



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

GABRIEL SOARES DE SOUSA

**PROJETO PRELIMINAR DE UM PROTÓTIPO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE
DE ENERGIA ELÉTRICA DE BAIXO CUSTO**

**Palmas,
TO 2025**

GABRIEL SOARES DE SOUSA

**PROJETO PRELIMINAR DE UM PROTÓTIPO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE
DE ENERGIA ELÉTRICA DE BAIXO CUSTO**

Monografia apresentada à Universidade Federal do
Tocantins (UFT), Campus Universitário de Palmas
para obtenção do título de bacharel em Engenharia
Elétrica

Orientador (a): ME. Alex Vilarindo Menezes

**Palmas,
TO 2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

S725p Sousa, Gabriel Soares de.
Projeto preliminar de um protótipo para análise da qualidade de
energia elétrica de baixo custo. / Gabriel Soares de Sousa. –
Palmas, TO, 2025.
41 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins –
Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica,
2025.

Orientador: Alex Vilarindo Menezes

1. Qualidade de Energia. 2. PRODIST. 3. Microcontrolador. 4.
Protótipo de Análise. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de
qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que
citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime
estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha
catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

GABRIEL SOARES DE SOUSA

**PROJETO PRELIMINAR DE UM PROTÓTIPO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE
DE ENERGIA ELÉTRICA DE BAIXO CUSTO**

Monografia apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica foi avaliado para a obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Elétrica e aprovada (o) em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: ____/____/____

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 **ALEX VILARINDO MENEZES**
Data: 03/07/2025 11:06:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Msc. Alex Vilarindo Menezes, Universidade Federal do Tocantins

Documento assinado digitalmente
 **ALCY MONTEIRO JÚNIOR**
Data: 03/07/2025 11:22:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Msc. Alcy Monteiro Júnior, Universidade Federal do Tocantins

Documento assinado digitalmente
 **JOSE DE ARIMATEIA ALVES VIEIRA FILHO**
Data: 03/07/2025 11:33:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Msc. Eletricista José de Arimatéia Alves Vieira Filho, membro
externo

AGRADECIMENTO

A Deus em primeiro lugar, agradeço pois sem sua benção essa empreitada não seria realizada, segundamente a minha Mãe e minha irmã que se doaram incansavelmente em prol desse sonho.

Agradeço a todos os meus tios em nome das minhas tias Márcia, Maria Elena e os tios Gilmar e Josias, tios que me ensinaram que o trabalho duro é honrado e enriquecedor. Agradeço aos meus primos Aroldo, Ana Paula, Daniela, Fernando, Suzana, Samir e Vanessa, que se fizeram grandes companheiros e amigos ao longo de minha história.

Agradeço a minha família de Palmas, minha namorada Aléxya Vieira e sua família que estiveram me dando apoio e motivação nos anos finais da minha graduação. Meus amigos Luís, Isaque, Gustavo, Hugo, Vitor, Regina, Maria Clara, Gabriela e Antônia

Agradeço aos meus professores Alex, Alcy, Alexandre, Eliel, Marilene, Priscila e Adelicio.

Por último, e não menos importante agradeço a quatro pessoas que foram morar com Deus minha avó Catarina, minha bisavó Bárbara Soares da Silva, meu bisavô Antônio Pereira da Silva e meu tio Wilton Soares de Sousa, que enquanto vivos se doaram desmedidamente em todos os dias de suas vidas para que eu pudesse ter uma educação de qualidade e usasse o conhecimento para melhorar a situação do nosso povo, obrigado pelo trabalho de vocês.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo portátil para medição da qualidade da energia elétrica em ambientes residenciais, com foco no atendimento às diretrizes estabelecidas pelo Módulo 8 do PRODIST da ANEEL. O dispositivo é baseado no microcontrolador ESP32 e utiliza circuitos de condicionamento de sinal, compostos por divisores resistivos e resistores *shunt*, para realizar medições diretas de tensão e corrente em tomadas comuns. Após a aquisição dos sinais analógicos, o microcontrolador executa a conversão analógico-digital e aplica algoritmos específicos para o cálculo de indicadores como o Desvio de Referência Positivo (DRP) e Desvio de Referência Central (DRC), os quais refletem distorções e variações na forma de onda da rede elétrica. O projeto busca aliar robustez eletrônica, simplicidade de operação e baixo custo, favorecendo sua aplicação em fiscalizações, manutenções preventivas e estudos de eficiência energética em pequenas instalações. A arquitetura modular do sistema permite, ainda, a transmissão dos dados processados para servidores em nuvem, viabilizando o monitoramento remoto em tempo real. Os resultados demonstram a viabilidade técnica da proposta e seu potencial de aplicação prática, contribuindo para a democratização do acesso a instrumentos de medição de qualidade da energia, tradicionalmente restritos a ambientes industriais ou laboratoriais.

Palavras-chaves: Qualidade de Energia. Microcontrolador. Prodist.

ABSTRACT

This work presents the development of a portable prototype for measuring power quality in residential environments, focusing on compliance with the guidelines established by Module 8 of ANEEL's PRODIST. The device is based on the ESP32 microcontroller and employs signal conditioning circuits, consisting of resistive voltage dividers and shunt resistors, to perform direct voltage and current measurements from standard electrical outlets. Once the analog signals are acquired, the microcontroller carries out analog-to-digital conversion and applies specific algorithms to compute indicators such as the Positive Reference Deviation (PRD) and Central Reference Deviation (CRD), which reflect waveform distortions and variations in the power supply. The project aims to combine electronic robustness, ease of operation, and low cost, favoring its application in inspections, preventive maintenance, and energy efficiency studies in small-scale installations. Furthermore, the system's modular architecture enables the transmission of processed data to cloud servers, allowing for real-time remote monitoring. The results demonstrate the technical feasibility of the proposed solution and its potential for practical application, contributing to the democratization of access to power quality measurement instruments, which are traditionally limited to industrial or laboratory environments.

Key-words: Power Quality. Microcontroller. Prodlist.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Faixas de aceitação da tensão elétrica conforme o PRODIST – Módulo 8.....	19
Figura 2 - Circuito de condicionamento com AMC1100.....	33
Figura 3 - Circuito com amplificador isolador	24
Figura 4 – Vistas frontal e lateral do dispositivo desenvolvido.....	35
Figura 5 – Disposição dos blocos do circuito.....	36
Figura 6 – Diagrama em blocos do processo de aquisição e tratamento dos sinais.....	37

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparativo entre ESP32 e ATmega328P	30
Quadro 2 – Comparativo de memórias entre ESP32 e ATmega328P	31

LISTA DE SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

DRC – Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica

DRP – Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária

FFT – Transformada Rápida de Fourier (FFT)

PDS - Processamento Digital de Sinais (PDS)

QEE – Qualidade da Energia Elétrica

VTCD – Variação de Tensão de Curta Duração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa.....	16
1.2	Objetivos.....	16
1.2.1	Objetivo Geral	17
	Objetivos Específicos	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Qualidade da Energia Elétrica (QEE)	18
2.2	Parâmetros Técnicos de Qualidade da Tensão.....	18
2.3	Responsabilidades dos Agentes do Setor Elétrico	19
2.4	Impactos da Má Qualidade da Energia Elétrica.....	20
2.4.1	Medição da Qualidade da Energia Elétrica.....	21
2.4.2	Circuitos de Condicionamento de Sinal.....	23
2.4.3	Tecnologias Embarcadas Aplicadas à Medição Elétrica.....	25
2.4.4	Evolução dos Microcontroladores e Suas Capacidades de Medição.....	26
2.4.5	Conectividade e Monitoramento Remoto	26
2.4.6	CrITÉrios de Amostragem e Processamento Digital de Sinais (PDS)	27
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	Microcontrolador	30
3.2	MemÓria	34
3.3	Obtenção dos valores de tensão	35
3.4	Proteção do Circuito	36
3.5	Implementação e Fonte de Alimentação Alternativa	36
4	RESULTADOS E ANÁLISE	38
4.1	Interface e Designer.....	38
4.2	Aquisição, Processamento e Transmissão dos Dados	39
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

As recentes transformações no setor elétrico brasileiro, com a crescente participação da iniciativa privada na operação das distribuidoras, têm elevado a importância do monitoramento preciso da qualidade da energia elétrica fornecida ao consumidor final. Nesse contexto, torna-se fundamental o estabelecimento de indicadores de desempenho que permitam avaliar e controlar a Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Conforme destaca a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021b), a modernização dos serviços e a crescente demanda por confiabilidade no fornecimento exigem mecanismos cada vez mais robustos de supervisão e análise dos parâmetros elétricos.

Um dos principais fatores que impactam a QEE é o desequilíbrio de tensão (DT), provocado pela distribuição assimétrica de cargas nas fases, uma condição que varia constantemente devido à inserção ou retirada de cargas no sistema (TEODORO, 2005; TORREZAN et al., 2018). Esse tipo de assimetria pode ocorrer mesmo na ausência de desequilíbrio de corrente, especialmente em redes de distribuição não transpostas e com geometrias irregulares, resultando em distorções de tensão na carga. Os impactos mais comuns incluem a redução da vida útil de motores elétricos, perda de desempenho, variações de torque, e outros efeitos adversos em equipamentos eletroeletrônicos.

Outro fenômeno relevante é a flutuação de tensão, caracterizada por variações aleatórias, periódicas ou esporádicas, dos valores eficazes ou de pico da tensão instantânea. Segundo a ANEEL (2021a), esse efeito, amplamente associado ao comportamento de cargas variáveis, é comum em redes de baixa tensão onde atuam dispositivos como eletrodomésticos, bombas d'água e elevadores. As consequências incluem oscilações na iluminação (*flicker*), interrupções no fornecimento de energia e danos a equipamentos sensíveis. Além desses efeitos, o Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) também aponta outros fenômenos críticos que afetam a QEE, como o fator de potência inadequado, presença de harmônicos e variações na frequência da rede.

Diante desse cenário, este trabalho propõe o desenvolvimento de um mini analisador de energia elétrica para uso residencial. O dispositivo será capaz de realizar leituras de tensão em intervalos curtos de tempo, seguindo os parâmetros definidos em norma, e integrado a uma aplicação em rede responsável por gerar relatórios iniciais sobre a QEE. O objetivo principal é fornecer uma ferramenta acessível para a identificação rápida e eficiente de anomalias relacionadas à qualidade da energia elétrica em ambientes residenciais, contribuindo para diagnósticos mais precisos e ações corretivas mais eficazes.

1.1 Justificativa

Com a popularização das fontes de energia renováveis e a adoção crescente de veículos elétricos e outras tecnologias emergentes, têm surgido desafios para a estabilidade e a eficiência do Sistema Nacional Interligado de Energia (SNIE). Esses avanços, embora benéficos, têm impactado de maneira complexa a operação e a qualidade da energia fornecida, revelando problemas que podem afetar a confiabilidade e a segurança do fornecimento energético.

Neste contexto, é importante que os consumidores residenciais estejam equipados com ferramentas que lhes permitam monitorar e avaliar a qualidade da energia que recebem. Identificar e relatar problemas de forma eficiente é essencial para garantir a continuidade e a integridade do fornecimento de energia, além de facilitar a comunicação com as concessionárias responsáveis pela distribuição.

Nesse contexto o presente trabalho visa conceber a ideia inicial de um analisador de qualidade de energia monofásico para uso residencial. O objetivo é criar um sistema para uso em residências capaz de gerar um relatório inicial sobre a qualidade da energia, que possa ser utilizado pelo consumidor para identificar e documentar quaisquer irregularidades.

Esse relatório será valioso para uma comunicação clara com a concessionária, possibilitando maior eficiência na identificação de problemas que afetam a QEE. A proposta deste trabalho é, assim, uma resposta à necessidade emergente de soluções que integrem monitoramento tecnológico com suporte ao consumidor, contribuindo para a melhoria contínua da qualidade e da confiabilidade do fornecimento de energia elétrica.

1.2 Objetivos

Esta subseção trata dos objetivos a serem alcançados com o presente trabalho e está dividida em duas partes, onde a primeira trata dos objetivos gerais do trabalho e a segunda dos objetivos específicos para alcançá-los.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é a concepção inicial de um analisador de qualidade de energia monofásico para uso residencial assim sua proposta geral consiste na formulação da ideia de um protótipo que consiga fazer a leitura da tensão e mostrar os indicadores do módulo 8 do PRODIST referente à qualidade de energia.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- ❖ Determinar os componentes eletrônicos que serão utilizados nesse protótipo para análise da qualidade de energia.
- ❖ Estabelecer a forma como os valores de tensão serão obtidos
- ❖ Determinar a proteção do circuito
- ❖ Determinar os blocos do circuito

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos e os estudos prévios que embasaram o desenvolvimento do presente trabalho. Inicialmente, são discutidos os conceitos essenciais relacionados à qualidade da energia elétrica, com base nas diretrizes estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) por meio do Módulo 8 do PRODIST. Em seguida, são abordadas as principais abordagens e dispositivos utilizados para a medição da qualidade da energia, com destaque para soluções embarcadas de baixo custo. O capítulo também contempla uma análise aprofundada dos circuitos de condicionamento de sinal aplicados à medição de tensões e correntes, evidenciando suas vantagens e limitações. Na sequência, são exploradas as tecnologias embarcadas mais adequadas para esse tipo de aplicação, especialmente microcontroladores como o ESP32, ressaltando suas características de desempenho e conectividade. Por fim, discute-se o processamento digital de sinais, incluindo critérios de amostragem, resolução, e os algoritmos empregados na extração dos principais indicadores de qualidade da energia elétrica.

2.1 Qualidade da Energia Elétrica (QEE)

A qualidade da energia elétrica (QEE) é um aspecto fundamental para a operação eficiente, segura e confiável dos equipamentos conectados ao sistema elétrico. Segundo o Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica) da Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL (2021a), a QEE refere-se à conformidade das grandezas elétricas com parâmetros técnicos estabelecidos que asseguram o adequado funcionamento dos equipamentos dos usuários e a operação segura do sistema de distribuição.

Ainda de acordo com (ANEEL, 2021b), a QEE abrange tanto a continuidade do fornecimento quanto as características da forma de onda da tensão, incluindo suas variações e distúrbios, como será detalhado a seguir.

2.2 Parâmetros Técnicos de Qualidade da Tensão

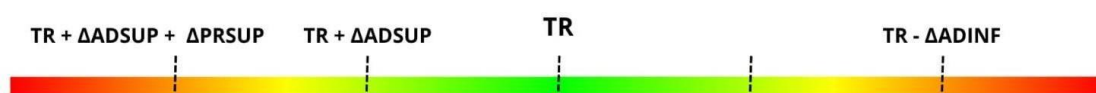
Aneel (2021) estabelece os seguintes parâmetros principais a serem monitorados pelas concessionárias e consumidores:

- Variações de Tensão: incluem quedas de tensão, elevações (picos) e interrupções. As variações de curta duração são especialmente críticas em ambientes residenciais e industriais, podendo causar falhas em equipamentos eletrônicos sensíveis;
- Flutuações de Tensão (*Flicker*): variações rápidas e repetitivas na amplitude da tensão, perceptíveis pela oscilação da luminosidade de lâmpadas, por exemplo;
- Distorção Harmônica Total (DHT): ocorre devido à presença de componentes harmônicos na tensão ou corrente, originadas por cargas não lineares. A DHT é um indicador essencial para verificar a conformidade da forma de onda com o padrão senoidal ideal;
- Desequilíbrio de Tensão: refere-se à diferença de amplitude entre as fases de um sistema trifásico. Desequilíbrios acima do permitido podem comprometer motores e outros equipamentos trifásicos;
- Frequência: embora o Brasil opere oficialmente em 60 Hz, pequenas variações são aceitáveis. A frequência está associada ao equilíbrio entre geração e demanda de energia.

A conformidade desses parâmetros é essencial para garantir que o fornecimento de energia elétrica não comprometa o funcionamento dos equipamentos dos consumidores.

A Figura 1 ilustra graficamente as faixas de aceitabilidade da tensão de fornecimento segundo o Módulo 8 do PRODIST, destacando os limites normativos entre a tensão de referência (TR), a zona de adequação (ΔA), a zona precária (ΔPR) e os limites críticos.

Figura 1 - Faixas de aceitação da tensão elétrica conforme o PRODIST – Módulo 8



Fonte: Adaptado de ANEEL, (2021).

2.3 Responsabilidades dos Agentes do Setor Elétrico

ANEEL (2021b) também define as responsabilidades dos agentes envolvidos. Onde as distribuidoras são responsáveis por garantir que a qualidade da energia, até o ponto de entrega (normalmente no padrão do consumidor), esteja de acordo com os parâmetros normatizados. Devem implementar sistemas de monitoramento contínuo, realizar manutenções preventivas

e corretivas e investir em tecnologias para mitigação de distúrbios.

Já para os consumidores, (ANEEL, 2021) afirma que os mesmos devem zelar pelo uso adequado da energia, evitando instalar cargas que possam causar distúrbios significativos à rede, como grandes motores sem controle de partida ou inversores mal configurados. Além disso, devem garantir que seus sistemas de aterramento e proteção estejam em conformidade com as normas técnicas.

2.4 Impactos da Má Qualidade da Energia Elétrica

Os distúrbios na qualidade da energia elétrica, conforme Julian Villelia Padilla (2008), compreendem uma série de anomalias que afetam a forma de onda ideal da corrente e tensão. Entre eles, destacam-se os transitórios, que são surtos impulsivos (causados por raios) ou oscilatórios (por manobras no sistema), podendo danificar equipamentos. As variações de tensão de curta duração incluem interrupções (corte total), depressões (quedas momentâneas, como em partidas de motores) e saltos (aumentos súbitos de tensão), capazes de causar desligamentos ou danos.

As variações de longa duração são interrupções sustentadas, subtensões (tensão baixa contínua) e sobretensões (tensão alta contínua). O desequilíbrio de tensão ocorre quando as fases não estão simétricas, afetando motores e causando perdas. As distorções da forma de onda englobam a presença de corrente contínua, harmônicos (múltiplos da frequência fundamental, gerados por cargas não lineares que levam a sobreaquecimento e mau funcionamento), inter-harmônicos, cortes (variações rápidas da tensão causadas por eletrônica de potência) e ruído. Por fim, as flutuações de tensão são variações que causam "flicker" em iluminação, e as variações de frequência, embora raras em sistemas modernos, podem afetar máquinas rotativas, principalmente em sistemas isolados.

A presença de distúrbios elétricos, variações fora dos limites normativos e deformações na forma de onda de tensão caracteriza uma situação de má qualidade da energia elétrica. Os impactos desse cenário são amplos e afetam diretamente a eficiência, a segurança e a durabilidade dos equipamentos conectados à rede (Bhattacharyya, 2011).

Majhi e Mohanty (2024) dizem que em ambientes residenciais, por exemplo, flutuações de tensão podem provocar o desligamento inesperado de eletrodomésticos sensíveis, a perda de dados em dispositivos eletrônicos e até a queima de componentes, especialmente em equipamentos que não possuem proteção interna adequada contra surtos ou variações de tensão. Já no setor industrial, onde os processos são muitas vezes automatizados e fortemente

dependentes de sistemas de controle eletrônico, a má qualidade da energia pode ocasionar falhas em máquinas, paradas de produção, disparos indevidos de disjuntores e desgaste acelerado de motores (Hrytsyk, 2024).

Equipamentos como inversores de frequência, controladores lógicos programáveis (CLPs) e sensores são particularmente vulneráveis a distorções harmônicas e desequilíbrios de tensão, podendo ter seu desempenho comprometido ou mesmo sofrer danos permanentes. Além disso, variações frequentes ou prolongadas na frequência da rede podem interferir na temporização de processos críticos, resultando em desvios operacionais e ineficiências (Silva, 2024).

De acordo com Zapf *et al.* (2021), a longo prazo, a exposição constante a uma alimentação elétrica fora dos padrões definidos também contribui para o envelhecimento precoce de equipamentos, exigindo substituições mais frequentes e elevando os custos de manutenção. Esse aumento nos custos operacionais impacta negativamente a competitividade das empresas e, no caso dos consumidores residenciais, representa prejuízos financeiros e desconforto.

Do ponto de vista energético, a má qualidade da energia implica em perdas técnicas adicionais e no uso ineficiente dos recursos disponíveis (Shabalov *et al.* 2021). Cargas operando sob tensão inadequada ou distorcida consomem mais energia ativa e reativa do que o necessário, o que sobrecarrega o sistema de distribuição e reduz o fator de potência das instalações. Essa condição compromete o desempenho global do sistema elétrico e pode resultar em penalidades contratuais para os consumidores de média e alta tensão, conforme estabelecido pela ANEEL, (2021a).

Desse modo, deve-se considerar que a manutenção da qualidade da energia elétrica é um elemento essencial não apenas para a integridade dos dispositivos eletrônicos, mas também para a confiabilidade do fornecimento de energia como um todo. A atuação preventiva, por meio de medições contínuas e da identificação antecipada de anomalias, é fundamental para promover a eficiência energética, garantir a continuidade dos serviços e mitigar os riscos associados ao fornecimento de energia fora dos padrões normativos.

2.4.1 Medição da Qualidade da Energia Elétrica

A medição da qualidade da energia elétrica constitui etapa essencial para identificar e quantificar os distúrbios que afetam a forma de onda de tensão e corrente, garantindo o atendimento às especificações normativas e promovendo ações corretivas quando necessário

(Sepasi, Talichet e Pramanik, 2023). Tradicionalmente, esse monitoramento é realizado por meio de analisadores de energia dedicados, equipamentos cujos circuitos internos combinam sensores de tensão e corrente de alta precisão, conversores A/D de elevada resolução e algoritmos conformes com padrões normativos, tais como a (ABNT NBR IEC 61000-4-30, 2023), que define métodos de teste e procedimentos de medição para sinais de energia elétrica. Esses instrumentos costumam adotar amostragens de até várias dezenas de quilohertz, permitindo a análise de harmônicos de ordem elevada e a detecção de fenômenos transitórios, como picos de tensão e interrupções momentâneas (Frigo e Braun, 2022).

Entretanto, os analisadores comerciais apresentam limitações quando o objetivo é flexibilizar o ponto de medição e reduzir custos. Sua elevada complexidade de hardware e software, além do custo unitário e do tamanho físico, restringem a aplicação em estudos de extensão e em instalações residenciais de pequeno porte (Fotis *et al.* 2022). Para contornar tais dificuldades, diversos trabalhos acadêmicos e monografias voltaram-se para o desenvolvimento de sistemas embarcados de medição de qualidade de energia.

Destaca-se, entre eles, o protótipo proposto por Oliveira (2022), que utilizou o ESP32 para amostrar tensão monofásica, realizar cálculos de valor eficaz (V_{rms}) e estimar o fator de potência, mas ficou restrito à avaliação de tensões e não contemplou medições de flicker ou THD completas.

Mais recentemente, projetos baseados em microcontroladores avançados e FPGAs têm explorado a possibilidade de implementar, em firmware, as rotinas de cálculo de índices como Variação de Tensão de Curta Duração (V_{TCD}), Duração Relativa de Transgressão da Tensão Precária (DRP) e Distorção Harmônica Total (DHT) (Bertuol, 2021). Nessas implementações, o principal desafio está em garantir precisão suficiente nos conversores A/D integrados aos microcontroladores, cuja resolução e linearidade muitas vezes ficam aquém dos requisitos de classe A definidos por (ABNT, 2023).

Esse descompasso é frequentemente compensado pelo uso de circuitos de condicionamento, divisores resistivos e resistores *shunt*, associados a amplificadores de isolamento de alto desempenho, como o AMC1200, que asseguram ganho fixo (Zhao *et al.* 2016), baixa não linearidade (Ulvgaard, Kamf e Leijon, 2016) e certificação de isolamento galvânica (Gu e Kshirsagar, 2017).

No contexto acadêmico, a comparação entre análises em tempo real e gravações *off-line* demonstra que a escolha da taxa de amostragem e do número de pontos por fundamental são decisivos para a fidelidade da medição (Baghezza *et al.* 2021). Oppenheim e Willsky (2015) apontam através do teorema de Nyquist que, para a correta avaliação de uma harmônica a

frequência de amostragem deve ser pelo menos o dobro da maior frequência presente no sinal. Considerando harmônicos de até a 50ª ordem, é recomendável amostrar de no mínimo 3 kHz, o que impõe exigências de processamento que ultrapassam as capacidades de microcontroladores de 8 bits. Por sua vez, plataformas de 32 bits, como o ESP32, suportam algoritmos de transformada rápida de Fourier (FFT) em tempo real, desde que adequadamente otimizados, permitindo a implementação de filtros digitais passa-faixa e a avaliação automática dos indicadores de qualidade (Gazis *et al.* 2025).

2.4.2 Circuitos de Condicionamento de Sinal

A medição precisa de grandezas elétricas em sistemas embarcados exige que os sinais capturados, como tensão e corrente, sejam devidamente condicionados antes de serem aplicados aos conversores analógico-digitais (A/D) dos microcontroladores (Urrie, 2021). Isso se deve ao fato de que os sinais elétricos presentes nas instalações, especialmente os de tensão de alimentação, encontram-se em níveis elevados, muitas vezes superiores a 127 V ou 220 V eficazes, enquanto os microcontroladores operam com tensões de entrada admissíveis da ordem de milivolts a poucos volts (Petinrin *et al.* 2022). O circuito de condicionamento de sinal tem, portanto, a função primordial de adaptar a amplitude dessas grandezas, preservar a forma de onda e garantir a segurança dos dispositivos de medição e do usuário, frequentemente incorporando etapas de proteção e isolamento elétrica.

No caso da medição de tensão, uma das soluções mais amplamente adotadas é o uso de divisores resistivos (Martins *et al.* 2023). Esses circuitos são formados por dois ou mais resistores conectados em série, permitindo que apenas uma fração da tensão total seja aplicada à entrada do sistema de aquisição. Sua simplicidade, baixo custo e fácil implementação os tornam ideais para aplicações embarcadas. No entanto, o projeto desses divisores deve considerar não apenas a proporção de redução, mas também a potência dissipada, a tolerância dos resistores e a impedância de entrada do circuito subsequente, de forma a evitar erros por carga ou distorções na forma de onda.

Segundo Xie *et al.* 2022 a seleção dos valores resistivos é essencial para garantir que a tensão de saída permaneça dentro da faixa linear de entrada do conversor A/D e, ao mesmo tempo, que as perdas por dissipação sejam minimizadas.

Para a medição de corrente, diversas abordagens são possíveis, incluindo transformadores de corrente, sensores de efeito *Hall* e resistores *shunt*. Dentre essas alternativas, os resistores *shunt* se destacam pois de acordo com Mendes e Paludo (2021)

possuem simplicidade construtiva e pela resposta linear direta à corrente que circula por eles.

Ao permitir a leitura da corrente por meio da queda de tensão gerada em um resistor de baixo valor ôhmico, essa técnica apresenta excelente relação custo-benefício, sendo amplamente utilizada em aplicações embarcadas e de medição industrial (Baraka e Amanquah, 2024). Contudo, como a tensão gerada por um resistor *shunt* também pode conter níveis muito baixos, da ordem de milivolts, é necessária uma etapa adicional de amplificação que preserve a fidelidade do sinal e proteja os componentes sensíveis contra potenciais diferenças elevadas entre os lados de medição e de controle.

É nesse contexto que se insere o uso de amplificadores isoladores, como o AMC1200, que tem ganhado destaque em projetos de medição de sinais de baixa amplitude com requisitos de isolamento galvânica. O AMC1200 combina um amplificador diferencial de alta precisão (Chub *et al.* 2021) com uma barreira de isolamento baseada em dióxido de silício, capaz de suportar tensões de pico superiores a 4.000 V (Texas Instruments, 2016). Essa característica torna o componente adequado para sistemas embarcados que precisam operar em ambientes ruidosos ou onde há risco de diferença de potencial entre os circuitos de entrada e saída. Além disso, o AMC1200 possui ganho fixo de 8, saída compatível com sistemas de 3,3 V e uma faixa de entrada de ± 250 V, sendo ideal para acoplar-se tanto a divisores de tensão quanto a resistores *shunt* (Texas Instruments, 2016).

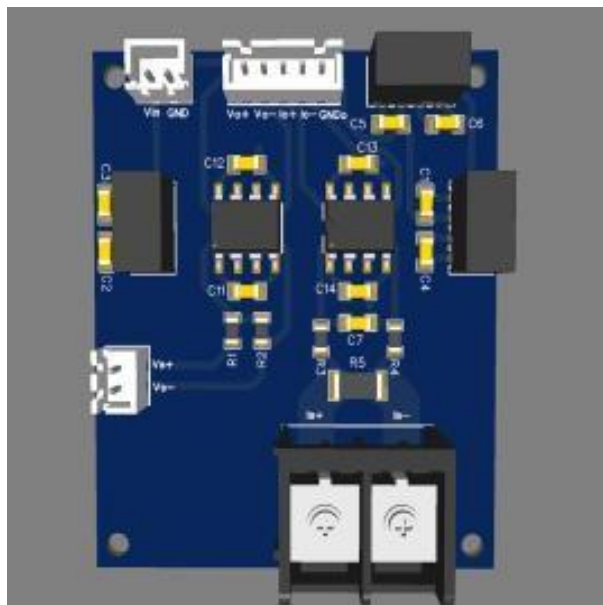
O emprego de amplificadores isoladores também elimina a necessidade de transformadores, que embora eficientes, são volumosos e caros, além de introduzirem atrasos e distorções indesejadas, especialmente em aplicações de medição em tempo real. O uso combinado de divisores resistivos, resistores *shunt* e amplificadores isoladores proporciona, assim, uma solução compacta, robusta e de alta fidelidade para aquisição de sinais elétricos em sistemas de monitoramento portáteis, como o desenvolvido neste trabalho. Essa estratégia permite atender aos critérios técnicos de (ANEEL, 2021) e ao mesmo tempo, viabiliza uma implementação prática de baixo custo voltada ao consumidor final, com aplicações em ambientes residenciais e comerciais de pequeno porte.

A literatura recente reforça o uso desses circuitos como base para projetos de medição, demonstrando que, quando bem dimensionados, eles são capazes de preservar a forma de onda da grandeza medida, apresentar baixa distorção e operar com alta linearidade, mesmo em condições de carga variada. Dessa forma, o domínio e o correto projeto dos circuitos de condicionamento de sinal constituem etapa crítica para o sucesso de qualquer sistema de aquisição de dados elétricos, sendo, portanto, um dos pilares deste trabalho.

Portanto, evidencia-se a aplicação prática do uso de amplificadores isoladores, no

projeto destacado na figura 3.

Figura 3 Circuito com amplificador isolador



Fonte: Pereira, Dirceu

2.4.3 Tecnologias Embarcadas Aplicadas à Medição Elétrica

A utilização de tecnologias embarcadas no contexto da medição da qualidade da energia elétrica tem se tornado uma tendência cada vez mais relevante, impulsionada pela necessidade de soluções compactas, acessíveis e com capacidade de processamento local. Diferentemente dos analisadores industriais tradicionais, que geralmente são equipamentos de alto custo e voltados à utilização em centros de medição fixos, os sistemas embarcados oferecem a possibilidade de desenvolver dispositivos portáteis e personalizados, capazes de realizar medições específicas conforme as normas do setor elétrico, com destaque para o módulo 8 da PRODIST e os padrões da IEEE. Essa abordagem abre caminho para aplicações mais próximas ao consumidor final, incluindo o uso residencial, a inspeção em campo por técnicos e até mesmo o monitoramento de pontos críticos na rede com rápida instalação e baixo custo operacional.

2.4.4 Evolução dos Microcontroladores e Suas Capacidades de Medição

De acordo com Iroanusi (2021) os microcontroladores representam o núcleo lógico dos sistemas embarcados de medição, sendo responsáveis tanto pela aquisição dos sinais elétricos, quanto pelo processamento e armazenamento dos dados. Nos últimos anos, houve uma evolução significativa desses dispositivos, em especial com a disseminação de microcontroladores de 32 bits com alto poder de processamento, como os da família ESP32, que oferecem arquitetura moderna, interfaces digitais versáteis e conectividade sem fio integrada (Espressif, 2025).

Projetado pela Espressif, o ESP32 destaca-se por possuir um ou dois núcleos de processamento Tensilica Xtensa LX6, operando com frequências que podem alcançar até 240 MHz. Essa capacidade computacional permite a execução de algoritmos de análise de sinais em tempo real, como o cálculo do valor eficaz (V_{rms}), detecção de picos de tensão e transformadas rápidas de Fourier (FFT), algo impraticável em microcontroladores de 8 bits, como o ATmega328P, amplamente utilizado em plataformas Arduino (Iyah, 2023). Além disso,

o ESP32 conta com uma grande quantidade de memória RAM (~520 KB) e *flash* (até 4 MB), o que viabiliza a implementação de buffers circulares para aquisição contínua de amostras e a posterior aplicação de filtros digitais e janelas de análise, conforme exigido por normas técnicas.

Outro fator que justifica a adoção de microcontroladores como o ESP32 para sistemas de medição é sua flexibilidade de programação e compatibilidade com plataformas de desenvolvimento amplamente acessíveis, como Arduino IDE e MicroPython, permitindo o desenvolvimento rápido de protótipos funcionais (Hakki, 2021). Isso o torna ideal para pesquisadores e desenvolvedores que buscam explorar soluções inovadoras em ambientes acadêmicos ou de inovação tecnológica.

2.4.5 Conectividade e Monitoramento Remoto

Gomes (2024) diz que além do desempenho computacional, a presença de conectividade nativa via *Wi-Fi* e *Bluetooth* diferencia o ESP32 de microcontroladores mais simples e expande consideravelmente suas possibilidades de aplicação em projetos de monitoramento de energia. Com essa capacidade, torna-se viável desenvolver sistemas capazes de enviar dados de medição em tempo real para servidores remotos, plataformas na nuvem ou aplicações móveis, sem a necessidade de interfaces físicas adicionais. Essa funcionalidade é particularmente

importante para projetos que visam a construção de redes de sensores distribuídos ou que demandam visualização remota dos parâmetros de qualidade da energia elétrica.

Tal abordagem contribui diretamente para a democratização do acesso ao diagnóstico da rede elétrica, possibilitando que usuários residenciais ou pequenos comerciantes monitorem seus próprios padrões de fornecimento e identifiquem, de maneira autônoma, irregularidades como quedas frequentes, sobrecargas e distorções. Em um cenário de expansão das cidades inteligentes (*smart cities*) e de crescente interesse por eficiência energética, a capacidade de integrar dispositivos embarcados à infraestrutura digital torna-se um diferencial estratégico.

Dessa forma, a adoção de tecnologias embarcadas com microcontroladores de alto desempenho representa um avanço significativo no campo da medição da qualidade da energia elétrica. Essas soluções aliam portabilidade, custo reduzido, robustez e escalabilidade, permitindo o desenvolvimento de dispositivos como o proposto neste trabalho: um medidor portátil, de uso direto em tomadas residenciais, capaz de realizar amostragens periódicas e fornecer indicadores-chave de qualidade conforme os requisitos estabelecidos pela ANEEL.

2.4.6 Critérios de Amostragem e Processamento Digital de Sinais (PDS)

A aquisição e o processamento digital de sinais elétricos são etapas determinantes na medição da qualidade da energia, especialmente em sistemas baseados em microcontroladores. O êxito na captura de eventos como variações rápidas de tensão, distorções harmônicas ou oscilações frequentes depende diretamente da escolha adequada da taxa de amostragem, da resolução do conversor analógico-digital (A/D) e da eficiência dos algoritmos de processamento implementados no firmware do sistema embarcado (Oppenheim e Willsky, 2015).

Ainda segundo Oppenheim e Willsky (2015) a negligência desses aspectos pode levar à subestimação de distúrbios, à geração de dados inconsistentes e, em última instância, à falha do sistema de monitoramento em diagnosticar adequadamente a condição real da rede elétrica.

Conforme o teorema de *Nyquist-Shannon*, a taxa de amostragem deve ser, no mínimo, o dobro da maior frequência presente no sinal que se deseja reconstruir sem perdas. No contexto da análise da qualidade da energia elétrica, isso implica que, para capturar com precisão os harmônicos até a 50ª ordem de uma onda fundamental de 60 Hz, ou seja, até 3.000 Hz, a frequência de amostragem deve ser de, no mínimo, 6 kHz. Contudo, na prática, taxas ainda maiores são preferíveis para compensar perdas de precisão, permitir o uso de filtros digitais eficazes e viabilizar a execução de algoritmos de análise espectral, como a FFT (Oppenheim e

Willsky, 2015). Muitos estudos sugerem o uso de frequências de 10 a 15 kHz para medições que buscam uma caracterização fiel do conteúdo harmônico da rede.

Além da taxa de amostragem, outro aspecto decisivo é a resolução do conversor A/D, geralmente expressa em bits. Segundo Sousa (2021) um conversor de 10 bits, por exemplo, divide a faixa de entrada em 1024 níveis discretos, enquanto um de 12 bits oferece 4096 níveis, proporcionando maior precisão na digitalização de pequenas variações. Essa característica é especialmente importante em medições de tensão alternada, onde o sinal pode flutuar em torno de valores de referência sensíveis e qualquer erro de quantização pode distorcer a análise do valor eficaz (V_{rms}) ou comprometer a detecção de transgressões normativas como VTCD (Variação de Tensão de Curta Duração), DRP (Duração Relativa de Transgressão da Tensão Precária) e DRC (Tensão Crítica).

No que se refere ao processamento digital, a implementação de algoritmos para o cálculo de indicadores estatísticos e espectrais é uma exigência prática em qualquer sistema de medição moderno. O cálculo do valor eficaz, por exemplo, baseia-se na raiz quadrada da média dos quadrados das amostras em um determinado intervalo de tempo (Arcadepani, 2021). Já a análise harmônica requer a decomposição da forma de onda em seus componentes senoidais por meio de algoritmos como a FFT, cuja complexidade computacional exige capacidade de processamento adequada e gestão eficiente de memória (Arcadepani, 2021). Em microcontroladores como o ESP32, tais tarefas podem ser executadas em tempo real, com uso de bibliotecas otimizadas que exploram instruções de ponto flutuante e *buffers* circulares.

De acordo com Snyder *et al.* (2021) outro recurso frequentemente utilizado é a aplicação de filtros digitais, como filtros média móvel, passa-baixa ou rejeita-faixa, para atenuar ruídos de alta frequência ou interferências espúrias. A eficácia desses filtros depende da frequência de corte escolhida, da resposta em frequência desejada e da capacidade do sistema em processar os dados sem comprometer a velocidade de resposta. Além disso, a segmentação dos dados em janelas de análise (por exemplo, ciclos completos de 60 Hz) é fundamental para garantir coerência temporal entre as amostras, facilitando a detecção de anomalias dentro de um mesmo período da forma de onda.

Em síntese, o sucesso de um sistema embarcado de medição da qualidade da energia está intrinsecamente ligado à fundamentação teórica e prática dos critérios de amostragem e processamento digital. O correto dimensionamento desses parâmetros, aliado a uma implementação otimizada em microcontroladores de arquitetura avançada, assegura não apenas a fidelidade na aquisição dos sinais, mas também a capacidade de análise em conformidade com as exigências normativas. Dessa forma, a integração entre hardware, eletrônica de

condicionamento e algoritmos de firmware constitui a espinha dorsal de soluções modernas, compactas e eficientes para diagnóstico da qualidade da energia elétrica.

2.4.7 Classificação dos analisadores

Conforme estabelecido no Módulo 8 do PRODIST, a avaliação da qualidade da energia elétrica deve ser realizada por meio de equipamentos que estejam em conformidade com os critérios definidos pela norma internacional IEC 61000-4-30. Essa norma serve como referência técnica para os métodos de medição e define dois níveis principais de desempenho para os analisadores: Classe A e Classe S, diferenciando-os pela precisão exigida e pela finalidade de uso.

Os analisadores da Classe A são voltados para aplicações de alta criticidade, como auditorias regulatórias, exigências contratuais e fiscalizações técnicas, exigindo elevado grau de precisão e confiabilidade. Esses instrumentos devem ser capazes de medir obrigatoriamente os desequilíbrios de tensão de sequência negativa e de sequência zero, além de calcular o valor eficaz da tensão a cada meio ciclo, considerando as distorções harmônicas. A norma estabelece, para esses equipamentos, incerteza máxima de $\pm 5,0\%$ na medição das distorções harmônicas e de $\pm 0,15\%$ da tensão de referência para os indicadores FD2% e FD0%, associados ao fenômeno de flicker (variações rápidas e repetitivas na amplitude da tensão). A detecção de eventos de variação de tensão, como as VTCDs, deve ter precisão de $\pm 0,2\%$ e resolução temporal de até um ciclo, sendo exigida a agregação dos índices de cintilação (Pst e Plt) com incerteza não superior a $\pm 5,0\%$.

Já os analisadores da Classe S são indicados para aplicações menos críticas, como estudos estatísticos, campanhas de medição e análises operacionais sem exigências legais. Nessa classe, os requisitos são menos rigorosos: a medição de desequilíbrio se limita à componente de sequência negativa, sendo a sequência zero opcional; o VTCD pode ser calculado a cada meio ciclo ou ciclo completo; as tolerâncias permitidas para distorções harmônicas e os indicadores FD2% e FD0% são de $\pm 10,0\%$ e $\pm 0,30\%$, respectivamente. A detecção de VTCD deve apresentar precisão de $\pm 1,0\%$ da tensão, com resolução de um ciclo, mantendo-se a exigência de agregação dos índices Pst e Plt com incerteza igual ou inferior a $\pm 5,0\%$.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem por objetivo apresentar os critérios adotados para a seleção dos componentes eletrônicos e descrever a estrutura funcional do dispositivo proposto para análise da Qualidade da Energia Elétrica (QEE), objeto central deste trabalho. A proposta se baseia no desenvolvimento de um medidor portátil, de baixo custo e fácil instalação, capaz de realizar a amostragem da tensão da rede elétrica em intervalos regulares, com vistas à avaliação dos principais indicadores de qualidade do fornecimento, em conformidade com os critérios estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST da ANEEL.

Conforme definido pela ANEEL, a distribuidora é responsável por manter os níveis de qualidade da energia elétrica até o ponto de entrega, localizado no pontalete de conexão do padrão da unidade consumidora. Nesse contexto, o equipamento proposto se destina a fornecer ao consumidor final um instrumento de monitoramento local, que permita verificar com autonomia a conformidade da tensão fornecida.

3.1 Microcontrolador

O microcontrolador constitui o núcleo do dispositivo de medição, sendo responsável por adquirir, processar e analisar o sinal de tensão da rede elétrica. Sua função principal é converter o sinal analógico em digital, por meio do conversor A/D interno, e executar os algoritmos de cálculo dos principais indicadores de QEE, como a Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD), a Duração Relativa de Transgressão da Tensão Precária (DRP), a Duração Relativa de Transgressão de Tensão Crítica (DRC) e a Tensão Eficaz (V_{rms}). Visando um equilíbrio entre desempenho, custo e recursos integrados, optou-se pelo uso do ESP32, em substituição ao tradicional ATmega328P utilizado no Arduino Uno. Por meio do Quadro 1, são apresentados os critérios comparativos que a superioridade computacional de um microcontrolador em detrimento do outro.

Para Kumar, A. Prakash, V., & Pandey, M. (2022), o ATmega328, popularizado pela plataforma Arduino Uno, consolidou-se como uma solução robusta, simples e acessível para aplicações que exigem controle direto de hardware e temporização, sendo amplamente utilizado em ambientes educacionais, projetos de robótica e automação básica. Sua arquitetura de 8 bits e o amplo suporte da comunidade Arduino tornam-no ideal para projetos com baixo consumo de energia e complexidade reduzida, embora não ofereça recursos de conectividade integrados.

Por outro lado, o ESP32, desenvolvido pela Espressif Systems, destaca-se por integrar nativamente Wi-Fi e Bluetooth Low Energy (BLE), além de contar com maior poder de processamento e memória. Essa combinação o torna especialmente adequado para aplicações em Internet das Coisas (IoT), onde a conectividade e o processamento local são fundamentais. Estudos recentes apontam o ESP32 como a principal escolha para projetos que demandam comunicação em tempo real e suporte a tecnologias como Edge Computing e inteligência artificial embarcada. Assim, a escolha entre os dois microcontroladores depende essencialmente dos requisitos técnicos do projeto, equilibrando simplicidade, conectividade e desempenho.

Quadro 1 – Comparativo entre ESP32 e ATmega328P

Critério	ESP32	ATmega328P
Núcleo	Tensilica Xtensa LX6 (dual-core)	AVR de 8 bits
Arquitetura	32 bits	8 bits
Instruções por ciclo	1 (com pipeline, pode ser mais eficiente)	Média mais alta (menos eficiente)
Frequência	160–240 MHz	16 MHz

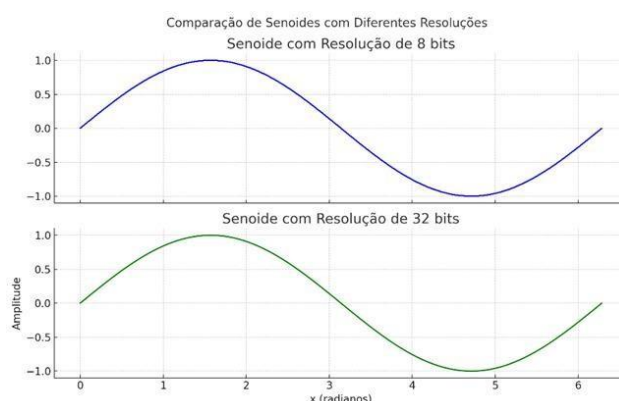
Fonte: Próprio Autor (2025).

Apesar da semelhança de preço entre ambos, o ESP32 apresenta arquitetura de 32 bits, dois núcleos de processamento Tensilica Xtensa LX6, frequência de operação de até 240 MHz e conectividade *Wi-Fi*, características que o tornam mais adequado para aplicações que demandam aquisição e processamento de sinais em tempo real. O ESP32 também supera o ATmega328P em capacidade de memória: conta com aproximadamente 520 KB de RAM e até 4 MB de memória *Flash* externa, enquanto o ATmega328P possui apenas 2 KB de RAM e 32 KB de *Flash*. Essa diferença impacta diretamente na capacidade de armazenamento de dados, de execução de algoritmos mais complexos e na implementação de buffers para aquisição

contínua.

Apesar do maior consumo de corrente em modo idle ($\sim 10 \mu\text{A}$ contra $\sim 0,1 \mu\text{A}$ do ATmega328P), essa característica não compromete o desempenho do sistema, uma vez que o projeto exige operação contínua e processamento constante. Assim, a escolha do ESP32 é justificada por sua superioridade computacional e sua compatibilidade com os requisitos técnicos do projeto.

A utilização do microcontrolador Atmega 328P para a análise da qualidade da energia elétrica, em conformidade com os requisitos dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), é inviável devido a limitações intrínsecas de hardware e software. Primeiramente, o Atmega 328P dispõe de um Conversor Analógico-Digital (ADC) de apenas 8 bits, enquanto as diretrizes do PRODIST e as normas internacionais, como a IEC 61000-4-30, exigem uma resolução mínima de 12 bits para garantir a precisão necessária nas medições.



Em segundo lugar, a capacidade de processamento do Atmega 328P e sua taxa de amostragem são insuficientes para capturar e analisar fenômenos de alta frequência, como harmônicos (até 9 kHz), que demandam taxas de amostragem superiores a 18 kHz para uma representação fiel dos sinais, além da execução de algoritmos complexos como a Transformada Rápida de Fourier (FFT), que são essenciais para a análise detalhada da distorção harmônica. Por fim, a acurácia requerida pelo PRODIST, com uma margem de erro de 1%, dificilmente seria alcançada com a plataforma do Atmega 328P, que não foi concebida para aplicações de instrumentação de alta precisão e conformidade regulatória exigidas para equipamentos de medição de qualidade de energia.

Demonstração da Senoide com resolução de 8 e 32 bits



3.2 Memória

Por meio do Quadro 2 é possível observar os dados comparativos entre os microcontroladores ESP32 e ATmega328P em quesitos de memória, evidenciando a superioridade do primeiro em termos de memória e desempenho geral.

Quadro 2 – Comparativo de memórias entre ESP32 e ATmega328P

Memória	ESP32	ATmega328P
RAM	~520 KB (SRAM)	2 KB SRAM
Flash	4 MB (externa)	32 KB Flash

Fonte: Próprio Autor (2025).

Para uma compreensão mais aprofundada desse aspecto, é importante esclarecer, ainda que de forma concisa, o papel das memórias RAM e *Flash* e seu impacto direto na aplicação proposta.

A memória RAM (*Random Access Memory*), ou memória de acesso aleatório, é um tipo de memória volátil utilizada para armazenar temporariamente dados e instruções durante a execução de tarefas. Em aplicações embarcadas que exigem processamento contínuo de sinais e execução simultânea de múltiplas operações, como é o caso deste projeto, a maior capacidade de RAM representa um diferencial importante, pois garante maior eficiência e desempenho nas rotinas de aquisição e análise de dados em tempo real.

A memória *Flash*, por sua vez, é uma memória não volátil, responsável por armazenar

permanentemente o código do programa e os dados necessários ao funcionamento do sistema, mesmo na ausência de alimentação elétrica. Uma capacidade elevada de memória Flash permite a inclusão de bibliotecas complexas, algoritmos de processamento robustos e estruturas de armazenamento intermediário (*buffers*), ampliando consideravelmente as possibilidades de desenvolvimento e expansão do sistema.

Considerando que o ESP32 dispõe de aproximadamente 520 KB de RAM e 4 MB de *Flash*, contra apenas 2 KB de RAM e 32 KB de *Flash* no ATmega328P, torna-se evidente a vantagem do ESP32 em termos de capacidade computacional, flexibilidade e adequação às exigências deste projeto.

No que se refere ao consumo de energia em modo idle (repouso), o ESP32 apresenta uma corrente de aproximadamente 10 μA em modo de baixo consumo, enquanto o ATmega328P consome cerca de 0,1 μA quando em estado de *sleep*. Embora esse parâmetro seja relevante em aplicações com alimentação por bateria, onde a autonomia é crítica, ele não representa um fator decisivo neste trabalho, que demanda processamento contínuo e operação constante. Assim, a maior corrente de repouso do ESP32 não compromete sua aplicabilidade.

Portanto, apesar da vantagem do ATmega328P no quesito consumo em modo idle, sua limitação de desempenho inviabiliza sua adoção frente aos requisitos do sistema. A escolha do ESP32 é, assim, plenamente justificada, uma vez que sua arquitetura moderna, maior capacidade de memória e recursos integrados são compatíveis com as necessidades técnicas do dispositivo proposto.

O ramo amostral do circuito é o ponto em que a tensão da rede é captada e condicionada para leitura pelo microcontrolador. A medição deve refletir com fidelidade a tensão presente no ponto de conexão da distribuidora, exigindo, portanto, um circuito de condicionamento que preserve a integridade do sinal, evitando ruídos e distorções.

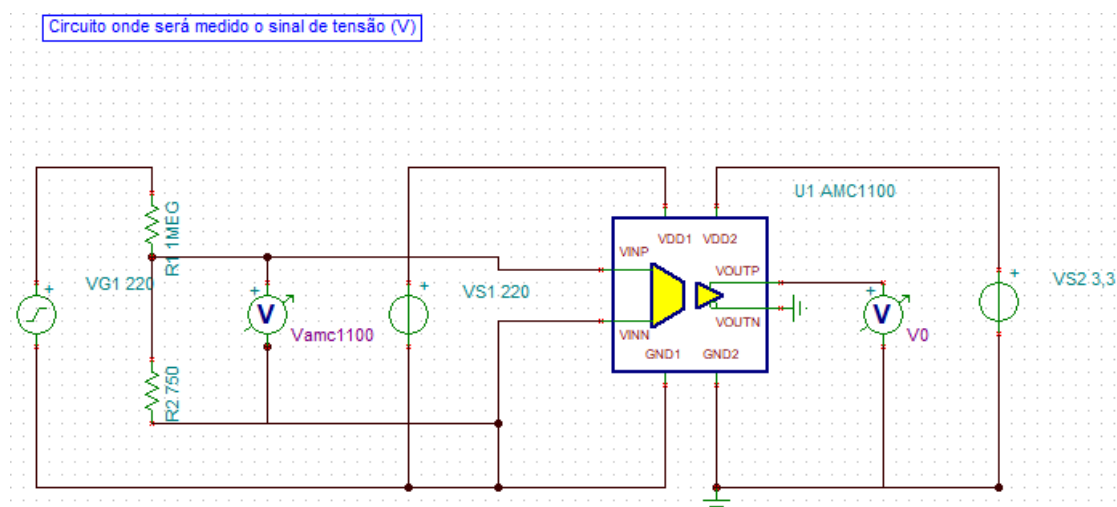
3.3 Obtenção dos valores de tensão

Neste ponto descreve-se o ramo do circuito é o ponto em que a tensão da rede é captada e condicionada para leitura pelo microcontrolador. A medição deve refletir com fidelidade a tensão presente no ponto de conexão da distribuidora, exigindo, portanto, um circuito de condicionamento que preserve a integridade do sinal, evitando ruídos e distorções.

Foi adotado como base o circuito desenvolvido por Pereira Júnior (2018), que utiliza o amplificador isolador AMC1100 para realizar a separação galvânica entre o circuito de entrada e o sistema de medição. Além de garantir a segurança do sistema, o AMC1100 ajusta o sinal de tensão para a faixa adequada ao conversor A/D, eliminando a componente negativa e

melhorando a imunidade a interferências eletromagnéticas. A Figura 2 ilustra a topologia adotada.

Figura 4 - Circuito de condicionamento com AMC1100



Fonte: Próprio Autor (2025).

3.4 Proteção do Circuito

A proteção contra surtos de tensão e sobretensões foi implementada com o uso de diodos Zener. Esse tipo de componente semicondutor é projetado para conduzir corrente quando submetido a uma tensão reversa superior ao seu valor de ruptura, atuando como limitador de tensão e protegendo os componentes mais sensíveis contra picos de energia. Além disso, o uso de diodos Zener contribui para estabilização da tensão nos terminais do circuito, melhorando a confiabilidade das medições.

3.5 Implementação e Fonte de Alimentação Alternativa

A implementação do dispositivo proposto contempla a utilização de uma fonte de alimentação alternativa, cuja função é assegurar a continuidade do funcionamento do sistema mesmo em condições de instabilidade ou interrupção da tensão da rede elétrica. Dado que o equipamento foi concebido para operar em ambientes sujeitos a oscilações, variações súbitas ou quedas prolongadas de tensão, torna-se imprescindível a presença de uma fonte reserva que permita a persistência das medições e a detecção de anomalias sem perda de dados.

A lógica de comutação entre as fontes é baseada no uso de um componente eletrônico

do tipo PTC (*Positive Temperature Coefficient*), cuja resistência elétrica aumenta conforme a elevação da temperatura. O PTC é empregado como elemento de proteção contra sobrecorrente, devido à sua capacidade de atuar como limitador automático de corrente em caso de condições anormais de operação.

No contexto deste projeto, o PTC é responsável por detectar elevações de corrente causadas por surtos ou flutuações bruscas de tensão. Quando essas condições são identificadas, o componente atua elevando sua resistência, o que, na prática, interrompe a passagem de corrente pela fonte principal e redireciona automaticamente a alimentação para a fonte reserva. Essa mudança ocorre sem a necessidade de intervenção externa, promovendo a proteção dos circuitos sensíveis e garantindo a continuidade da operação do sistema.

Após a estabilização da tensão da rede, o PTC retorna gradualmente ao seu estado original de baixa resistência, restabelecendo o fornecimento a partir da fonte principal. Esse comportamento térmico reversível permite ao sistema recuperar-se automaticamente, preservando a integridade do dispositivo e mantendo sua operação dentro dos parâmetros normais. Dessa forma, a solução proposta integra proteção e resiliência à arquitetura do medidor, assegurando confiabilidade mesmo em condições adversas de fornecimento elétrico.

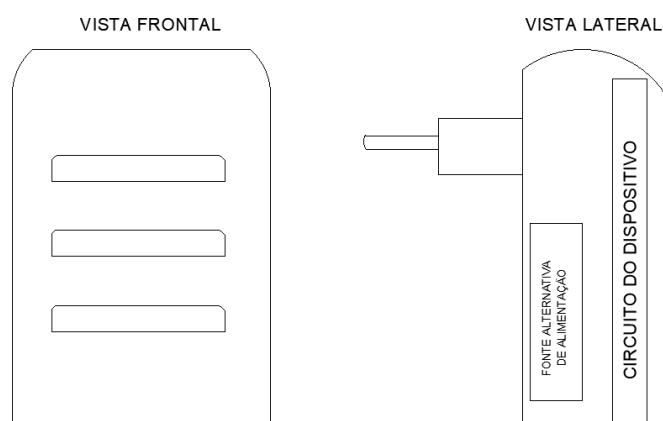
4 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo serão discutidos os resultados esperados, é demonstrado a integração das ideias que culminam no projeto do protótipo avaliando o designer, as etapas de execução da análise de QEE, abordagem quanto ao processamento do sinal e armazenamento dos dados inferindo de forma teórica o que é esperado desta aplicação, durante sua aplicação prática.

4.1 Interface e Designer

A concepção do dispositivo apresentado na Figura 3 foi orientada pela necessidade de proporcionar uma interface intuitiva para o usuário final, ao mesmo tempo em que assegura a robustez eletrônica necessária para o funcionamento confiável do sistema.

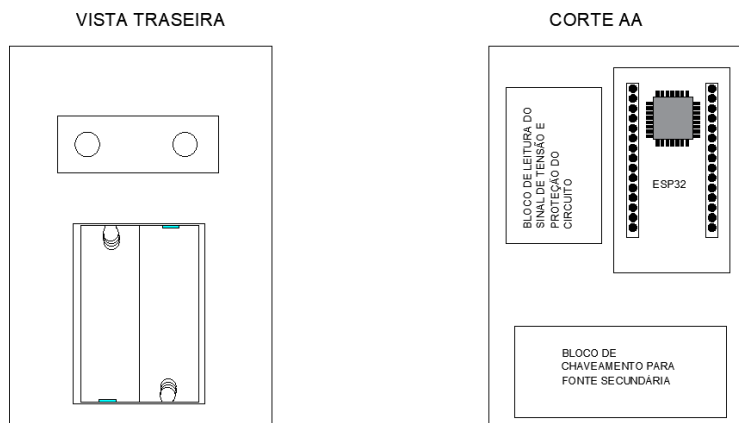
Figura 5 – Vistas frontal e lateral do dispositivo desenvolvido



Fonte: Próprio Autor (2025).

O modelo busca também manter o custo do produto dentro de um padrão acessível, sem comprometer sua qualidade. Já a Figura 4 ilustra a disposição dos blocos do circuito, apresentando as funções de cada componente e fornecendo uma descrição simplificada do funcionamento do projeto.

Figura 6 – Disposição dos blocos do circuito



Fonte: Próprio Autor (2025).

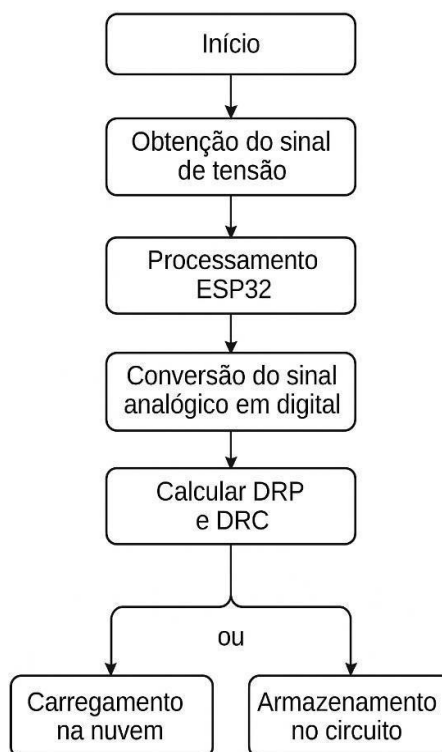
4.2 Aquisição, Processamento e Transmissão dos Dados

Após a energização do circuito, o sistema inicia automaticamente o processo de aquisição do sinal de tensão da rede elétrica. Esse sinal analógico é então condicionado e enviado ao microcontrolador ESP32, responsável por realizar a conversão analógico-digital (A/D), transformando o sinal contínuo em uma sequência de dados discretos.

Com os dados digitalizados, o microcontrolador, previamente programado, executa os algoritmos matemáticos necessários para o cálculo dos indicadores de Desvio de Referência Positivo (DRP) e Desvio de Referência Central (DRC). Após o processamento, as informações geradas podem ser armazenadas localmente no dispositivo ou transmitidas para a nuvem, conforme a configuração estabelecida no sistema.

A Figura 5 apresenta o diagrama em blocos que resume esse fluxo de aquisição, processamento e envio dos dados.

Figura 7 – Diagrama em blocos do processo de aquisição e tratamento dos sinais



Fonte: Próprio Autor (2025).

Portanto, este projeto propõe o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de tensão elétrica utilizando o microcontrolador ESP32, o sistema realiza leituras de tensão a cada 16 milissegundos, correspondendo a quatro ciclos da senoide em uma rede elétrica de 60 Hz. Essas leituras são processadas para calcular dois indicadores cruciais:

DRTC (Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica): Percentual de tempo em que a tensão está abaixo do limite crítico estabelecido. **DRP (Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária):** Percentual de tempo em que a tensão está abaixo do limite precário, mas acima do limite crítico, estabelecido que os limites aceitáveis para esses indicadores, conforme estabelecido pela ANEEL, são de 0,5% para DRTC e 3% para DRP.

Então espera-se que, em condições normais de operação, os valores de DRTC e DRP permaneçam dentro dos limites aceitáveis estabelecidos pelas normas. Em áreas com histórico de instabilidades na rede elétrica, é possível que esses indicadores apresentem valores mais elevados, sinalizando a necessidade de intervenções corretivas.

O sistema envia, em tempo real, os dados de tensão, DRTC e DRP para a plataforma Blynk, permitindo o monitoramento remoto e contínuo dos parâmetros de qualidade de energia. Essa funcionalidade facilita a identificação de padrões de transgressões e a implementação de

ações preventivas.

Logo a proposta deste projeto é proporcionar uma ferramenta eficaz para o monitoramento da qualidade da energia elétrica, alinhada às exigências regulatórias. A capacidade de detectar e quantificar transgressões de tensão em tempo real contribui significativamente para a melhoria da confiabilidade e eficiência do sistema elétrico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A concepção inicial de um analisador de qualidade de energia monofásico para uso residencial, conforme delineada neste trabalho, representa um passo significativo na direção da democratização do acesso à informação sobre a qualidade da energia elétrica consumida nas residências brasileiras. Ao propor um protótipo capaz de realizar a leitura da tensão e indicar parâmetros associados aos indicadores do módulo 8 do PRODIST — documento normativo da ANEEL que regulamenta os padrões de qualidade da energia — busca-se não apenas uma solução técnica, mas também educativa, capaz de ampliar a consciência do consumidor sobre a eficiência e estabilidade do fornecimento de energia elétrica.

Durante o desenvolvimento deste estudo, foram abordados aspectos fundamentais da qualidade da energia, como variações de tensão, afundamentos, elevações, interrupções momentâneas e permanentes, distorções harmônicas e outros fenômenos que afetam diretamente o desempenho de aparelhos eletroeletrônicos e, conseqüentemente, o conforto e a segurança dos usuários. A proposta do analisador monofásico considera, portanto, a importância de um dispositivo que possa monitorar, de forma contínua e acessível, esses parâmetros, permitindo a detecção de desvios e a busca por soluções, seja pela intervenção do consumidor junto à concessionária, seja por ajustes internos no sistema elétrico residencial.

A idealização do protótipo teve como base critérios de viabilidade técnica, simplicidade de operação e custo acessível, considerando-se que sua aplicação se destina ao ambiente doméstico. Ainda que este trabalho trate apenas da fase inicial do projeto, com ênfase na formulação da ideia e definição dos requisitos, os resultados teóricos obtidos indicam que é possível desenvolver um sistema funcional, utilizando sensores de tensão, microcontroladores de baixo custo e interfaces simples de visualização, como displays ou aplicativos integrados.

Em síntese, a contribuição deste trabalho está na construção de uma base conceitual sólida para o desenvolvimento de uma ferramenta que possa empoderar o consumidor final, fornecendo dados objetivos e padronizados sobre a qualidade da energia elétrica. A continuidade deste projeto exigirá etapas posteriores de prototipagem, testes experimentais e adequações normativas, mas o avanço aqui alcançado já representa um marco relevante. A proposta está alinhada com os princípios de eficiência energética, cidadania e inovação tecnológica, reforçando o papel do engenheiro e do pesquisador no enfrentamento de desafios práticos que afetam o cotidiano da população.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 - QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA**. [2021]. Disponível em : <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2025.
- ARCADEPANI, M. B. **Análise do Impacto das Distorções Harmônicas de Tensão nas Componentes de Corrente Definidas pela CPT e CPC**. 2021. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2021.
- BAGHEZZA, R.; BOUCHARD, K.; BOUZOUANE, A.; GOUIN-VALLERAND, C. From offline to real-time distributed activity recognition in wireless sensor networks for healthcare: A review. **Sensors**, [S. l.], v. 21, n. 8, p. 2786, 2021.
- BARAKA, J.; AMANQUAH, N. Comparison of Power Consumption Measurement Methods in Embedded Systems. 9. Ed. 2024, Koforidua, Gana. Anais do **International conference on adptive Science and technology – ICAST, 9TH**: IEEE, 2024. p. 1-5.
- BERTUOL, C. C. **Sistema para Testes no Controle dos Reguladores de Tensão**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2021.
- BHATTACHARYYA, S. **Power quality requirements and responsibilities at the point of connection**. 2011. Tese de Doutorado - Universidade Tecnológica de Eindhoven, Eindhoven, Países Baixos, 2011.
- BRASIL: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **ABNT NBR IEC 61000-4-30:2023: Compatibilidade eletromagnética Parte 4-30: Técnicas de medição e ensaio – Métodos de medição de qualidade da energia**. 2023.
- CHUB, A.; VINNIKOV, D.; KORKH, O.; JALAKAS, T.; DEMIDOVA, G. Wide-range operation of high step-up DC-DC converters with multimode rectifiers. **Electronics**, [S. l.], v. 10, n. 8, p. 914.
- ESPRESSIF. **ESP32 Series: Datasheet Version 4.9**. 2025. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf> Acesso em: 12 maio 2025.
- FOTIS, G.; DIKEAKOS, C.; ZAFEIROPOULOS, E.; PAPPAS, S.; VITA, V. Scalability and replicability for smart grid innovation projects and the improvement of renewable energy sources exploitation: The FLEXITRANSTORE case. **Energies**, [S. l.], v. 15, n. 13, p. 4519, 2022.
- FRIGO, G.; BRAUN, J. Supraharmonic dynamic phasors: Estimation of time-varying emissions. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, [S. l.], v. 71, p. 1-11, 2022.
- GAZIS, A.; PAPADONGONAS, I.; ANDRIOPOULOS, A.; ZIOUDAS, C.; VAVOURAS, T. A comprehensive review of sensor technologies, instrumentation, and signal processing solutions for low-power Internet of Things systems with mini-computing devices. **arXiv**. Preprint arXiv:2503.13466, [S. l.], 2025.
- GOMES, K. C. F. **Proposta para Sistema de Automação de Baixo Custo para Monitoramento e Controle de Energia**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Salgueiro, 2024.

- GU, D.; KSHIRSAGAR, P. Compact integrated gate drives and current sensing solution for SiC power modules, 2017, Cincinnati, OH, USA. **Anais da IEEE Energy Conversion Congress and exposition – ECCE**, p. 5139-5143.
- HAKKI, S. ESP8266 and ESP32 series of SoC microcontrollers. **Programmable Smart Microcontroller Cards**, [S. l.], v. 110, 2021.
- HRYTSYK, N. I. **Safety aspects of electrical systems in modern commercial aircraft**. 2023. Dissertação de Mestrado - National Aviation University, Kyev, Ucrânia, 2023.
- IROANUSI, K. A. FPGA Data Acquisition of Electrical Parameter. **European Journal of Engineering and Technology Research**, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 105-123, 2021.
- IYAH, N. S. **Development of an Industrial Atmega328p Microcontroller Based on Open-Source Platform**. 2023. Dissertação de Mestrado - University of Kerbala, Kerbala, Iraque, 2023.
- KUMAR, A., PRAKASH, V., & PANDEY, M. **Microcontrollers for IoT: A Comparative Study of ESP32 and Arduino Platforms**. International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT), 70(7), 1-8. 2022.
- LOPES, T. M. **Análise Metodológica de Indicadores de Conformidade de Tensão**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Palmas, 2022.
- MAJHI, A. A. K.; MOHANTY, S. A Comprehensive Review on Internet of Things Applications in Power Systems. **IEEE Internet of Things Journal**, [S. l.], v. 11, n. 21, p. 34896-34923, 2024.
- MARTINS, M. B.; SOUZA, L. A. A.; ZAMPILIS, R. R.; VIEGAS, M. V. Sistema de referência para medição sincrofásorial. **Metrologia**, [S. l.], 2023.
- MENDES, V. S.; PALUDO, L. G. S. **Investigação das Estratégias de Controle DTC e IFOC para Acionamento de Motores de Indução Trifásicos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2021.
- OLIVEIRA, J. **Um protótipo para medição monofásica em rede de fator de potência baseado no microcontrolador ESP32**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso - UFOP, Ouro Preto, 2022.
- OPPENHEIM, Alan; WILLSKY, Alan; **Sinais e Sistemas**. 2. ed. Massachusetts: Pearson Education, 2015.
- PEREIRA JUNIOR, D. **Circuito de Condicionamento de Tensões e Correntes para Medição Utilizando Sistemas Embarcados**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso - IFRS, Porto Alegre, 2024.
- PETINRIN, J. O.; JOHNSON, D. O.; OGUNSEYE, A. A.; OYELEKAN, S. F. Development of a Multi-Range Microcontroller Based Lock-In Digital Milliohm Meter. **FUOYE Journal of Engineering and Technology**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 341-349, 2022.
- SEPASI, S.; TALICHET, C.; PRAMANIK, A. S. Power quality in microgrids: A critical review of fundamentals, standards, and case studies. **IEEE Access**, [S. l.], v. 11, p. 108493-108531, 2023.
- SHABALOV, M. Y.; ZHUKOVSKIY, Y. L.; BULDYSKO, A. D.; GIL, B.; STARSHAIA, V. V. The influence of technological changes in energy efficiency on the infrastructure deterioration 1 in the energy sector. **Energy Reports**, [S. l.], v. 7, p. 2664-2680, 2021.

SILVA, F. V. **Estudo de Cargas Não Lineares na Qualidade de Energia Elétrica**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2024.

SNYDER, R. V.; MACCHIARELLA, G.; BASTIOLI, S.; TOMASSONI, C. Emerging trends in techniques and technology as applied to filter design. **IEEE Journal of Microwaves**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 317-344, 2021.

SOUSA, R. E. **Plataforma Didática para Implementação e Avaliação Experimental de Controladores Discretos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto Federal do Espírito Santo, Serra, 2021.

Texas Instruments. **Reference design to measure AC voltage and current in protection relay with delta-sigma chip diagnostics**. 2016. Disponível em: < http://e2e.ti.com/cfs-file/_key/communityserver-discussions-components-files/14/tiduby7a.pdf. > Acesso em: 12 maio 2025.

ULVGAARD, L.; KAMF, T.; LEIJON, M. Offshore measurement system for wave power—Using current loop feedback. **Electronics**, [S. l.], v. 5, n. 4, p. 86, 2016.

URRIE, E. H. Introduction to Embedded System. **Mixed-Signal Embedded Systems Design: A Hands-on Guide to the Cypress PSoC**, [S. l.], p. 1-34, 2021.

XIE, S.; MU, Z.; DING, W.; WAN, Z.; SU, S.; ZHANG, C.; ZHANG, Y.; XIA, Y.; LUO, D. Development of Broadband Resistive--Capacitive Parallel--Connection Voltage Divider for Transient Voltage Monitoring. **Energies**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 451, 2022.

ZAPF, M.; BLENK, T.; MÜLLER, A.-C.; PENG, H.; MLADENOVIC, I.; WEINDL, C. Lifetime Assessment of PILC Cables with Regard to Thermal Aging Based on a Medium Voltage Distribution Network Benchmark and Representative Load Scenarios in the Course of the Expansion of Distributed Energy Resources. **Energies**, [S. l.], v. 14, n. 2, p. 494, 2021.

ZHAO, H.; ZHOU, X.; LIU, Y.; ZHU, J. Hardware Design of the PMSM Control System Based on DSP and CPLD. **Journal of Information and Communication Engineering (JICE)** [S. l.], v. 2, n. 2, p. 66-71, 2016.