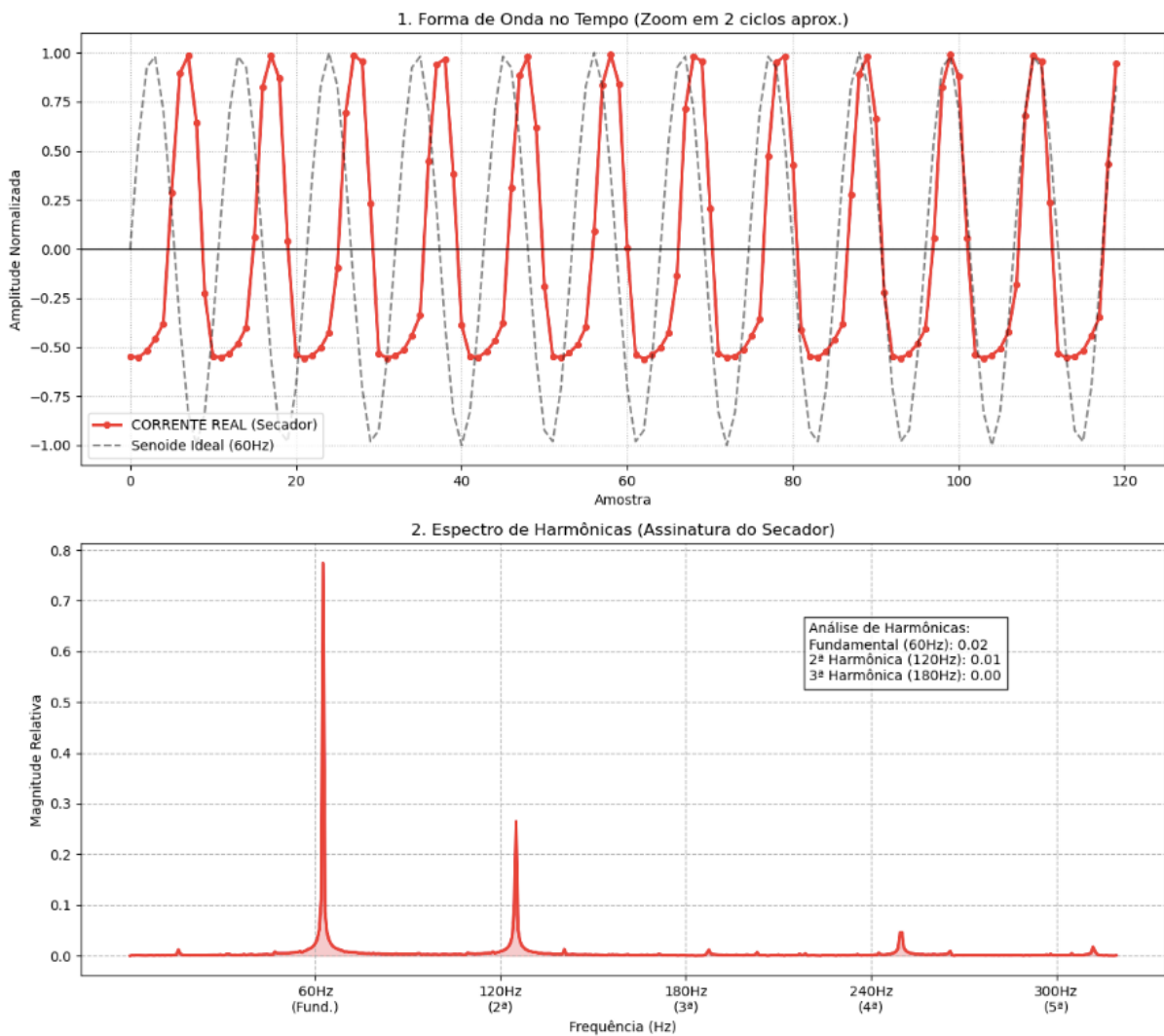
Este comportamento é típico de eletrodomésticos que utilizam retificação de meia-onda (diodos) para controle de potência ou motores universais com escovas.

A análise espectral via FFT (gráfico inferior) corrobora esta observação visual através

da presença significativa da 2ª Harmônica (120Hz). Enquanto cargas simétricas (como a lâmpada anterior) geram apenas harmônicas ímpares, a forte presença de harmônicas pares neste espectro é a assinatura matemática da assimetria da onda, validando a capacidade do protótipo de detectar não apenas a magnitude da corrente, mas a natureza qualitativa da carga conectada (Linear vs. Não-Linear).

Figura 17: Forma de onda da corrente no domínio do tempo (amostras normalizadas) para a carga secador.

#### Análise de Carga Complexa: Secador de Cabelo



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A taxa de amostragem empregada no eixo de frequência foi tratada como estimativa inicial a partir do tempo total de aquisição do vetor e/ou parametrização experimental. Recomenda-se, para maior rigor, calibrar o eixo de frequência a partir da frequência fundamental medida ( $f_0$ ) e do índice do pico espectral ( $k_0$ ), obtendo  $F_s$  equivalente por:

$$F_s = \frac{f_0 \cdot N}{k_0} \quad (5.2)$$

onde  $N$  é o tamanho do vetor (1024). Essa abordagem reduz a dependência da taxa UART, que está associada à transferência dos dados e não à taxa interna de amostragem do CI.

Por fim, os algoritmos completos utilizados para o cálculo das grandezas elétricas, incluindo potência ativa, reativa e aparente, bem como a análise espectral por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT) e a extração de valores de pico, estão disponibilizados em repositório público para fins de reprodutibilidade e consulta complementar. O código-fonte pode ser acessado em:

<https://github.com/RafaelDSG-2020/Codigos-de-Demonstra-o-TCC>

## 5.5 Validação por instrumentação de bancada

Como validação complementar, foram realizadas medições com multímetro e osciloscópio digital. A observação simultânea de tensão e corrente indicou pequena defasagem entre os sinais, coerente com os valores de fator de potência obtidos pelo protótipo e com a natureza resistiva da carga.

## 5.6 Discussão, limitações e próximos testes

Os resultados demonstraram consistência entre as leituras do protótipo e as medições de referência para a carga avaliada. Entretanto, para consolidar o desempenho em cenários reais, recomenda-se ampliar os testes para cargas não lineares e indutivas, como fontes chaveadas (carregadores) e ventiladores, onde é esperado maior conteúdo harmônico e redução do fator de potência.

## 5.7 Considerações finais do capítulo

Os ensaios demonstraram consistência entre as leituras do protótipo e as medições de referência para a carga resistiva avaliada. A exportação do vetor de amostras e o pós-

Figura 18: Evidência de rastreabilidade: trecho do *log* serial do ESP32-C6 exibindo  $V_{rms}$ ,  $I_{rms}$ ,  $P$ ,  $S$ ,  $Q$  e FP durante o ensaio com **secador de cabelo** (carga predominantemente indutiva), evidenciando consumo na ordem de  $\approx 502\text{ W}$  e  $FP \approx 0,93$ .

```

--- Leitura BL0942 Integrada OK ---
Tensão:      202.35 V
Corrente:    2.667 A
Freq:        59.87 Hz
- Potência (Lógica P = S * PF delimitado) -
<  Pot (P):  503.72 W
   Pot(S):539.62 VA
Reativa (Q):193.54 VAR
Fator Pot:   0.93
Fase (Ang):  21.02 graus
-----
--- Forma de Onda de Corrente (1024 pontos horizontais) ---
-25552, -25397, -9962, 12556, 14402, 14445, 13759, 12081, 9780, -876
-----

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

processamento em Python viabilizaram a análise espectral do sinal de corrente, permitindo verificar a predominância da componente fundamental e a inspeção do conteúdo harmônico. Por fim, a publicação via *HTTP Post* e a visualização em *dashboard* evidenciam a viabilidade do sistema como plataforma de monitoramento energético em ambiente residencial, com potencial de expansão para diagnóstico em cargas não lineares e cenários com maior distorção harmônica.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a avaliação de um sistema embarcado para **monitoramento e análise de grandezas elétricas em tempo real**, com foco em aplicações de baixa tensão. Assim, a solução proposta integra um microcontrolador com conectividade Wi-Fi (ESP32-C6), o circuito de medição baseado no **BL0942**, o condicionamento de tensão por meio do módulo baseado no **ZMPT101B**, e o condicionamento de corrente por meio do módulo **PZKHCT**. Com isso, permitindo a aquisição de **tensão e corrente RMS**, a estimativa de **potência ativa e fator de potência**, além da **captura de amostras de corrente** para análises no domínio do tempo e da frequência.

Os resultados demonstraram a viabilidade do protótipo para fins acadêmicos e experimentais, especialmente pela capacidade de **registrar medições de forma contínua, armazenar em planilha na nuvem e visualizar em dashboard**, favorecendo a comparação entre diferentes perfis de carga (por exemplo, cargas com comportamento mais resistivo e cargas com maior presença de distorções). Desta maneira, a validação foi conduzida por comparação pontual com instrumentos de referência (por exemplo, tensão RMS e frequência) e, principalmente, por verificações de consistência física entre grandezas elétricas, como a relação  $S = V_{\text{RMS}} \cdot I_{\text{RMS}}$  e a coerência entre  $P$ ,  $S$  e o fator de potência.

Entretanto, também foram identificadas limitações relevantes. No contexto de **qualidade de energia**, a análise harmônica ficou condicionada à taxa de amostragem efetiva obtida na captura via UART, o que restringe o espectro útil pela frequência de Nyquist e, conseqüentemente, o conjunto de harmônicas analisáveis com confiabilidade. Além disso, foram observadas inconsistências na medição de frequência reportada pelo circuito de medição, indicando a necessidade de ajustes no método de estimação e no condicionamento do sinal de tensão. Por fim, ressalta-se que o protótipo foi concebido como uma **prova de conceito validada experimentalmente**, não como um produto final para uso industrial, uma vez que ainda seriam necessários aprimoramentos de robustez, calibração metrológica formal, ensaios prolongados e adequação a requisitos de segurança e conformidade.

### 6.1 Trabalhos futuros

Como continuidade e evolução do trabalho, destacam-se as seguintes possibilidades:

1. **Aprimoramento da aquisição para análise harmônica ampliada:** empregar uma in-

terface de maior desempenho (por exemplo, SPI, quando disponível) e/ou estratégias de *buffer* e aquisição sincronizada, visando elevar a taxa de amostragem e permitir a análise de harmônicas de ordem superior (por exemplo, até a 25<sup>a</sup>), reduzindo limitações impostas pela UART.

2. **Aquisição sincronizada de tensão e corrente:** implementar captura simultânea de tensão e corrente (idealmente com sincronismo de amostragem), permitindo estimativas mais robustas de potência (ativa, reativa e aparente), ângulo de fase e indicadores de distorção, além de reduzir incertezas relacionadas à defasagem e ao *offset*.
3. **Estimativa de frequência mais confiável:** adotar métodos de frequência baseados em detecção de cruzamento por zero (com histerese e filtragem) e/ou estimação por FFT na tensão, comparando com a leitura interna do medidor, para diagnóstico e correção de discrepâncias.
4. **Cálculo de THD e métricas de qualidade de energia:** incorporar cálculo de THD com mais harmônicas e com técnicas de mitigação de vazamento espectral (por exemplo, janela de Hann e coerência temporal por múltiplos ciclos), além de métricas adicionais como RMS por ciclo, *crest factor* e detecção de transientes.
5. **Calibração e rastreabilidade metrológica:** realizar calibração em múltiplos pontos (tensão, corrente e potência) com procedimentos e instrumentos apropriados, estimando incertezas e documentando rastreabilidade, visando melhorar a confiabilidade e repetibilidade das medições.
6. **Robustez de *firmware* e comunicação:** melhorar tolerância a falhas no envio (tratamento de HTTP 400/*timeout*), implementar fila local de amostras, reenvio com *backoff*, compressão/compactação dos dados de *waveform* e validação de integridade no *payload*.
7. **Evolução do armazenamento e do *dashboard*:** migrar de planilha para um *backend* mais apropriado (banco de dados e API), suportar autenticação, histórico mais longo, comparações entre cargas e relatórios automáticos, mantendo a planilha como alternativa de fácil acesso.
8. **Melhorias de *hardware* e segurança elétrica:** revisar o condicionamento analógico (filtros, ganho, *offset*), isolamento e proteção (fusíveis, supressores, barreiras), além de projetar PCB própria com critérios de segurança, visando maior estabilidade e reprodutibilidade.
9. **Detecção automática de anomalias:** explorar técnicas de análise de dados e aprendizado

de máquina para identificar padrões fora do esperado (sobretensão, distorções elevadas, comportamento anômalo de carga), integrando alertas no *dashboard*.

## REFERÊNCIAS

AGUILAR, J.; GARCES-JIMENEZ, A.; R-MORENO, M. D.; GARCÍA, R. A systematic literature review on the use of artificial intelligence in energy self-management in smart buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 151, p. 111530, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111530>. Acesso em: 22 janeiro 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **PRODIST – Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica**: Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional. 2017. Disponível em: <https://encurtador.com.br/XKbc1>. Acesso em: 13 setembro 2024.

AMURIM, A. D. T. **Uma solução IoT voltada à identificação de equipamentos elétricos com o uso da Computação de Borda**. 2022. 90 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá, Quixadá, 2022. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/65340/1/2022\\_tcc\\_adtamurim.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/65340/1/2022_tcc_adtamurim.pdf). Acesso em: 22 ago. 2024.

ARAVIND, P. R.; SARATH, T. V. Non-intrusive load monitoring for energy consumption disaggregation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART ELECTRONICS AND COMMUNICATION (ICOSEC), 3., 2022, Trichy, India. **2022 3rd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)**. Trichy: IEEE, 2022. p. 14–19. ISBN 9781665457057. Held 20–22 October 2022.

BOYLESTAD, R. L. **Introdução à análise de circuitos**. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012. 959 p. ISBN 978-85-64574-20-5.

BUDDHI, D.; VARGHESE, L. J.; NEERAJA, B.; HAMID, S. S.; CHAKRAVARTHI, M. K. *et al.* Harmonic distortion reduction in power system to improve reliability and power quality. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE COMPUTING, INTELLIGENT COMMUNICATION AND SMART ELECTRICAL SYSTEMS (ICSSES), 2022, Chennai, India. **2022 International Conference on Innovative Computing, Intelligent Communication and Smart Electrical Systems (ICSSES)**. Chennai: IEEE, 2022. p. 1–5. ISBN 9781665408738. Held 5–6 May 2022.

CHENG, H.; OUYANG, Z.; DING, Z.; FANG, K.; HUANG, Y.; TANG, W. Development of a smart meter with non-intrusive load monitoring function. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY, ELECTRICAL AND POWER ENGINEERING (CEEPE), 5., 2022, Chongqing, China. **2022 5th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE)**. Chongqing: IEEE, 2022. p. 822–826. ISBN 9781665479066. Held 22–24 April 2022.

CORRÊA, E. de F. **Redes-em-chip para sistemas embarcados visando a otimização de medidas de qualidade de serviço para aplicações de tempo real**. 131 p. Tese – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível no repositório LUME/UFRGS. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/13659/000652248.pdf?sequence=1>. Acesso em: 22 jan. 2025.

EIRAUDO, S.; BARBIERATO, L.; GIANNANTONIO, R.; PATTI, E.; LANZINI, A.; BOTTACCIOLI, L. Non-intrusive load disaggregation of industrial cooling demand with lstm neural network. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT

AND ELECTRICAL ENGINEERING (EEEIC) / IEEE INDUSTRIAL AND COMMERCIAL POWER SYSTEMS EUROPE, 2022, Prague, Czech Republic. **2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)**. Prague: IEEE, 2022. p. 1–6. ISBN 9781665435975. Held 28 June–1 July 2022.

ENERGIA INTELIGENTE UFJF. **Transmissão de Energia Elétrica: Como funciona**. 2024. Disponível em: <https://energiainteligenteufjf.com.br/como-funciona/transmissao-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 13 setembro 2024.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-C6-DevKitC-1 User Guide**: Esp-devkits documentation. 2024. Disponível em: [https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32c61/esp32-c61-devkitc-1/user\\_guide.html](https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32c61/esp32-c61-devkitc-1/user_guide.html). Acesso em: 22 fevereiro 2025.

FILHO, G. L.; VIEIRA, F. H. T.; FRANCO, R. A. P. Minimização de perdas na distribuição de energia por meio da injeção de potência reativa utilizando geração fotovoltaica. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON), 14., 2021, São Paulo, Brazil. **2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**. São Paulo: IEEE, 2021. p. 918–923. ISBN 9781665431033. Held 15–18 August 2021.

GADO, D. M.; HAMDAN, I.; KAMEL, S.; ABDELAZIZ, A. Y.; JURADO, F. Optimizing energy consumption in smart homes: A comprehensive review of demand side management strategies. In: IEEE CHILEAN CONFERENCE ON ELECTRICAL, ELECTRONICS ENGINEERING, INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES (CHILECON), 2023, Valdivia, Chile. **2023 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)**. Valdivia: IEEE, 2023. p. 1–10. ISBN 9798350369540. Held 5–7 December 2023.

GAMESS, E.; SMITH, B. Performance evaluation of tcp and udp over ipv4 and ipv6 for the esp8266 module. In: INTERNATIONAL ELECTRONICS COMMUNICATION CONFERENCE, 2., 2020, Singapore, Singapore. **Proceedings of the 2nd International Electronics Communication Conference (IECC 2020)**. Singapore: Association for Computing Machinery (ACM), 2020. p. 161–169. ISBN 9781450377706. Held 8–10 July 2020.

GARCÍA-MONGE, M.; ZALBA, B.; CASAS, R.; CANO, E.; GUILLÉN-LAMBEA, S.; LÓPEZ-MESA, B.; MARTÍNEZ, I. Is IoT monitoring key to improve building energy efficiency? case study of a smart campus in spain. **Energy and Buildings**, Amsterdam, v. 285, p. 112882, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112882>. Acesso em: 22 janeiro 2025.

GERBER, D. L.; GHATPANDE, O. A.; NAZIR, M.; HEREDIA, W. G. B.; FENG, W.; BROWN, R. E. Energy and power quality measurement for electrical distribution in AC and DC microgrid buildings. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 308, p. 118308, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118308>. Acesso em: 22 janeiro 2025.

HERNÁNDEZ, J. L.; MIGUEL, I. de; VÉLEZ, F.; VASALLO, A. Challenges and opportunities in european smart buildings energy management: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 199, p. 114472, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114472>. Acesso em: 22 janeiro 2025.

JULIANI, R. A. S.; SILVA, D. A. D.; TEIXEIRA, M. P.; GOLDSCHMIDT, R. R. Desenvolvimento de software baseado em algoritmo genético para determinar a demanda de potência de clientes do grupo a. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON QUALITY OF POWER (CBQEE), 15., 2023, São Luís, Brazil. **2023 XV Brazilian Conference on Quality of Power (CBQEE)**. São Luís: IEEE, 2023. p. 1–6. ISBN 9798350318326. Held 4–6 September 2023.

LILLSTRANG, M.; HARJU, M.; CAMPO, G. del; CALDERON, G.; RÖNING, J.; TAMMINEN, S. Implications of properties and quality of indoor sensor data for building machine learning applications: Two case studies in smart campuses. **Building and Environment**, Amsterdam, v. 207, p. 108529, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108529>. Acesso em: 22 janeiro 2025.

LIU, S.; XIE, Z.; HU, Z. Optimizing smart home appliance energy monitoring using Factorial Hidden Markov Models for Internet of Behavior. **Journal of Building Engineering**, Amsterdam, v. 97, p. 110732, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110732>. Acesso em: 22 janeiro 2025.

LUTERLED. **Fator de Potência: descubra o que é e como calculá-lo**: Site institucional. 2024. Disponível em: <https://www.luterled.com.br/fator-de-potencia>. Acesso em: 12 setembro 2024.

LYONS, R. G. **Understanding Digital Signal Processing**. 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2011. 992 p. ISBN 978-0-13-702741-5.

MEITEL, N. M.; TAMANG, D.; GAO, S. A new harmonic analysis reporting technique to improve power quality in distribution system network applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN ELECTRICAL, COMPUTING, COMMUNICATION AND SUSTAINABLE TECHNOLOGIES (ICAECT), 2021, Bhilai, India. **2021 International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT)**. Bhilai: IEEE, 2021. p. 1–5. ISBN 9781728196295. Held 19–20 February 2021.

METALLIDOU, C. K.; PSANNIS, K. E.; EGYPTIADOU, E. A. Energy efficiency in smart buildings: IoT approaches. **IEEE Access**, Piscataway, NJ, v. 8, p. 63679–63699, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984461>. Acesso em: 22 janeiro 2026.

MIN-ALLAH, N.; ALRASHED, S. Smart campus—a sketch. **Sustainable Cities and Society**, Amsterdam, v. 59, p. 102231, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102231>. Acesso em: 22 janeiro 2025.

MUNOZ, O.; RUELAS, A.; ROSALES-ESCOBEDO, P. F.; ACUÑA, A.; SUASTEGUI, A.; LARA, F.; REYES-ZAMORA, R. A.; ROCHA, A. Development of an IoT smart energy meter with power quality features for a smart grid architecture. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, Amsterdam, v. 43, p. 100990, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2024.100990>. Acesso em: 22 janeiro 2025.

RODRÍGUEZ-PAJARÓN, P.; HERNÁNDEZ, A.; MILANOVIĆ, J. V. Influence of transformer rating on power quality indices in low voltage residential networks. In: MEDITERRANEAN ELECTROTECHNICAL CONFERENCE (MELECON), 20., 2020, Palermo, Italy. **2020 IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)**. Palermo: IEEE, 2020. p. 594–598. Held 16–18 June 2020.

ROSÁRIO, J. M. **Automação industrial**. 1. ed. São Paulo: Baraúna, 2012. 515 p. ISBN 978-85-7923-000-4.

SHANGHAI BELLING CORP., LTD. **BL0942 Calibration-free Metering IC Datasheet**. Shanghai, China, 2023. Datasheet. Versão V1.06. Disponível em: [https://www.belling.com.cn/media/file\\_object/bel\\_product/BL0942/datasheet/BL0942\\_V1.06\\_en.pdf](https://www.belling.com.cn/media/file_object/bel_product/BL0942/datasheet/BL0942_V1.06_en.pdf). Acesso em: 24 jul. 2025.

SILVA, W. N.; BANDÓRIA, L. H. T.; DIAS, B. H.; ALMEIDA, M. C. de; OLIVEIRA, L. W. de. Generating realistic load profiles in smart grids: An approach based on nonlinear independent component estimation (NICE) and convolutional layers. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 351, p. 121902, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121902>. Acesso em: 22 janeiro 2025.

STEEPEN, S.; SHEEBA, R.; NAUFAL, N. A review on non-intrusive load monitoring using deep learning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIONS IN SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (ICISTSD), 2022, Kollam, India. **2022 International Conference on Innovations in Science and Technology for Sustainable Development (ICISTSD)**. Kollam: IEEE, 2022. p. 381–385. ISBN 9781665499378. Held 25–26 August 2022.

TANG, X.; RENTERIA-PINON, M.; TANG, W. Dynamic predictive sampling analog to digital converter for sparse signal sensing. **IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs**, Piscataway, NJ, v. 70, n. 7, p. 2360–2364, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TCSII.2023.3238279>. Acesso em: 22 janeiro 2025.

TORSHIN, R.; BOBROVSKY, D.; ULANOVA, A.; SOROKOUMOV, G.; KALASHNIKOVA, M.; TITOVETS, D. Total ionizing dose effects in high-speed 16-bit analog-to-digital converter. In: MOSCOW WORKSHOP ON ELECTRONIC AND NETWORKING TECHNOLOGIES (MWENT), 2022, Moscow, Russia. **2022 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)**. Moscow: IEEE, 2022. p. 1–3. ISBN 9781665496667. Held 9–11 June 2022.

ZHANG, Y.; QIAN, W.; YE, Y.; LI, Y.; TANG, Y.; LONG, Y.; DUAN, M. A novel non-intrusive load monitoring method based on ResNet-seq2seq networks for energy disaggregation of distributed energy resources integrated with residential houses. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 349, p. 121703, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121703>. Acesso em: 22 janeiro 2026.