



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETÁRIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MATHAUSS DE OLIVEIRA CARVALHO

**PROTÓTIPO PARA AUXÍLIO EM ANÁLISE DE FATORES DE
QUALIDADE DE ENERGIA**

**PALMAS-TO
2023**

MATHAUSS DE OLIVEIRA CARVALHO

**PROTÓTIPO PARA AUXÍLIO EM ANÁLISE DE FATORES DE
QUALIDADE DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Bacharelado em Engenharia Elétrica do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas,
como parte dos requisitos para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Orientador: Dr. Marcos Balduino de
Alvarenga.

Co-Orientador: Dr. Maxwell Moura Costa.

**PALMAS-TO
2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

C331p Carvalho, Mathauss de Oliveira
Protótipo para auxílio em análise de fatores de qualidade de
energia / Mathauss de Oliveira Carvalho. – Palmas, TO, 2023.
83 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2023.

Orientador: Dr. Marcos Balduino de Alvarenga
Coorientador: Dr. Maxwell Moura Costa

1. Protótipo. 2. Energia. 3. PRODIST. I. Alvarenga, Marcos
Balduino de. II. Costa, Maxwell Moura. III. Título.

CDD 621

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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

MATHAUSS DE OLIVEIRA CARVALHO

**PROTÓTIPO PARA AUXÍLIO EM ANÁLISE DE FATORES DE
QUALIDADE DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Bacharelado em Engenharia Elétrica do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas,
como exigência à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 30/06/2023



Documento assinado digitalmente
MARCOS BALDUINO DE ALVARENGA
Data: 27/09/2023 23:41:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

BANCA AVALIADORA

Doutor Marcos Balduino de Alvarenga (Orientador)
IFTO - Campus Palmas



Documento assinado digitalmente
MAXWELL MOURA COSTA
Data: 18/09/2023 22:07:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutor Maxwell Moura Costa (Co-Orientador)
IFTO - Campus Palmas



Documento assinado digitalmente
MATEUS LIMA PEDUZZI
Data: 18/09/2023 18:42:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Mestre Mateus Lima Peduzzi
IFTO - Campus Palmas



Documento assinado digitalmente
ELCIO PRECIOSO DE PAIVA
Data: 22/09/2023 15:33:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutor Elcio Precioso de Paiva
IFTO - Campus Palmas

*A Deus, aos meus orientadores, à minha
família e aos meus amigos.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que sempre me ajudou e orientou nessa caminhada. Acredito que, por Sua graça, consegui elaborar este trabalho.

Agradeço à minha família, pois ela sempre me orientou, apoiou, investiu e incentivou durante o desenvolvimento do curso. Sem dúvida, foi uma das principais motivações ao longo desta jornada.

Aos professores Dr. Marcos Balduino e Dr. Maxwell Moura, agradeço por acreditarem na proposta e, é claro, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho, que certamente enriqueceu o conteúdo abordado.

Aos professores Dr. Marcus André Pereira e Dr. Elcio Precioso, agradeço por sempre atenderem as dúvidas com muita atenção, o que contribuiu de forma importante neste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que me apoiaram e torceram por mim nessa jornada.

RESUMO

O tema qualidade de energia é um assunto que já tomou notoriedade há alguns anos, dessa forma, este assunto é observado tanto pelos consumidores quanto pelas concessionárias de energia, pois é primordial que a energia elétrica apresente um nível de qualidade satisfatória, a fim de não atrapalhar o desenvolvimento das atividades dos consumidores, assim como preservar a vida útil dos equipamentos de distribuição da concedente. A agência de regulamentação veio com o propósito de quantificar os limites aceitáveis por meio de portarias e normativas para orientar as empresas de distribuição e caso seja necessário aplicar multa.

Para avaliar algumas características nas instalações é necessário a aquisição de equipamentos que na sua maioria apresentam um alto custo, que acaba limitando a apenas instituições de pesquisas e empresas de grande porte.

Com esse empecilho, o objetivo deste trabalho é confeccionar um protótipo que atenda a necessidade de acompanhamento da energia elétrica, para análises sobre a energia que está sendo entregue e a qualidade das instalações, sendo as mesmas com fornecimento monofásico, esse protótipo irá medir tensão da rede, corrente, frequência e fator de potência, com todos esses dados sendo armazenados em um cartão de memória, com a finalidade de auxiliar na elaboração de relatórios.

Palavras-chave: Protótipo, Energia, Medição, PRODIST.

ABSTRACT

The issue of energy quality is a topic that has already gained notoriety for some years, in this way, this subject is observed both by consumers and by the power supply company, since it is essential that the electrical energy presents a satisfactory level of quality, in order not to impede the development of the client's activities, in addition to preserving the useful life of power distribution equipment.

The regulatory agency came with the objective of quantifying the acceptable limits through ordinances and standards to guide distribution companies and if necessary apply fines to them.

To evaluate some parameters in the installations, it is necessary to use equipment that has a high purchase price, which ends up being restricted to research institutions and large companies.

With this obstacle, the objective of this work is to make a prototype that meets the demand for monitoring electric energy, to analyze the energy that is being delivered and the quality of the installations, being the same with single-phase supply, this project will measure the voltage, current, frequency and power factor, with all these data being stored on a memory card, with the purpose of assisting in the preparation of the report.

Keywords: Prototype, Energy, Measurement, PRODIST.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Anomalias presentes na rede de fornecimento de energia.....	19
Figura 2 - Faixas de tensão medidas em relação à de referência.....	24
Figura 3 - Aparelhos comerciais para análise e monitoramento da qualidade de energia elétrica, sendo da esquerda para direita, respectivamente: 1734-Energy Logger produzido pela Fluke, ET-6052 produzido pela Minipa e BlackBox G4500 produzido pela Elspec.....	29
Figura 4 - Placa ESP32 AI-S3 para elaboração do protótipo.....	30
Figura 5 - Configuração dos pinos do AMC1301.....	32
Figura 6 - Diagrama de blocos do AMC1301.....	34
Figura 7 - Sensor de corrente HSTS016L.....	34
Figura 8 - ADC externo MCP3204.....	35
Figura 9 - Circuito de condicionamento do sinal da tensão.....	37
Figura 10 - Circuito de condicionamento do sinal de corrente.....	37
Figura 11 - Circuito de conversão de onda.....	38
Figura 12 - Circuito de ajuste de offset.....	39
Figura 13 - Circuito de condicionamento de fator de potência e frequência.....	39
Figura 14 - Vista superior (esquerda) e vista inferior (direita) do design da placa de circuito impresso projetada no software Eagle PCB.....	42
Figura 15 - Protótipo após a soldagem de todos os componentes, vista superior (esquerda) e vista inferior (direita).....	43
Figura 16 - Módulo de aquisição de dados LabVolt Series 9063-00.....	44
Figura 17 - Bancada modular LabVolt Series 8010 B0.....	45
Figura 18 - Circuito de condicionamento de sinais.....	49
Figura 19 - Resultado das simulações de tensão e corrente.....	50
Figura 20 - Resultado da simulação de conversão de onda.....	50
Figura 21 - Condutor com 6 espiras na entrada do sensor de corrente.....	53
Figura 22 - Gráfico de registro da tensão e corrente em carga resistiva.....	56
Figura 23 - Gráfico de registro da tensão e corrente em carga resistiva e indutiva.....	57
Figura 24 - Gráfico de registro da tensão e corrente em carga resistiva e capacitiva.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias de distúrbios que prejudicam a qualidade da energia elétrica.....	20
Tabela 2 - Pontos de conexão em tensão nominal inferior a 2,3 kV (380/220).....	24
Tabela 3 - Descrição dos indicadores de distorções harmônicas.....	25
Tabela 4 - Limites das distorções harmônicas totais (%).....	27
Tabela 5 - Comparação entre as placas Arduino UNO e ESP32-S3.....	31
Tabela 6 - Parâmetros de operação do AMC1301.....	33
Tabela 7 - Parâmetros de operação do HSTS016L.....	35
Tabela 8 - Parâmetros de operação do MCP3204.....	36
Tabela 9 - Resultados da simulação do circuito de medição da defasagem dos sinais.....	51
Tabela 10 - Resultados da tensão eficaz entre a bancada e o protótipo.....	52
Tabela 11 - Resultados da corrente eficaz entre a bancada e o protótipo.....	53
Tabela 12 - Resultados da frequência medida pela bancada e o protótipo.....	54
Tabela 13 - Comparativo entre a bancada e o protótipo em cargas resistivas.....	55
Tabela 14 - Comparativo entre o valor teórico e o valor medido pela bancada e pelo protótipo.....	57
Tabela 15 - Comparativo entre o valor teórico e o valor medido pela bancada e pelo protótipo.....	58
Tabela 16 - Orçamento do protótipo.....	60
Tabela 17 - Custo de aquisição dos analisadores de energia.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Alternating Current (Corrente Alternada).
ADC	Analog-to-digital converter (Conversor Analógico-Digital).
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
API	Application Programming Interface (Interface de Programação de Aplicação).
AVR	Advanced Virtual RISC (RISC Virtual Avançado).
CI	Circuito Integrado.
DC	Direct Current (Corrente Contínua).
EM	European Standard (Padrão Europeu).
FP	Fator de Potência.
GCC	GNU Compiler Collection (Coleção de Compiladores GNU).
GNU	GNU's Not Unix! (GNU Não é Unix).
IEC	International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional).
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos).
IDE	Integrated Development Environment (Ambiente de Desenvolvimento Integrado).
LSB	Less Significant Bit (Bit Menos Significativo).
NTP	Network Time Protocol (Protocolo de Tempo de Rede).
PCB	Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impresso).
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.
PSRAM	Pseudo-Static Random Access Memory (Memória de Acesso Aleatório Pseudo-Estático).
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso).
RISC	Reduced Instruction Set Computer (Computador com um Conjunto Reduzido de Instruções).
RMS	Root Mean Square (Raiz Média Quadrada).
ROM	Read Only Memory (Memória Somente para Leitura).
RTC	Real Time Clock (Relógio de Tempo Real).

SAR	Successive Approximation Register (Registrador de Aproximações Sucessivas).
SRAM	Static Random Access Memory (Memória Estática de Acesso Aleatório).
SPI	Serial Peripheral Interface (Interface Periférica Serial).
VTCD	Variações de Tensão de Curta Duração.
Wi-Fi	Wireless Fidelity (Fidelidade sem fio).
XOR	Exclusive OR (OU exclusivo).

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Cálculo do fator de potência.....	24
Equação 2 - Cálculo de $DIT_h\%$	25
Equação 3 - Cálculo de $DTT\%$	26
Equação 4 - Cálculo de $DTT_p\%$	26
Equação 5 - Cálculo de $DTT_i\%$	26
Equação 6 - Cálculo de $DTT_3\%$	26
Equação 7 - Fórmula de conversão do valor do ADC para Volts.....	45
Equação 8 - Fórmula de conversão do valor do ADC para Amperes.....	46
Equação 9 - Fórmula de conversão do período em microssegundos para Hertz.....	46
Equação 10 - Cálculo do ângulo entre tensão e corrente.....	47
Equação 11 - Fórmula de valor eficaz da tensão.....	47
Equação 12 - Fórmula de valor eficaz da corrente.....	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Considerações Gerais	15
1.2	Justificativa	16
1.3	Objetivos	16
1.3.1	Objetivo geral	16
1.3.2	Objetivos específicos	16
1.4	Estrutura do trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Conceito de Qualidade de Energia Elétrica	18
2.2	A necessidade de fornecer um serviço com qualidade	18
2.3	Anomalias e Fenômenos Presentes no Fornecimento de Energia Elétrica	19
2.4	Normas e Regulamentos para Classificar a Condição da Energia	22
2.4.1	Módulo 8 do PRODIST	23
2.4.1.1	<i>Variações de tensão em regime permanente</i>	23
2.4.1.2	<i>Fator de potência</i>	24
2.4.1.3	<i>Harmônicos</i>	25
2.4.1.4	<i>Desequilíbrio da tensão</i>	27
2.4.1.5	<i>Flutuação de tensão</i>	27
2.4.1.6	<i>Variação de frequência</i>	27
2.4.1.7	<i>Variação de tensão de curta duração</i>	28
2.4.1.8	<i>Indicadores de continuidade</i>	28
2.5	Equipamentos para monitoramento e análise da qualidade de energia	28
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	30
3.1	Desenvolvimento do protótipo	30
3.1.1	Escolha do microcontrolador	30
3.1.2	Escolha do sensor de Tensão	32
3.1.2.1	<i>Acoplamento capacitivo</i>	33
3.1.3	Escolha do sensor de corrente	34
3.1.4	Escolha do ADC Externo	35
3.1.5	Circuitos de condicionamento de sinais	36
3.1.5.1	<i>Circuito de adequação do sinal de tensão</i>	36

3.1.5.2	<i>Circuito de adequação do sinal de corrente</i>	37
3.1.5.3	<i>Circuito de medição do fator de potência e frequência do sinal</i>	38
3.2	Desenvolvimento do algoritmo de programação	40
3.2.1	Método de amostragem	40
3.2.2	Código de programação do microcontrolador	41
3.3	Desenvolvimento da placa de circuito impresso	42
3.4	Procedimentos de validação do protótipo	43
3.4.1	Procedimentos de comparação dos valores de tensão, corrente e frequência	45
3.4.2	Procedimentos de comparação dos valores de defasagem dos sinais	46
3.4.3	Cálculo de valor eficaz dos sinais de corrente e tensão	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1	Resultado das simulações dos circuitos	49
4.1.1	Resultado do condicionamento de tensão e corrente	49
4.1.2	Resultado dos sinais de frequência da rede	50
4.1.3	Resultado do circuito de fator de potência	51
4.2	Resultado dos valores medidos pelo protótipo	51
4.2.1	Resultado dos valores da tensão da rede	51
4.2.2	Resultado dos valores da corrente do circuito	52
4.2.3	Resultado dos valores da frequência da rede	54
4.2.4	Resultado dos valores da defasagem entre tensão e corrente	54
4.2.4.1	<i>Cargas resistivas</i>	55
4.2.4.2	<i>Cargas resistivas e indutivas</i>	56
4.2.4.3	<i>Cargas resistivas e capacitivas</i>	58
4.3	Custo de fabricação do protótipo	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
5.1	Medições e Verificação do funcionamento do protótipo	63
5.2	Propostas e sugestões para trabalhos futuros	63
5.2.1	Técnicas e meios de medição	63
5.2.2	Sugestões de melhoria no protótipo	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
	APÊNDICE	69
	Apêndice A - Código desenvolvido para o protótipo	69

Apêndice B - Arquivo esquemático da placa desenvolvido para o protótipo	78
Apêndice C - Resultado das amostras armazenadas nos arquivos .txt.	80
Apêndice D - Manual de uso do protótipo.	82

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

A energia elétrica deve ser fornecida apresentando uma forma de onda senoidal com frequência e amplitude de tensão constantes. No entanto, com o aumento do número de cargas e equipamentos conectados, tem dificultado o atendimento pleno destas características por parte das concessionárias. Em resposta a isto foram definidos limites a serem entregues, estabelecidos por meio de normas e resoluções.

Qualidade de energia é um tema com grande importância devido aos avanços nos estudos que caracterizam os parâmetros presentes nas instalações e cargas. Diferentes consumidores reconhecem essa relevância, sejam eles residenciais, comerciais e industriais. No entanto, no passado, havia menos preocupação em relação aos equipamentos devido às características robustas dos equipamentos, que em sua maioria eram capazes de lidar com algumas anomalias. Além disso, esses equipamentos não influenciavam negativamente a qualidade de energia nas instalações. Entretanto, com o avanço da eletrônica nos últimos anos, o uso de componentes mais sensíveis, como microcontroladores e circuitos integrados, bem como circuitos com chaveamento, têm colaborado negativamente na qualidade da energia, necessitando de maior cautela das concessionárias para garantir um bom fornecimento.

Para verificar características presentes na instalação, é necessário adquirir equipamentos que, em sua maioria, têm custos elevados, limitando-se a instituições de pesquisas ou empresas de grande porte. Diante dessa situação, surgiu a necessidade de um equipamento que auxilie os consumidores de menor porte na gestão de energia, apresentando pontos a serem melhorados. Para atender essa demanda, este trabalho propõe a produção de um protótipo que visa medir a tensão, corrente, frequência e fator de potência, em quadros de energia monofásica ou em equipamentos da instalação. É importante ressaltar que este trabalho é uma evolução do trabalho de conclusão de curso de bacharelado em Engenharia Elétrica dos alunos Pedro Amaral e Erika Rebeca, defendido no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - Campus Palmas, no ano de 2021.

1.2 Justificativa

O desenvolvimento de um equipamento que visa auxiliar estudantes, profissionais do setor de manutenção, eletricitas e consumidores que necessitam realizar medições em alguns parâmetros da energia elétrica fornecida pela concessionária. O intuito é facilitar a elaboração de relatórios que envolvam esses parâmetros e possibilitar o monitoramento de possíveis anomalias geradas pelos equipamentos presentes nas instalações.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

De forma geral, a proposta deste trabalho consiste em apresentar e desenvolver um protótipo que possa medir os principais parâmetros relacionados à qualidade de energia. Além disso, pretende-se disponibilizar o protótipo para todo o corpo discente da instituição, para mensurar aspectos presentes nas instalações ou cargas monofásicas.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho estão listados a seguir:

- Conhecer e interpretar as normas que regulam a qualidade da energia elétrica fornecida;
- Compreender os distúrbios presentes na instalação e como surgem;
- Compreender os parâmetros relacionados à qualidade da energia elétrica;
- Desenvolver um equipamento que meça alguns parâmetros das instalações elétricas monofásicas em regime permanente.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a introdução, que abrange considerações gerais, justificativa e objetivos, incluindo objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo retrata a fundamentação teórica, que consiste no estudo da literatura existente sobre o tema, apresentando os distúrbios elétricos, bem como

as normas de regulamentação e os equipamentos de medição utilizados para análise da qualidade de energia. Logo após, no terceiro capítulo, são mostrados os procedimentos metodológicos, que abrangem todos os aspectos e medidas adotadas para o desenvolvimento do protótipo, incluindo os componentes eletrônicos, circuitos, simulação e o software do microcontrolador. No quarto capítulo são apresentados os resultados e discussões, mostrando os resultados das simulações e do protótipo. Já no quinto capítulo, estão apresentadas as considerações finais, abordando as conclusões do trabalho e sugestões para complemento em trabalhos futuros.

Ao final deste trabalho, são apresentados os elementos pós-textuais, que se dividem em referências bibliográficas e apêndices, os quais são referentes a elementos desenvolvidos pelo autor.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceito de Qualidade de Energia Elétrica

O conceito de qualidade de energia elétrica pode apresentar vários resultados e discussões. Segundo Paulilo (2013), o termo “qualidade da energia” inclui uma gama de fenômenos, desde a geração de energia até problemas envolvendo a rede de transmissão de dados. De maneira geral, os profissionais da área adotaram a definição de perda da qualidade de energia como “qualquer alteração na magnitude, forma de onda, frequência da tensão e/ou corrente que possa prejudicar a operação e a vida útil dos equipamentos”. Por essa razão, o tema tem ganhado maior destaque tanto entre os consumidores quanto entre as concessionárias. Além dos aspectos técnicos, o conceito de qualidade de energia deve levar em consideração os fatores econômicos, sociais e ambientais.

2.2 A necessidade de fornecer um serviço com qualidade

Atualmente, são disponibilizados equipamentos com variações de imunidade a surtos. Um exemplo são os equipamentos eletrônicos, que geralmente possuem fontes bivolt com variação de frequência de fornecimento, assim como outras cargas não lineares. Porém, ambas introduzem harmônicas na rede, afetando o desempenho e a vida útil de outros equipamentos. Isso resulta na necessidade de o sistema fornecer energia com qualidade.

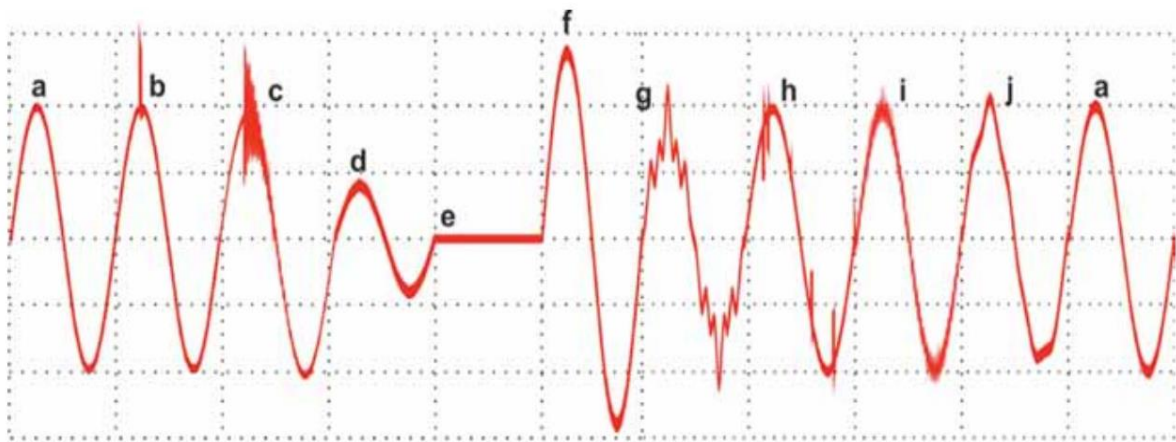
Porém, assegurar um fornecimento de qualidade é uma tarefa complexa, pois, de acordo com o Instituto Acende Brasil (2014), podem surgir empecilhos para a incorporação dessas melhorias, os quais seguem a seguinte ordem:

- Em primeiro lugar, é necessário dar prioridade às múltiplas dimensões da qualidade do fornecimento, tais como confiabilidade, conformidade e presteza do serviço.
- Em segundo lugar, para manter a qualidade, é necessário contar com a atuação conjunta de vários agentes, incluindo geradores, transmissores e distribuidores.
- Em terceiro lugar, o maior empecilho é o custo para a aplicação, pois qualidade possui um custo que se reflete diretamente na tarifa para o consumidor.

2.3 Anomalias e Fenômenos Presentes no Fornecimento de Energia Elétrica

Os distúrbios de energia produzem resultados indesejáveis para o sistema conectado como carga. Também chamado de problema de energia, que é um conjunto de distúrbios, ele aparece no sistema devido a fatores externos e internos (LOPEZ, 2013). Esses distúrbios podem apresentar diversos aspectos que os diferenciam entre si, portanto, sua classificação varia de acordo com a intensidade, duração e a distorção em relação à onda fundamental. Para ilustrar esses eventos, a Figura 1 mostra os principais distúrbios que ocorrem na rede de fornecimento:

Figura 1 - Anomalias presentes na rede de fornecimento de energia



Fonte: Paulilo (2013).

Sendo:

- a - Onda senoidal da tensão
- b - Transitório impulsivo
- c - Transitório oscilatório
- d - Afundamento de tensão
- e - Interrupção
- f - Elevação de tensão
- g - Harmônicas
- h - Notching de tensão
- i - Ruídos
- j - Inter-harmônicos

Cada fenômeno será descrito na tabela 1 para compreender sua origem e como pode afetar negativamente a qualidade de energia, além das soluções para minimizar estes distúrbios.

Tabela 1 - Categorias de distúrbios que prejudicam a qualidade da energia elétrica

Distúrbios	Causas	Efeitos	Soluções
Transitórios impulsivos	-Descargas atmosféricas; -Chaveamentos de cargas e/ou dispositivos de proteção.	- Excitação de circuitos ressonantes; - Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.; - Erros de processamento e perdas de sinais.	- Filtros; - Supressores de surtos; -Transformadores isoladores;
Transitórios oscilatórios	- Descargas atmosféricas; - Chaveamentos de capacitores, linhas, cargas e transformadores; - Transitórios impulsivos.	- Mau funcionamento de equipamentos controlados eletronicamente, conversores de potência, etc.; - Redução da vida útil de motores, geradores, etc.	- Filtros; - Supressores de surtos; - Transformadores isoladores;
Sub e sobretensões	- Partidas de motores; - Variações de cargas; - Chaveamento de capacitores; - TAPs de transformadores ajustados incorretamente.	- Pequena redução na velocidade dos motores de indução e no reativo dos bancos de capacitores; - Falhas em equipamentos eletrônicos; - Redução da vida útil de máquinas rotativas, transformadores, cabos, disjuntores, TPs e TCs; - Operação indevida de relés de proteção, motores, geradores, etc.	- Reguladores de tensão; - Fontes de energia de reserva; - Chaves estáticas; - Geradores de energia.
Interrupções	- Curto-circuito; - Operação de disjuntores; - Manutenção.	- Falha de equipamentos eletrônicos e de iluminação; - Desligamento de equipamentos; - Interrupção do processo produtivo (altos custos).	- Fontes de energia sobressalentes; - Sistemas “no-break”; - Geradores de energia.
Desequilíbrios	- Fornos a arco; - Cargas monofásicas e bifásicas; - Assimetrias entre as impedâncias; - Falta de transposição de linhas de transmissão.	- Redução da vida útil de motores de indução e máquinas síncronas; - Geração, pelos retificadores, de 3º harmônico e seus múltiplos.	- Operação simétrica; - Dispositivos de compensação.

Distúrbios	Causas	Efeitos	Soluções
Nível CC	- Operação ideal de retificadores de meia onda, etc.	- Saturação de transformadores; - Corrosão eletrolítica de eletrodos de aterramento e de outros conectores.	
Harmônicos	- Cargas não lineares.	- Sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução; - Danificação de capacitores, etc.; - Operação indevida de disjuntores, relés, fusíveis, etc.	- Filtros; - Transformadores isoladores; - Reatores de linhas.
Inter-harmônicos	- Conversores estáticos de potência; - Cicloconversores; - Motores de indução; - Equipamentos a arco, etc.	- Interferência na transmissão de sinais Carrier; - Indução de flicker visual no display de equipamentos.	
Notching	- Equipamentos eletrônicos de potência.	- Operação indevida de dispositivos de medição e proteção.	
Ruídos	- Chaveamento de equipamentos eletrônicos de potência; - Radiações eletromagnéticas.	- Distúrbios em equipamentos eletrônicos (computadores e controladores programáveis).	- Aterramento das instalações; - Filtros.
Flutuações de tensão	- Cargas intermitentes; - Fornos a arco; - Partidas de motores.	- Flicker; - Oscilação de potência e torque nas máquinas elétricas; - Queda de rendimento de equipamentos elétricos; - Interferência nos sistemas de proteção.	- Sistemas estáticos de compensação de reativos; - Capacitores em série.
Variação de frequência	- Perda de geração, perda de linhas de transmissão, etc.	- Danos severos nos geradores e nas palhetas das turbinas, etc. podem ocorrer.	

Fonte: Paulilo (2013).

2.4 Normas e Regulamentos para Classificar a Condição da Energia

Com a necessidade de orientar e regulamentar as concessionárias de energia, surgiram várias normas internacionais com o objetivo de qualificar os aspectos de fornecimento de energia. Segundo Lopez (2013) podemos destacar:

- EN50160: aborda aspectos como flicker, harmônicas, desvios, variações de tensão e outros;
- IEC 61000-4-15: voltada para a medição de flicker e inclui especificações para medidores;
- IEC 61000-4-7: descreve uma técnica padrão de medição para harmônicas;
- IEEE 519 (1992): descreve níveis aceitáveis de harmônicas para o ponto de entrega de energia pela concessionária;
- IEEE 1159 (1995): trata do monitoramento e interpretação de dados de fenômenos que causam problemas na qualidade de energia.

No Brasil, a principal entidade responsável pela regulação e fiscalização da qualidade de energia elétrica fornecida é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Em 2008, a ANEEL disponibilizou o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) que está dividido em 11 módulos, são eles:

- Módulo 1 - Glossário de Termos Técnicos do Prodist;
- Módulo 2 - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição;
- Módulo 3 - Conexão ao Sistema de Distribuição de Energia Elétrica;
- Módulo 4 - Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição;
- Módulo 5 - Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura;
- Módulo 6 - Informações Requeridas e Obrigações;
- Módulo 7 - Cálculo de Perdas na Distribuição;
- Módulo 8 - Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica;
- Módulo 9 - Ressarcimento de Danos Elétricos;
- Módulo 10 - Sistema de Informação Geográfica Regulatório;
- Módulo 11 - Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares.

2.4.1 Módulo 8 do PRODIST

Devido à sua relevância, o módulo que receberá ênfase neste trabalho será o módulo 8, uma vez que trata especificamente da qualidade do fornecimento de energia elétrica. Esse módulo estabelece os parâmetros relacionados à qualidade do produto, qualidade do serviço, qualidade comercial, assim como à segurança do trabalho e das instalações. A seguir, serão apresentados os fenômenos associados à qualidade do produto e, em seguida, sua definição conforme descrita pelo módulo 8 do PRODIST:

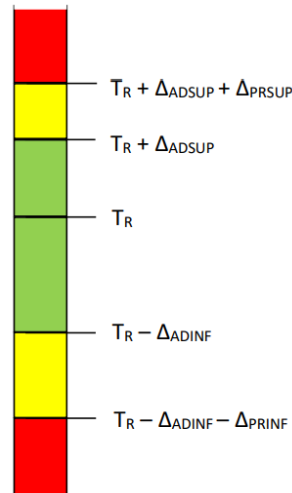
- fenômenos de regime permanente:
 - I. variações de tensão em regime permanente;
 - II. fator de potência;
 - III. harmônicos;
 - IV. desequilíbrio de tensão;
 - V. flutuação de tensão;
 - VI. variação de frequência.
- fenômenos de regime transitório:
 - I. variações de tensão de curta duração – VTCD.

2.4.1.1 *Variações de tensão em regime permanente*

A conformidade de tensão em regime permanente está relacionada à comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos.

A tensão em regime permanente deve ser monitorada em todo o sistema de distribuição, com a distribuidora utilizando recursos e técnicas atualizadas para esse acompanhamento. É importante que a distribuidora atue de forma preventiva para que a tensão em regime permanente se mantenha dentro dos padrões adequados. A conformidade dos níveis de tensão deve ser avaliada nos pontos de conexão com a rede de distribuição, nos pontos de conexão entre distribuidoras e entre distribuidoras e unidades consumidoras.

Os valores de tensão obtidos por medições devem ser comparados à tensão de referência, que pode ser a nominal ou a contratada, de acordo com o nível de tensão do ponto de conexão. Essas leituras estão divididas em três categorias: adequadas, precárias ou críticas. A figura 2 ilustra essas classificações:

Figura 2 - Faixas de tensão medidas em relação à de referência

Fonte: ANEEL (2021).

Considerando que T_R é a Tensão de referência, as faixas adequadas de tensão estão dentro do intervalo de $T_R - \Delta_{ADINF}$ até $T_R + \Delta_{ADSUP}$. Já as faixas precárias de tensão são determinadas por $T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$ e $T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$. Valores que se encontram fora desses intervalos mencionados anteriormente são considerados como nível crítico de tensão. A seguir, na tabela 2, serão apresentados os intervalos para fornecimento de tensão inferior a 2,3 kV:

Tabela 2 - Pontos de conexão em tensão nominal inferior a 2,3 kV (380/220)

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação da Tensão de leitura (V)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403) / (191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: ANEEL (2021).

2.4.1.2 Fator de potência

O valor do fator de potência é calculado com base nos valores da potência ativa e da potência reativa, conforme descrito na fórmula a seguir:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \text{ ou } FP = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}}$$

Equação 1 - Cálculo do fator de potência

onde:

- P - Potência Ativa;
- Q - Potência Reativa;
- EA - Energia Ativa;
- ER - Energia Reativa;

2.4.1.3 Harmônicos

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. Para avaliar e quantificar essas distorções, são utilizados os indicadores de distorções harmônicas, os quais estão apresentados na tabela 3 a seguir:

Tabela 3 - Descrição dos indicadores de distorções harmônicas

Descrição	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	DIT _h %
Distorção harmônica total de tensão	DTT%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	DTT _p %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	DTT _i %
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	DTT ₃ %
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	DTT95%
Valor do indicador DTTP% que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	DTT _p 95%
Valor do indicador DTTI% que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	DTT _i 95%
Valor do indicador DTT3% que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	DTT ₃ 95%

Fonte: ANEEL (2021).

Para estimar os indicadores DIT_h%, DTT%, DTT_p%, DTT_i% e DTT₃% é necessário utilizar as seguintes equações:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 [\%]$$

Equação 2 - Cálculo de DIT_h%

“ V_h ” representa a tensão harmônica de ordem “ h ”, em que a variável “ h ” indica a ordem harmônica individual, e a variável “ V_1 ” representa amplitude da tensão na frequência fundamental medida.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \text{ [%]}$$

Equação 3 - Cálculo de DTT%

Considerando que “ h ” representa todas as harmônicas de 2 até “ $h_{máx}$ ”, em que “ $h_{máx}$ ” é a ordem harmônica máxima determinada pela classe do equipamento de medição (classe A ou S), “ V_h ” representa a tensão harmônica de ordem “ h ”, enquanto “ V_1 ” representa a tensão na frequência fundamental medida.

$$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \times 100 \text{ [%]}$$

Equação 4 - Cálculo de DTT_p%

Dado que “ h ” representa todas as harmônicas de ordem par, que não são múltiplas de 3 ($h=2, 4, 8, 10, 14, \dots$), “ h_p ” caracteriza a máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3, “ V_h ” representa a amplitude da tensão na ordem harmônica “ h ”, enquanto “ V_1 ” representa a tensão na frequência fundamental medida.

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \times 100 \text{ [%]}$$

Equação 5 - Cálculo de DTT_i%

Levando em conta que “ h ” representa todas as harmônicas de ordem ímpar, que não são múltiplas de 3 ($h=5, 7, 11, 13, 17, \dots$), “ h_i ” representa a máxima ordem harmônica ímpar, que não é múltipla de 3, “ V_h ” representa a amplitude da tensão na ordem harmônica “ h ”, e a variável “ V_1 ” representa a tensão na frequência fundamental medida.

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100 \text{ [%]}$$

Equação 6 - Cálculo de DTT₃%

Tendo em vista que “h” representa todas as harmônicas múltiplas de 3 ($h=3, 6, 9, 12, 15, \dots$), “ h_3 ” representa a máxima ordem harmônica múltipla de 3, “ V_h ” representa a tensão harmônica de ordem “h”, e a variável “ V_1 ” representa a amplitude da tensão na frequência fundamental medida.

Na tabela 4, serão apresentados os valores limites dos indicadores das distorções harmônicas totais, os quais correspondem aos valores máximos desejáveis a serem observados no sistema de distribuição. Os seguintes valores serão apresentados:

Tabela 4 - Limites das distorções harmônicas totais (%)

Indicador	Tensão nominal (V_n)		
	$V_n < 2,3\text{kV}$	$2,3\text{kV} \leq V_n < 69\text{kV}$	$69\text{ kV} \leq V_n < 230\text{kV}$
DTT95%	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _p 95%	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _i 95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT ₃ 95%	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL (2021).

2.4.1.4 Desequilíbrio da tensão

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema.

2.4.1.5 Flutuação de tensão

A flutuação de tensão é um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica dos valores eficaz ou de pico da tensão instantânea.

2.4.1.6 Variação de frequência

Os sistemas de distribuição e geração devem operar, em condições normais e em regime permanente, dentro dos limites de frequência 59,9 Hz a 60,1 Hz. Caso ocorra uma anomalia na rede de distribuição, é responsabilidade da geração assegurar que a frequência retorne aos valores entre 59,5 Hz a 60,5 Hz no intervalo de 30 segundos após o distúrbio.

Se for necessário, pode ser realizado corte de geração ou de carga. No entanto, é importante observar que a frequência:

- não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 em condições extremas;
- pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 segundos;
- pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 5 segundos.

2.4.1.7 Variação de tensão de curta duração

Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) são caracterizadas por desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão, os quais ocorrem durante um intervalo de tempo inferior a 3 minutos.

2.4.1.8 Indicadores de continuidade

Por meio da apuração dos indicadores de continuidade de serviço, as distribuidoras, as centrais de geração, os consumidores e a própria ANEEL podem quantificar a qualidade do serviço entregue e o desempenho do sistema elétrico. Os indicadores de continuidade são mensurados em relação à frequência e à duração das interrupções, sendo divididos em indicadores individuais e coletivos.

Os indicadores de continuidade individuais devem ser apurados para todas as unidades consumidoras, centrais geradoras ou pontos de conexão. Já os indicadores de continuidade coletiva devem ser apurados para cada conjunto de unidades consumidoras.

2.5 Equipamentos para monitoramento e análise da qualidade de energia

O monitoramento da energia elétrica, bem como o de sua qualidade é realizado por instrumentos de medição, usualmente chamados de analisadores de qualidade da energia (KRON, 2015). Diversos fabricantes produzem esse equipamento, cujos usos podem variar de acordo com a sua aplicabilidade, como mostrado na figura 3. Eles podem ser instalados em caixas de medição, quadros de distribuição e até mesmo nos ramais de entrada dos consumidores, com diferentes tempos de funcionamento, desde uma simples medição até uma instalação permanente.

No entanto, esses equipamentos se distinguem em três classes conforme estabelecido no padrão internacional IEC 61400-30, o qual também é adotado no Brasil. Segundo Kron (2015), as classes são as seguintes:

- Classe A: Essa classe de instrumentos exige uma precisão de 0,1% e é adequada para investigação de fenômenos elétricos.
- Classe S: Essa classe de instrumentos são aplicados em levantamentos estatísticos e pesquisas.
- Classe B: Instrumentos desta classe utilizam protocolos definidos por seus próprios fabricantes para o cálculo dos parâmetros.

Figura 3 - Aparelhos comerciais para análise e monitoramento da qualidade de energia elétrica, sendo da esquerda para direita, respectivamente: 1732-Energy Logger produzido pela Fluke, ET-5062 produzido pela Minipa e BlackBox G4500 produzido pela Elspec



Fonte: Fluke (2022), Minipa (2022) e Elspec (2022)

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Desenvolvimento do protótipo

Para monitorar e analisar os parâmetros que definem a qualidade da energia elétrica no fornecimento ou na instalação, está sendo elaborado um protótipo, conforme mencionado no capítulo 1 deste trabalho. Esse protótipo deve apresentar os valores dos seguintes parâmetros: tensão, corrente, fator de potência e frequência da rede. Ele será aplicado em instalações monofásicas de tensão alternada 127/220 V. Para a realização desse protótipo, iniciou-se a busca por componentes que atendam aos parâmetros necessários.

3.1.1 Escolha do microcontrolador

A placa escolhida para prototipagem é a ESP32 AI-S3 (figura 4), que incorpora o microcontrolador ESP32-S3 da fabricante Espressif Systems. A escolha dessa placa deve-se ao hardware poderoso presente neste microcontrolador. Além disso, a programação da placa pode ser feita utilizando o ambiente IDE do Arduino.

Figura 4 - Placa ESP32 AI-S3 para elaboração do protótipo



Fonte: Mercado Livre (2023).

O microprocessador da placa é o Xtensa® LX7, que possui uma arquitetura de 32 bits, com dois núcleos de processamento (dual-core). Ele possui três versões de memória flash, variando de 4, 8 ou até 16 Megabytes, 512 Kilobytes de memória SRAM (Static Random Access Memory ou Memória Estática de Acesso Aleatório), 384 Kilobytes de memória ROM e 16 Kilobytes de SRAM no RTC. Além disso, pode ou não apresentar memória PSRAM (ESPRESSIF SYSTEMS, 2022).

Este microcontrolador conta com 34 pinos que podem ser configurados como entrada ou saída. Pode-se utilizar até 10 pinos de entrada analógica (caso o Wi-Fi esteja desabilitado, esse número pode chegar a 20 pinos) e possui 2 pinos de saída analógica. Os conversores analógico-digital do ESP32-S3 são de aproximações sucessivas (do inglês SAR) de 12 bits.

Para fins comparativos, a tabela 5 retrata as diferenças entre as placas Arduino UNO e ESP32-S3.

Tabela 5 - Comparação entre as placas Arduino UNO e ESP32-S3

	ARDUINO UNO	ESP32-S3
Tensão de Alimentação	2,7V a 5,5V	3V a 3,6 V
Pinos I/O	14	34
Pinos PWM	6	8
Pinos Analógicos	6 (10 bits)	20 (12 bits)
Processador	ATMega328P de 8 bits	Xtensa® LX7 32 bits dual core
Memória Flash	32 KB	4, 8 ou até 16 MB
SRAM	2 KB	512 KB
EEPROM	1 KB	-
ROM	-	384 KB
Velocidade do Clock	16 MHz	240 MHz
Porta Serial (UART)	1	3
Portas SPI	1	4
Porta I2C	1	2
Porta I2S	-	2
Wi-Fi	-	2,4 GHz
Bluetooth	-	Bluetooth 4.2/ BLE
Sensores Touch	-	14
Custo	R\$ 99,90	R\$ 109,90

Fonte: Arduino (2022), Espressif Systems (2022), Eletrogate (2023), Saravati (2023).

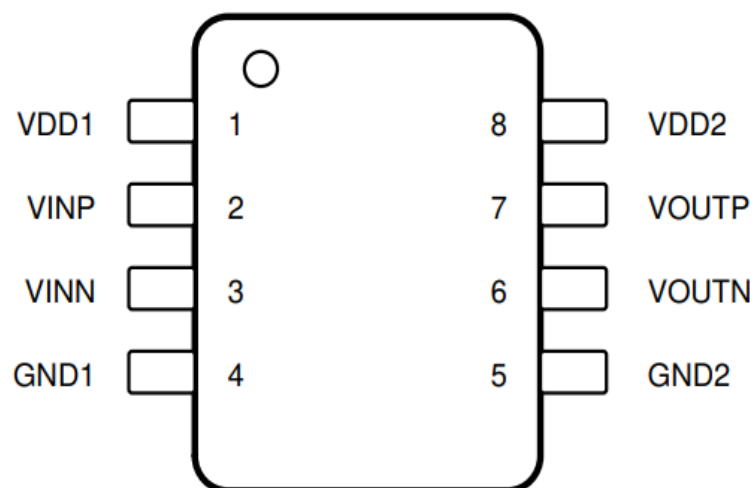
A cotação de preço foi realizada no mês de janeiro de 2023, em duas lojas do mercado nacional. Porém, o valor pode sofrer alterações devido à variação cambial, ao período de aquisição e à disponibilidade de estoque.

3.1.2 Escolha do sensor de Tensão

A medição de tensão pode ser realizada, por exemplo, utilizando um transformador de tensão ou um amplificador operacional. O uso do transformador de tensão garante uma medição com isolamento e segurança, porém, devido ao núcleo com material ferromagnético, ele só fornece sinais com frequências próximas à fundamental (60Hz) e não mostra todos os harmônicos presentes na rede. Já o uso do amplificador operacional proporciona precisão, pois utiliza apenas um divisor resistivo. No entanto, o amplificador operacional não oferece isolamento, o que o torna perigoso para uso contínuo com o microcontrolador.

A fim de garantir precisão, segurança e isolamento para o microcontrolador, foi escolhido o amplificador isolador de alta precisão AMC1301 para realizar as leituras de tensão da rede. O AMC1301, produzido pela Texas Instruments, pode ser aplicado tanto na medição de tensão quanto na medição de corrente (usando um resistor shunt). Segundo a Texas Instruments (2020), este amplificador possui um isolamento galvânico reforçado, capaz de suportar surtos de até 7 kV de pico e tensões RMS de 5 kV por até 1 minuto. Essas características garantem proteção suficiente ao microcontrolador, além de apresentar propriedades resistentes à interferências eletromagnéticas, garantindo a precisão do componente. A figura 5 apresenta os pinos do AMC1301, enquanto a tabela 6 apresenta os principais parâmetros de operação do componente.

Figura 5 - Configuração dos pinos do AMC1301



Fonte: Texas Instruments (2020).

Tabela 6 - Parâmetros de operação do AMC1301

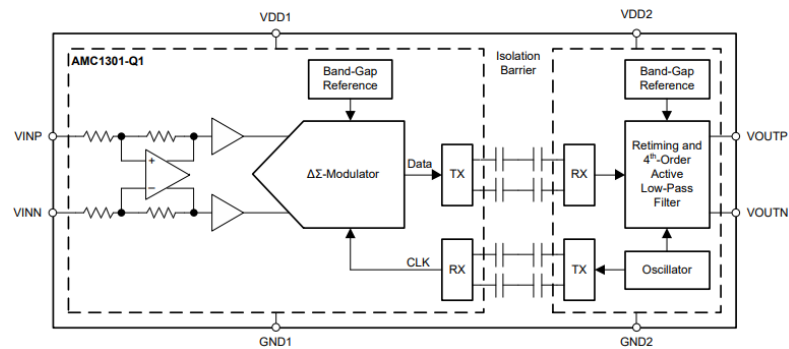
Parâmetros	Mínimo	Máximo	Unidade
Tensão de Alimentação do Lado de Alta Tensão	3	5,5	V
Tensão de Alimentação do Lado de Baixa Tensão	3	5,5	V
Faixa de Temperatura de Operação	-40	125	°C
Potência Máxima de Dissipação	-	81,4	mW
Máxima Tensão de Pico Repetitiva	-	1,5	kV (AC)
Máxima Tensão de Isolação Não Repetitiva	-	7	kV
Tensão Diferencial de Entrada	-250	250	mV
Tensão Máxima de Entrada	-302,7	302,7	mV

Fonte: Texas Instruments (2020)

Para este protótipo foi idealizado o uso do AMC1301 apenas para medição de tensão. Já a medição de corrente será realizada utilizando um outro tipo de sensor, do tipo não invasivo.

3.1.2.1 Acoplamento capacitivo

O amplificador isolador AMC1301 apresenta uma isolamento galvânica de acoplamento capacitivo. Inicialmente, na entrada do componente apresenta um amplificador diferencial que aciona um modulador delta-sigma, o qual possui um clock derivado internamente. Após passar pelo modulador, o sinal é transmitido através da barreira de isolamento. Em seguida, na saída do componente, o sinal é demodulado e sincronizado com o clock, apresentando um sinal diferencial, assim como o de entrada. O AMC1301 apresenta um ganho fixo de 8.2, com a largura de banda da saída em torno de 210 KHz. A Figura 6 retrata os estágios de funcionamento do AMC1301.

Figura 6 - Diagrama de blocos do AMC1301

Fonte: Texas Instruments (2020).

3.1.3 Escolha do sensor de corrente

Após realizar análises em relação à segurança, facilidade de instalação, custo e garantia de medição precisa e linear, optou-se pelo uso de um sensor de efeito Hall. Esse sensor, além de apresentar isolamento semelhante ao de um transformador de corrente, também permite mostrar os efeitos das harmônicas presentes na corrente do condutor a ser medido. O sensor de efeito Hall escolhido é HSTS016L, da fabricante YHDC. Segundo informações disponíveis no site da fabricante, o sensor permite leituras tanto em sinal DC quanto AC (de até 25 KHz), com linearidade de 1% e precisão de 1%, com isolamento de até 2,5 KV por 1 minuto. A figura 7 apresenta o sensor de efeito Hall utilizado para medição de corrente, enquanto a tabela 7 apresenta os principais parâmetros de operação desse componente.

Figura 7 - Sensor de corrente HSTS016L

Fonte: YHDC (s.d.)

Tabela 7 - Parâmetros de operação do HSTS016L

Parâmetros	Mínimo	Máximo	Unidade
Valores de Corrente Nominal de Entrada	-30	30	A
Valores de Corrente de Entrada Máximo	-45	45	A
Valores de Saída	1,875	3,125	V
Precisão	-1	1	%
Linearidade	-	<1	%
Tensão de Alimentação	4,75	5,25	V
Consumo de Corrente	-	≤12	mA
Impedância de carga	≥ 10K	-	Ω
Tensão Zero de Offset	-15	15	mV
Tempo de Resposta	-	≤5	μs
Resposta em Frequência	DC	25K	Hz

Fonte: YHDC (s.d.)

3.1.4 Escolha do ADC Externo

Apesar do ESP32-S3 possuir um hardware poderoso para processar os sinais, é visto na documentação do fabricante que o ADC integrado neste microcontrolador apresenta um erro relevante nas medições. Para corrigir esse erro o fabricante disponibilizou uma API para os ambientes de desenvolvimento. Porém, neste projeto, optou-se pelo uso do ADC externo MCP3204, fabricado pela Microchip Technology Incorporated. Esse circuito integrado (CI) possui 4 entradas analógicas configuráveis como diferencial ou comum, com uma resolução de 12 bits e taxa de amostragem de até 100 mil amostras por segundo. Na figura 8, exibe-se o ADC utilizado neste protótipo, ao passo que a tabela 8 apresenta os principais parâmetros de operação do MCP3204.

Figura 8 - ADC externo MCP3204

Fonte: Microchip (s.d.).

Tabela 8 - Parâmetros de operação do MCP3204

Parâmetros	Mínimo	Máximo	Unidade
Tensão de Alimentação	2,7	5,5	V
Consumo de Corrente	225	400	μA
Resolução	-	12	bits
Não Linearidade	-	2	bits LSB
Erro de Offset	-	3	bits LSB
Erro de Ganho	-	5	bits LSB
Temperatura de Operação	-65	125	°C
Proteção ESD	-	4	kV
Tensão de Referência	0,25	5,5	V

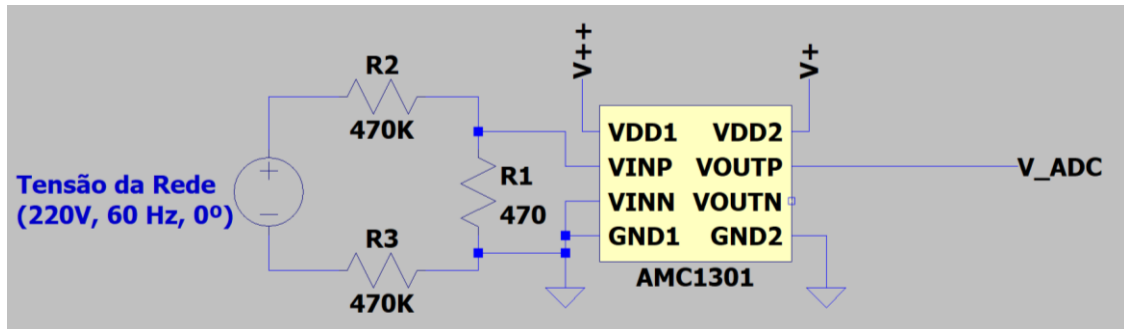
Fonte: Microchip (2008).

3.1.5 Circuitos de condicionamento de sinais

A elaboração do circuito de condicionamento dos sinais foi realizada para possibilitar a leitura do ADC externo, bem como para medir a frequência da rede e o fator de potência. É importante considerar que as portas digitais do microcontrolador só conseguem ler o intervalo de tempo dos pulsos se as formas de ondas forem convertidas em ondas quadradas.

3.1.5.1 Circuito de adequação do sinal de tensão

A figura 9 apresenta o circuito desenvolvido para a leitura da tensão da rede. Primeiramente, foi feita uma derivação na entrada da alimentação da fonte chaveada do protótipo. Em seguida, foi utilizado um divisor resistivo para a entrada do AMC 1301. Posteriormente, a saída do amplificador é conectada à entrada ADC do MCP3204. O circuito foi condicionado dessa forma visando preservar o sinal original. Além disso, o offset do AMC1301 apresenta um valor próximo a 1,55 V, e os valores de pico estão dentro da faixa de medição do ADC externo.

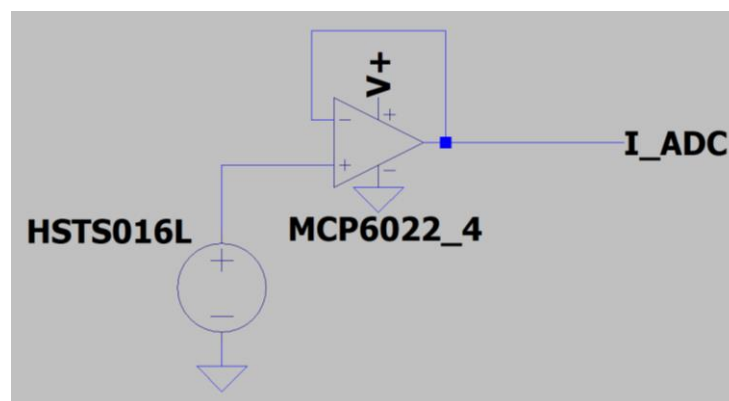
Figura 9 - Circuito de condicionamento do sinal da tensão

Fonte: Autor (2023).

A fim de garantir a isolamento entre a tensão de alimentação do microcontrolador e a tensão de entrada do lado alto do AMC1301 foi empregado um conversor CC/CC isolado B0303S-1W, fabricado pela MORNSUN. Esse conversor opera com faixas de tensão de entrada entre 2,97 V a 3,63 V e possui uma tensão de saída de 3,3 V, com isolamento de 1,5 KV DC. A conexão desse conversor no circuito é apresentada no Apêndice B - Arquivo esquemático da placa desenvolvido para o protótipo.

3.1.5.2 Circuito de adequação do sinal de corrente

A figura 10 ilustra o circuito de condicionamento de corrente. Inicialmente, o sinal oriundo do sensor de efeito Hall passa por um amplificador operacional configurado como buffer. Em seguida, sua saída é conectada à entrada do ADC externo. Somente essa configuração é necessária devido ao valor de offset do HSTS016L ser em torno de 2,5 V e os valores limites de saída do sensor estarem dentro da faixa de medição do ADC.

Figura 10 - Circuito de condicionamento do sinal de corrente

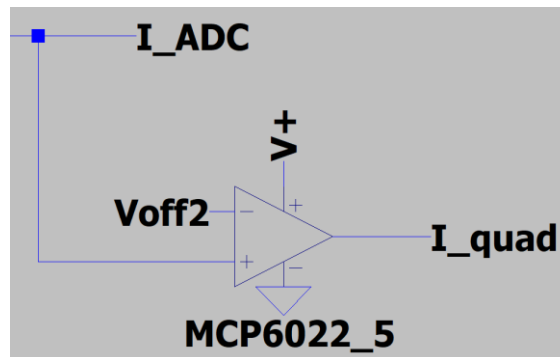
Fonte: Autor (2023).

O amplificador operacional escolhido foi o MCP6022, da fabricante Microchip Technology Incorporated, que possui a característica de ser um amplificador *rail-to-rail in/out*, com tensão de *offset* de 500 μV e *slew rate* de 7 $\text{V}/\mu\text{s}$, o que se adequa ao projeto proposto.

3.1.5.3 Circuito de medição do fator de potência e frequência do sinal

Para realizar a medição do fator de potência e da frequência, é necessário modificar a forma de onda do sinal. Essa alteração se faz necessária, pois o microcontrolador só poderá ler o intervalo de defasagem entre as ondas e o intervalo do sinal através das entradas digitais se estas forem convertidas em ondas quadradas. O circuito responsável por converter o sinal senoidal em um sinal de onda quadrada está ilustrado na figura 11.

Figura 11 - Circuito de conversão de onda



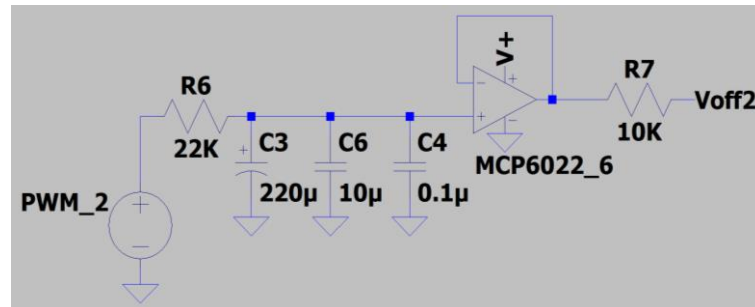
Fonte: Autor (2023).

Para realizar a alteração da forma de onda é utilizado um circuito Schmitt trigger por meio de um amplificador operacional. Inicialmente, é feita uma derivação em cada saída dos amplificadores referentes aos sinais de tensão e corrente. Em seguida, é conectado na entrada não inversora de um amplificador operacional. Porém, para converter a forma de onda senoidal, é necessário o ajuste de *offset* na entrada inversora do amplificador. Para esse ajuste, adota-se um sinal PWM proveniente do microcontrolador. Esse sinal é posteriormente passado por um filtro passa-baixa com circuito buffer, a fim de gerar um sinal de corrente contínua (CC).

Os pinos PWM do microcontrolador têm a capacidade de serem ajustados com uma resolução de 1 até 16 bits e uma frequência de onda de 1 a 40 MHz. Para este projeto, configurou-se a resolução de 12 bits com a frequência de 1 kHz.

A figura 12 demonstra o circuito utilizado para o ajuste de *offset* na conversão de onda, conforme adotado neste protótipo.

Figura 12 - Circuito de ajuste de offset

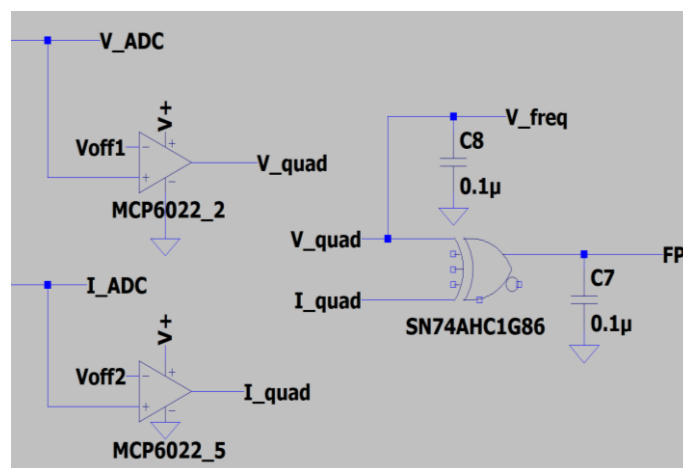


Fonte: Autor (2023).

Após realizar os ajustes mencionados é necessário adicionar uma porta XOR na saída dos amplificadores que geram os sinais de ondas quadradas. O componente utilizado é o SN74AHC1G86 fabricado pela Texas Instruments, que terá o papel de facilitar a medição do intervalo de tempo entre as ondas para o microcontrolador. Na saída do CI da Texas Instruments é colocado um capacitor a fim de minimizar os ruídos.

Para a medição da frequência da rede é feita uma derivação na entrada da porta XOR referente ao sinal de tensão de onda quadrada. Em seguida, é adicionado um capacitor para suprimir os ruídos. Posteriormente, é feita a conexão em uma porta digital do microcontrolador. A figura 13 apresenta o circuito de conversão de onda utilizado para medir o fator de potência e a frequência da rede.

Figura 13 - Circuito de condicionamento de fator de potência e frequência



Fonte: Autor (2023).

3.2 Desenvolvimento do algoritmo de programação

Para o desenvolvimento do *firmware*, utilizou-se o software Arduino IDE (Ambiente de desenvolvimento integrado, em português) na versão 2.0.4. Esse software consiste em um conjunto de ferramentas que auxiliam na programação do microcontrolador. Inicialmente, foi desenvolvido para uso nos microcontroladores da família AVR presentes nas placas de desenvolvimento Arduino. Porém, com as atualizações, principalmente com a versão 2.0, tornou-se possível integrar várias famílias de microcontroladores.

Dentre as características desta ferramenta, destaca-se o fato de ser gratuita, *open-source* e um software do tipo GCC (Coleção de compiladores GNU), o que permite trabalhar com a linguagem C/C++ para o desenvolvimento do software do microcontrolador.

3.2.1 Método de amostragem

Segundo o módulo 8 do PRODIST, é necessário realizar 1.008 leituras no intervalo de 10 minutos cada. Isso equivale a 168 horas, o que corresponde a uma semana, para medir os indicadores relacionados à tensão de regime permanente.

No módulo 5 do PRODIST, é apresentado que para outros parâmetros é necessária a medição no intervalo entre 5 a 15 minutos. Os valores eficazes são calculados a partir de amostras de 12 a 15 ciclos (0.2 a 0.25 segundos). Além disso, o equipamento precisa armazenar todos os parâmetros por no mínimo 37 dias.

A configuração padrão do MCP3204, de acordo com o datasheet, apresenta um clock que varia de 1 a 2 MHz e uma taxa de amostragem de até 100 mil amostras por segundo. Ao dividir o número de amostras pela frequência fundamental do sinal proveniente da rede, é possível analisar até 1666 amostras por período. Conforme mencionado no módulo 8 do PRODIST, é considerada a leitura até a 40ª harmônica (2400 Hz). Porém, de acordo com o critério de Nyquist, é necessário que a frequência de amostragem seja, no mínimo, o dobro da frequência do sinal que precisa ser reconstituído.

Para atender a todos os critérios exigidos pelo PRODIST e pelo teorema de Nyquist, adotou-se por uma frequência de amostragem de 15 kHz, totalizando um valor de 250 amostras por período.

Procurou-se respeitar os intervalos estabelecidos nos módulos 8 e 5, realizando uma leitura de tensão a cada 10 minutos e, para outros parâmetros, uma leitura a cada 5 minutos. Contudo, decidiu-se implementar a medição de um novo indicador para facilitar a apresentação dos dados do protótipo, o qual será registrado a cada 15 segundos, englobando todos os parâmetros mencionados anteriormente.

3.2.2 Código de programação do microcontrolador

O código integralmente desenvolvido encontra-se no Apêndice A - Código desenvolvido para o protótipo. A fim de demonstrar todos os processos necessários para aquisição e armazenamento das amostras no protótipo, são apresentadas a seguir todas as etapas do firmware utilizado no microcontrolador:

- Iniciam-se as bibliotecas nativas e as variáveis globais, com os parâmetros da rede WiFi, servidor NTP, comunicação SPI e estados dos pinos digitais;
- É feita a definição das taxas de transmissão da comunicação serial;
- É realizada uma tentativa de conexão à rede WiFi parametrizada;
- Caso a conexão à rede WiFi seja estabelecida, inicia-se a comunicação com um servidor NTP;
- São realizadas as configurações do clock dos barramentos SPI pertencentes ao microSD e ao ADC externo;
- É feita a inicialização dos pinos PWM destinados ao ajuste de offset do circuito;
- Verifica-se a existência de um arquivo txt com o mesmo nome. Caso o arquivo esteja listado, é feita a tentativa de escrita no arquivo, caso não exista, é criado um novo arquivo com o nome correto;
- Realiza-se a aquisição de 250 amostras por período dos sensores de tensão e corrente;
- Calculam-se os valores RMS pertencentes à tensão e corrente;
- Realiza-se a aquisição dos sinais de ângulo de defasagem e frequência;
- Registram-se as amostras da tensão e corrente no microSD, com identificação da hora da leitura;
- Registram-se os valores RMS da tensão e corrente, juntamente com os valores da frequência da rede e ângulo de defasagem para cálculo de fator potência, no microSD, com identificação da hora do registro;
- Aguarda-se 15 segundos para repetir o ciclo de aquisição das amostras.

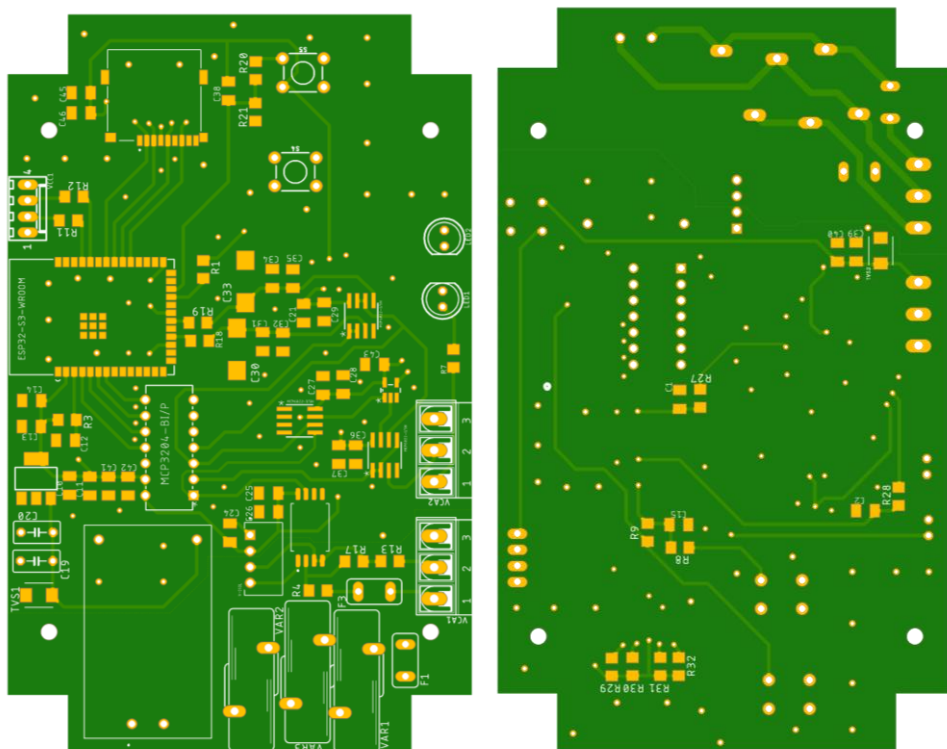
3.3 Desenvolvimento da placa de circuito impresso

Após os resultados e análises dos circuitos de condicionamento de sinais por meio das simulações, prosseguiu-se com o desenvolvimento de uma placa de circuito impresso. Essa abordagem garante uma maior qualidade e precisão nos dados coletados, além de proporcionar maior segurança no manuseio do protótipo, tornando-o mais próximo de um produto final.

Para o desenvolvimento do design da placa, utilizou-se o software Eagle PCB, um software de automação de projeto eletrônico que oferece um conjunto de ferramentas, incluindo a criação do esquemático do circuito e o design da placa.

Vale ressaltar que este software é pago, entretanto, neste trabalho foi utilizada a versão 9.6.2 com a licença acadêmica. Na figura 14, são apresentadas as vistas superior e inferior da placa de circuito impresso projetada neste software.

Figura 14 - Vista superior (esquerda) e vista inferior (direita) do design da placa de circuito impresso projetada no software Eagle PCB

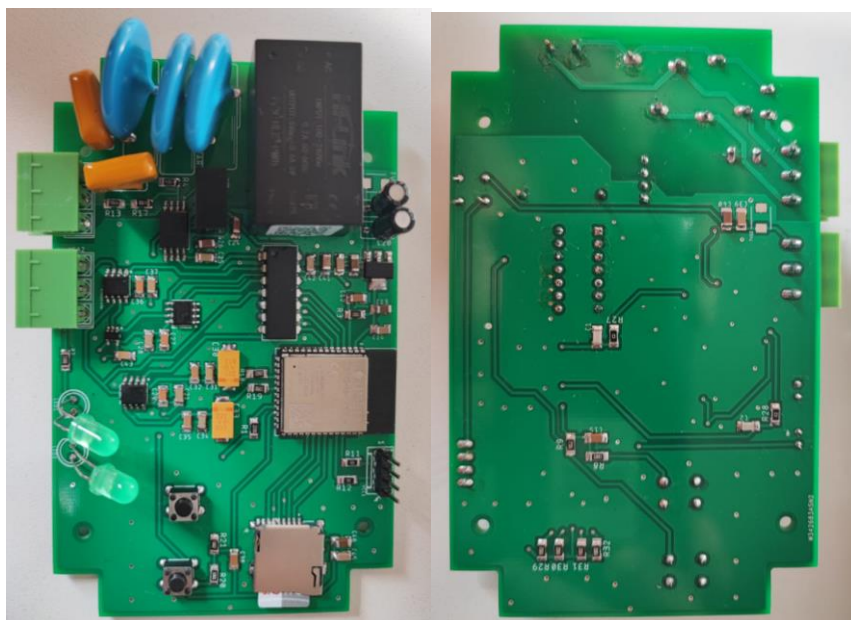


Fonte: Autor (2023).

No apêndice B, intitulado “Arquivo esquemático da placa desenvolvida para o protótipo”, são apresentados todos os componentes, valores e ligações presentes na placa.

Após a conclusão do design da PCB, prosseguiu-se com a encomenda da fabricação da placa de circuito impresso junto à empresa PCBWay, reconhecida no mercado por oferecer diversas opções de confecção. Após a fabricação, foi realizada a soldagem de todos os componentes, conforme retratado na figura 15, que apresenta o protótipo produzido com os componentes integrados.

Figura 15 - Protótipo após a soldagem de todos os componentes, vista superior (esquerda) e vista inferior (direita)



Fonte: Autor (2023).

Foi necessária a inserção de dois blocos terminais. O primeiro está relacionado à conexão com a rede monofásica, que garante o fornecimento de energia para o funcionamento do protótipo e permite a medição da tensão fornecida.

O segundo bloco refere-se aos terminais de conexão para o sensor de corrente HSTS016L. Além disso, foi adicionada uma barra de 4 pinos, que possibilita a comunicação serial com qualquer equipamento externo e inclui terminais de tensão, caso seja desejado o uso de outro módulo eletrônico na placa.

3.4 Procedimentos de validação do protótipo

Após o desenvolvimento da placa de circuito impresso, são realizados os procedimentos de calibração dos sensores de tensão e corrente, bem como os ajustes de PWM para medição da frequência e ângulo de defasagem. Para a calibração do protótipo, utiliza-se a bancada LabVolt Series 8010-B0 da fabricante Festo, instalada

no Laboratório de Transmissão de Energia Elétrica (Laboratório 904) do Campus Palmas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - IFTO, como equipamento de referência. Essa bancada possui diversos módulos de cargas pré-definidas, abrangendo cargas resistivas, capacitivas e indutivas, todas com uma tolerância de 5%.

Além disso, dispõe de um módulo de aquisição de dados (LabVolt Series 9063-00), que possui um conversor serial de 12 bits, com uma não linearidade máxima de 1,5 bits LSB e taxa máxima de aquisição de 600 mil amostras por segundo. Ele também possui uma banda de passagem de valor DC até 65 KHz e uma precisão de 1%, de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante.

Outro aspecto a ser considerado é que a bancada foi instalada no laboratório há alguns anos e o tempo de uso pode afetar diretamente as características dos componentes dos módulos. Adicionalmente, é importante ressaltar que não há registro de calibração recente no módulo de aquisição de dados da bancada. Tais condições podem comprometer os resultados apresentados.

A figura 16 apresenta o módulo de aquisição de dados, enquanto a figura 17 mostra a bancada mencionada.

Figura 16 - Módulo de aquisição de dados LabVolt Series 9063-00



Fonte: Festo Didactic (2023).

Figura 17 - Bancada modular LabVolt Series 8010 B0



Fonte: Autor (2023).

3.4.1 Procedimentos de comparação dos valores de tensão, corrente e frequência

Inicialmente, realiza-se a calibração do sensor de tensão. Para converter o valor do ADC externo para o valor medido considera-se o valor do divisor resistivo na entrada do AMC1301, assim como o ganho fixo e o valor de *offset* do amplificador isolado. Com esses aspectos já definidos, aplica-se a seguinte fórmula para conversão:

$$V_{\text{real}} = \frac{(ADC - V_{\text{off}}) * (3,3/4096)}{G} * \frac{(R2+R3)}{R1}$$

Equação 7 - Fórmula de conversão do valor do ADC para Volts

sendo:

- ADC - Valor de saída em bits do sinal;
- V_{off} - Valor do offset do sensor de tensão em bits;
- G - Valor de ganho fixo do amplificador isolador;
- R_{indice} - Valor do resistor pertencente ao divisor resistivo em ohms.

Para a calibração do sensor de corrente, consideram-se alguns aspectos na conversão dos valores lidos pelo ADC, incluindo o valor de *offset*, o número de voltas que o condutor está passado no sensor e o valor de escala do sensor. No caso do protótipo, a escala é de 30 amperes.

A seguir, é apresentada a fórmula para conversão:

$$I_{\text{real}} = \frac{(ADC - I_{\text{off}}) * (3,3/4096)}{n^{\circ}} * \frac{I_{\text{escala}}}{0.625}$$

Equação 8 - Fórmula de conversão do valor do ADC para Amperes

Sendo:

- ADC - Valor de saída em bits do sinal;
- I_{off} - Valor de offset do sensor de corrente em bits;
- n° - Referente ao número de voltas do condutor ao redor do sensor;
- I_{escala} - A escala de corrente que pode ser medida pelo sensor em Amperes.

Para a calibração do valor da frequência, leva-se em consideração o valor do *offset* do sinal de tensão. Após a medição, é necessário configurar o sinal de PWM do microcontrolador para que, após a filtragem, gere um sinal que corresponde ao *offset* do AMC1301. Para efetuar a conversão do sinal senoidal da tensão em um sinal de onda quadrada, é necessário um amplificador operacional.

Em seguida, o microcontrolador contabiliza o período da onda quadrada e o converte em frequência do sinal, conforme apresentado na seguinte fórmula:

$$f = \frac{1000000}{\Delta t}$$

Equação 9 - Fórmula de conversão do período em microssegundos para Hertz

sendo:

- f - Frequência medida em Hertz;
- Δt - período da onda quadrada em microssegundos.

3.4.2 Procedimentos de comparação dos valores de defasagem dos sinais

Para a calibração na medição de defasagem, é necessário levar em consideração os valores de *offset* do sinal de tensão e corrente, os quais devem corresponder aos sinais PWM filtrados gerados pelo microcontrolador. Isso facilita a conversão das ondas pelos amplificadores operacionais e auxilia na conversão do intervalo das ondas pela porta XOR. O intervalo do sinal de saída da porta XOR é contabilizado pelo microcontrolador e, em seguida, convertido no valor de defasagem.

Para realizar essa conversão, é necessário considerar o valor da frequência do sinal e a unidade de medida do ângulo desejado, conforme expresso na seguinte equação:

$$\varphi = \Delta t * 360 * f$$

Equação 10 - Cálculo do ângulo entre tensão e corrente

sendo:

- φ - Ângulo de defasagem entre tensão e corrente em graus;
- Δt - Intervalo de tempo entre as ondas quadradas de tensão e corrente em segundos;
- f - Frequência da rede em Hertz.

Para mensurar a defasagem dos valores de tensão e corrente, foram adotadas combinações de circuitos RL e RC, com cargas fixas presentes na bancada. Por meio desses arranjos, é realizada a comparação entre o valor teórico e os valores medidos tanto pela bancada quanto pelo protótipo.

3.4.3 Cálculo de valor eficaz dos sinais de corrente e tensão

Após os ajustes de calibração dos valores de tensão e corrente, é realizado o cálculo dos valores eficazes desses sinais no período parametrizado. Para o cálculo da tensão, adotou-se a seguinte fórmula:

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_1^n V_{[n]}^2}$$

Equação 11 - Fórmula de valor eficaz da tensão

sendo:

- V_{RMS} - valor eficaz da tensão em Volt;
- n - quantidade de amostras no período analisado;
- $V_{[n]}$ - Valor da tensão analisada após a sua conversão, em Volt.

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_1^n I_{[n]}^2}$$

Equação 12 - Fórmula de valor eficaz da corrente

sendo:

- I_{RMS} - valor eficaz da corrente em Amperes;
- n - quantidade de amostras no período analisado;
- $I_{[n]}$ - Valor da corrente analisada após a sua conversão, em Amperes.

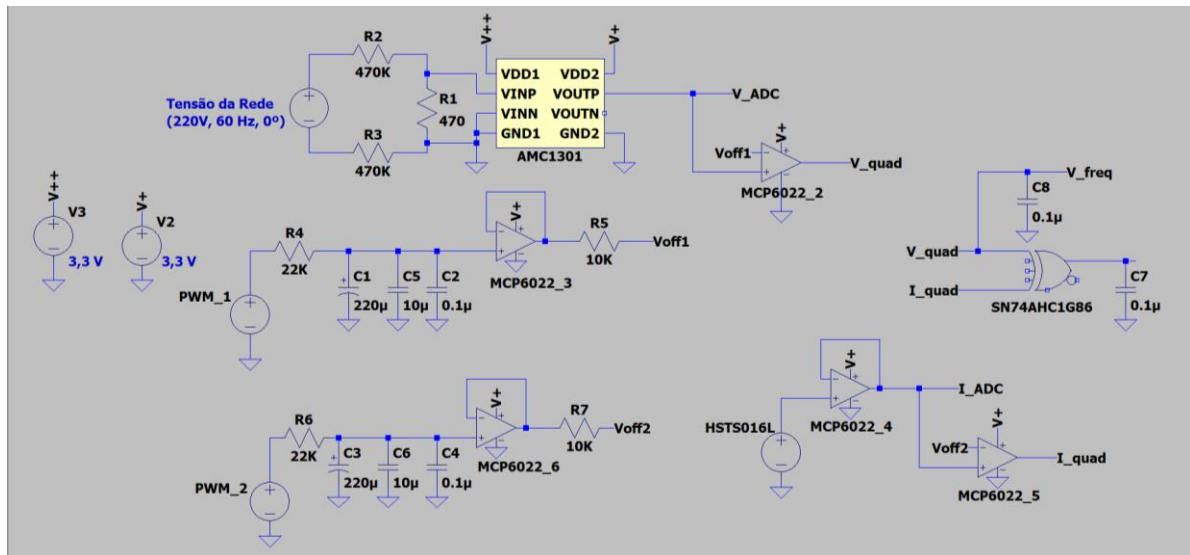
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultado das simulações dos circuitos

Os circuitos simulados foram executados no software LTSpice XVII (versão 17.0.36.0), criado pela Analog Devices, o qual é uma ferramenta de desenvolvimento de circuitos analógicos que permite a criação de esquemas e a apresentação de resultados por meio de gráficos. Na figura 18, é retratado todo o circuito desenvolvido para o protótipo.

Embora o software apresente vários componentes, é necessário inserir o AMC1301 por meio de uma biblioteca externa, enquanto os outros componentes não possuem bibliotecas compatíveis na ferramenta de desenvolvimento. Devido a esse obstáculo, os amplificadores operacionais foram parametrizados manualmente, utilizando dados retirados do datasheet do MCP6022.

Figura 18 - Circuito de condicionamento de sinais



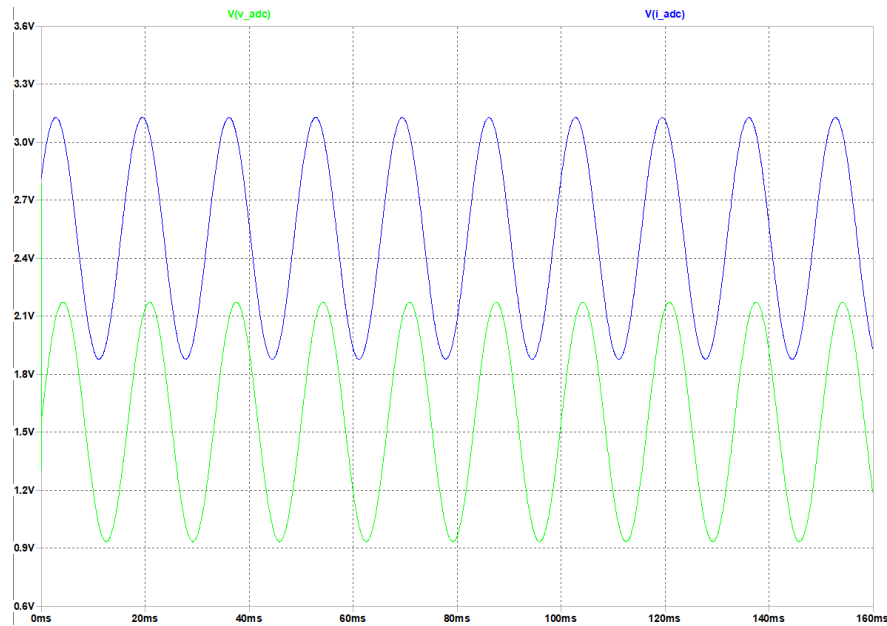
Fonte: Autor (2023).

4.1.1 Resultado do condicionamento de tensão e corrente

A simulação dos sinais que representam a corrente e tensão da rede não apresentou erros significativos, pois, como mencionado anteriormente, o sinal foi apenas passado por um buffer e, em seguida, inserido na entrada ADC do MCP3204.

A figura 19 mostra os resultados da simulação referentes à tensão da rede e à corrente.

Figura 19 - Resultado das simulações de tensão e corrente

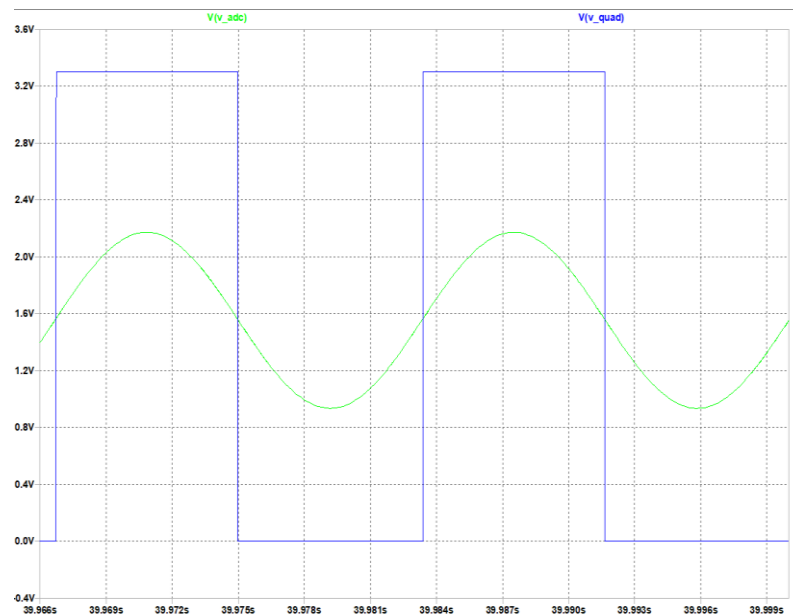


Fonte: Autor (2023).

4.1.2 Resultado dos sinais de frequência da rede

Para a conversão da onda por meio do circuito da figura 11, é necessário aguardar 40 segundos para que o controle de offset apresente o resultado esperado. Após esse tempo, é apresentada uma onda quadrada com uma frequência de 60,13 Hz, o que representa um erro relativo de 0,21%. A figura 20 apresenta o resultado da conversão da onda de tensão da rede.

Figura 20 - Resultado da simulação de conversão de onda



Fonte: Autor (2023).

4.1.3 Resultado do circuito de fator de potência

Na tabela 9, apresentam-se os resultados dos valores de defasagem entre a tensão e a corrente do circuito, após um período de espera de 40 segundos para o ajuste de offset dos sinais.

Tabela 9 - Resultados da simulação do circuito de medição da defasagem dos sinais

Ângulo Parametrizado	Resultado	Erro Relativo (%)
0°	0,972°	-
15°	16,04°	6,93
30°	30,76°	2,53
45°	45,68°	1,51
60°	60,76°	1,27
75°	75,69°	0,92
90°	90,68°	0,75

Fonte: Autor (2023).

Observa-se que não é possível calcular o primeiro valor do erro relativo, uma vez que o ângulo parametrizado é igual a zero. Após isso, é observado um desvio próximo a 0,7° em outros resultados de defasagem do sinal. Isso pode ocorrer devido às tolerâncias dos componentes e aos processos envolvidos na determinação dos valores medidos.

4.2 Resultado dos valores medidos pelo protótipo

4.2.1 Resultado dos valores da tensão da rede

Conforme exposto no capítulo 3.4 deste trabalho, realizaram-se testes para calibrar os valores oriundos do sensor. No software, foi alterado o valor fixo de ganho do amplificador isolador, uma vez que anteriormente havia sido adotado o valor de 8,2. Porém, após diversas comparações, observou-se que o valor aproximado que satisfaz à precisão da medição é de 8,13.

Após essa correção, é adotado, para o cálculo de valor eficaz da tensão (equação 11), que seja realizada a leitura de 12 ciclos do sinal de tensão, com 250 pontos por ciclo, o que atende aos critérios estabelecidos pelos módulos 5 e 8 do PRODIST. A seguir, na tabela 10 é apresentada a comparação dos valores de tensão eficaz medidos pela bancada da Festo e pelo protótipo.

Tabela 10 - Resultados de tensão eficaz entre a bancada e o protótipo

Valor da tensão RMS da bancada (V)	Valor da tensão RMS do protótipo (V)	Erro relativo (%)
128,86	128,71	0,12
128,56	128,6	0,03
128,25	128,22	0,02
128,05	128,31	0,20
127,47	127,35	0,09
126	126,15	0,12
126,33	126,63	0,24
125,67	124,88	0,63
125,44	125,5	0,05
125,32	124,16	0,93

Fonte: Autor (2023).

No geral, constata-se que o erro relativo das medições realizadas pelo protótipo apresentou valores abaixo de 1%. Dessa forma, pode-se afirmar que o protótipo apresenta uma precisão satisfatória.

4.2.2 Resultado dos valores da corrente do circuito

Inicialmente, foi aplicado ao condutor do circuito o procedimento de passar 6 voltas ao redor da entrada do sensor de efeito Hall (figura 21). Isso se deve ao fato da bancada possuir um amperímetro com escala de até 4 A, enquanto o sensor HSTS016L do protótipo permite medições de até 30 A. Ao condicionar o condutor a esse método, é possível obter uma melhora significativa nas medições de circuitos com correntes muito inferiores à escala do sensor, como é o caso da bancada.

Figura 21 - Condutor com 6 espiras na entrada do sensor de corrente

Fonte: Autor (2023).

Para a calibração do sensor, utiliza-se a medição com cargas resistivas da bancada. Seguindo os mesmos critérios adotados para a medição da tensão, realiza-se a leitura de 12 ciclos do sinal de corrente, com 250 pontos por período e calcula-se o valor eficaz da corrente por meio da equação 12. A seguir, na tabela 11, são apresentadas as leituras de valor eficaz da corrente obtidas tanto pela bancada quanto pelo protótipo.

Tabela 11 - Resultados da corrente eficaz entre a bancada e o protótipo

Valor da corrente RMS da bancada (A)	Valor da corrente RMS do protótipo (A)	Erro relativo (%)
0,11	0,11	0,00
0,21	0,21	0,00
0,32	0,32	0,00
0,53	0,52	1,89
0,74	0,73	1,35
0,95	0,94	1,05
1,37	1,36	0,73
1,79	1,77	1,12
2,21	2,2	0,45

Fonte: Autor (2023).

Os valores medidos pelo protótipo apresentaram erros relativos de até 1,89%, porém, de maneira geral, ele demonstra resultados satisfatórios na medição da corrente, considerando a divergência significativa entre as escalas do sensor de corrente do protótipo e do medidor da bancada.

4.2.3 Resultado dos valores da frequência da rede

Inicialmente, realiza-se o ajuste do sinal de PWM filtrado oriundo do microcontrolador. Para essa calibração, é necessário mensurar o offset do AMC1301. Assim, efetuou-se uma conexão na barra de pinos referente à alimentação externa da placa com uma fonte de bancada. Com isso, o sinal de offset do amplificador ficou em torno de 1,49 V. Dessa forma, o ajuste pode ser realizado pelo sinal filtrado, o qual é mensurado por uma das entradas do ADC externo do projeto, a fim de garantir uma melhor precisão nas medições.

O valor esperado nas medições gira em torno de 60 Hz, conforme o valor teórico. No entanto, medir simultaneamente pelo protótipo e pela bancada é uma tarefa difícil, pois o valor muda constantemente. Portanto, na tabela 12, são apresentadas as comparações entre o valor teórico da frequência e os valores medidos tanto pela bancada quanto pelo protótipo.

Tabela 12 - Resultados da frequência medida pela bancada e o protótipo

Valor teórico (Hz)	Valor da frequência medida na bancada (Hz)	Erro relativo da bancada em relação ao valor teórico (%)	Valor da frequência medida no protótipo (Hz)	Erro relativo do protótipo em relação ao valor teórico (%)
60	60,02	0,03	59,97	0,05
	59,95	0,08	59,94	0,10
	60,19	0,32	60,08	0,13
	59,83	0,28	60,03	0,05
	60,04	0,07	60,01	0,02

Fonte: Autor (2023).

No geral, constata-se que o erro relativo das medições realizadas pelo protótipo apresentou valores menores do que os erros relativos da bancada. Portanto, pode-se concluir que o protótipo superou a bancada nesse parâmetro.

4.2.4 Resultado dos valores da defasagem entre tensão e corrente

Após a calibração do PWM correspondente ao offset do sensor de tensão, é necessário calibrar o offset do sinal de corrente utilizando o sinal filtrado proveniente do microcontrolador.

Nesse caso, basta conectar o sensor ao bloco terminal da placa e mensurar o valor de saída do sensor de efeito Hall por meio do ADC externo, sem que esteja próximo a qualquer condutor do circuito. Dessa maneira, verificou-se que o valor gira em torno de 2,52 V. Após a medida, é necessário parametrizar o valor PWM para atender ao valor de offset do sensor.

Antes de apresentar os resultados após os ajustes, é importante levar em consideração que para as medições dos ângulos de defasagem foram realizadas as leituras de 12 ciclos do sinal. É válido ressaltar que os valores dos ângulos podem variar caso a corrente do circuito seja baixa. Além disso, é observado que o tipo de carga conectada ao circuito pode resultar em diferenças significativas nos resultados.

4.2.4.1 Cargas resistivas

Inicialmente, é realizada a conexão apenas com cargas resistivas, nas quais, teoricamente, o valor de defasagem é igual a zero. Todas as cargas adicionadas estão presentes nos módulos da bancada da Festo. De acordo com o fabricante, essas cargas apresentam uma tolerância de 5%. Para o procedimento, as cargas são adicionadas de forma progressiva em paralelo. A seguir, são apresentados na tabela 13 os valores de tensão, corrente, valor teórico de defasagem e os valores medidos tanto pela bancada quanto pelo protótipo.

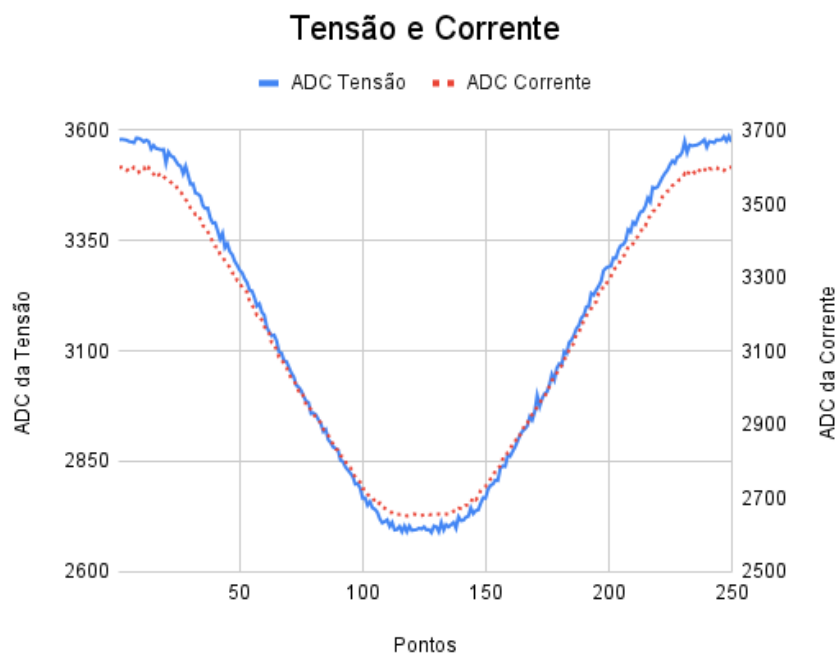
Tabela 13 - Comparativo entre a bancada e o protótipo em cargas resistivas

Valor da tensão RMS na bancada (V)	Valor da corrente RMS da bancada (A)	Valor teórico de defasagem	Valor da defasagem medida pela bancada (°)	Valor da defasagem medida pelo protótipo (°)
128,86	0,11	0°	0,22	6,58
128,56	0,21	0°	0,08	3,56
128,22	0,32	0°	0,05	2,27
127,99	0,53	0°	0,04	1,4
127,35	0,74	0°	0,06	1,14
126,9	0,95	0°	0,03	0,91
126,24	1,37	0°	0,04	0,67
125,71	1,79	0°	0,06	0,58
125,39	2,21	0°	0,03	0,54

Fonte: Autor (2023).

Neste caso, como o valor teórico da defasagem do sinal é igual a zero, não é possível calcular o erro relativo da bancada e do protótipo. É importante considerar que o aumento da amplitude do valor da corrente no circuito influencia positivamente na precisão do protótipo, uma vez que contribui na conversão da onda, que é necessária para a realização da medição. Na figura 22, são apresentados os registros das leituras de 250 pontos da tensão e da corrente na carga resistiva. Nesse caso, trata-se da medição com todas as cargas resistivas do módulo em paralelo. As curvas são plotadas com valores de escala vertical diferentes, visando aprimorar a visualização das mesmas.

Figura 22 - Gráfico de registro da tensão e corrente em carga resistiva



4.2.4.2 Cargas resistivas e indutivas

Após a conexão com todas as cargas resistivas, o procedimento prosseguiu com a inserção de cargas indutivas em paralelo de forma gradual, visando visualizar a mudança da fase da corrente de maneira progressiva. A seguir, na tabela 14, são apresentados os valores de tensão, corrente, valor de defasagem teórico e os valores medidos tanto pela bancada quanto pelo protótipo.

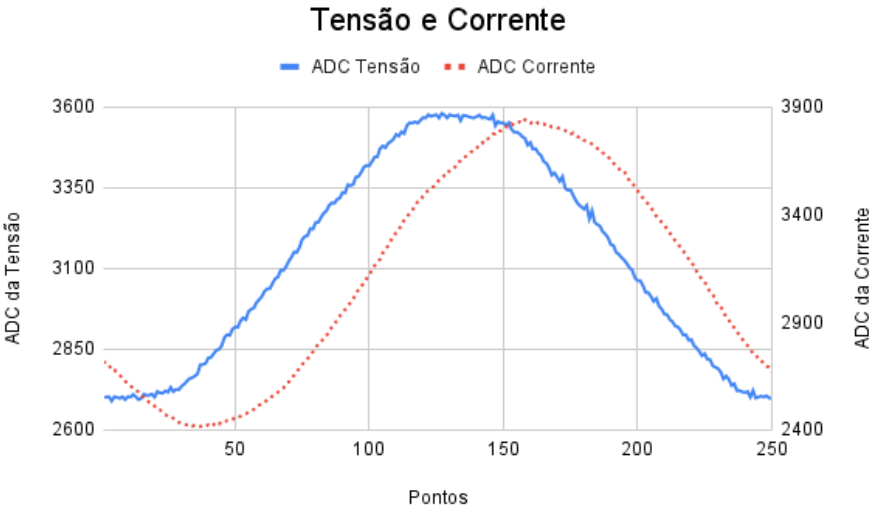
Tabela 14 - Comparativo entre o valor teórico e o valor medido pela bancada e pelo protótipo

Valor da tensão RMS na bancada (V)	Valor da corrente RMS da bancada (A)	Impedância (Ω)	Valor teórico de defasagem (°)	Valor da defasagem medida pela bancada (°)	Erro relativo da bancada em relação ao valor teórico (%)	Valor da defasagem medida pelo protótipo (°)	Erro relativo do protótipo em relação ao valor teórico (%)
125,35	2,22	$57,01 + j2,69$	2,71	2,69	0,7	2,94	8,5
125,44	2,23	$56,64 + j5,36$	5,41	5,47	1,1	5,66	4,6
125,5	2,26	$56,01 + j7,96$	8,09	8,11	0,2	8,23	1,7
125,67	2,32	$54,11 + j12,81$	13,32	13,15	1,3	13,81	3,7
125,53	2,39	$51,48 + j17,07$	18,35	18,12	1,3	18,79	2,4
125,35	2,48	$48,33 + j20,63$	23,12	22,74	1,6	23,56	1,9
124,86	2,69	$41,42 + j25,52$	31,64	30,57	3,4	31,55	0,3
124,62	2,93	$34,66 + j27,91$	38,84	37,14	4,4	38,18	1,7
124,66	3,16	$28,73 + j28,57$	44,84	42,69	4,8	43,33	3,4

Fonte: Autor (2023).

Os valores medidos pelo protótipo apresentaram erros relativos de até 8,5%, porém, de maneira geral, ele apresenta resultados satisfatórios com o aumento da defasagem do sinal. Conforme observado na tabela 14, quando os valores são superiores a 30°, o protótipo exibe erros relativos menores em comparação com os erros da bancada.

Figura 23 - Gráfico de registro da tensão e corrente em carga resistiva e indutiva



Fonte: Autor (2023).

A figura 23 apresenta o registro das leituras de 250 pontos da tensão e da corrente no circuito composto por cargas resistivas e indutivas. Nessa condição, a medição é realizada com todas as cargas resistivas e indutivas dos módulos em paralelo. As curvas exibem valores de escala vertical distintos, com o objetivo de melhorar a visualização das mesmas.

4.2.4.3 Cargas resistivas e capacitivas

Assim como o procedimento realizado para as cargas indutivas, neste caso também foram mantidas as cargas resistivas. No entanto, o procedimento continuou de forma progressiva com a adição de cargas capacitivas em paralelo ao circuito. Para fins de comparação, são apresentados na tabela 15 os valores de tensão, corrente, valor de defasagem teórico e os valores medidos tanto pela bancada quanto pelo protótipo.

Tabela 15 - Comparativo entre o valor teórico e o valor medido pela bancada e pelo protótipo

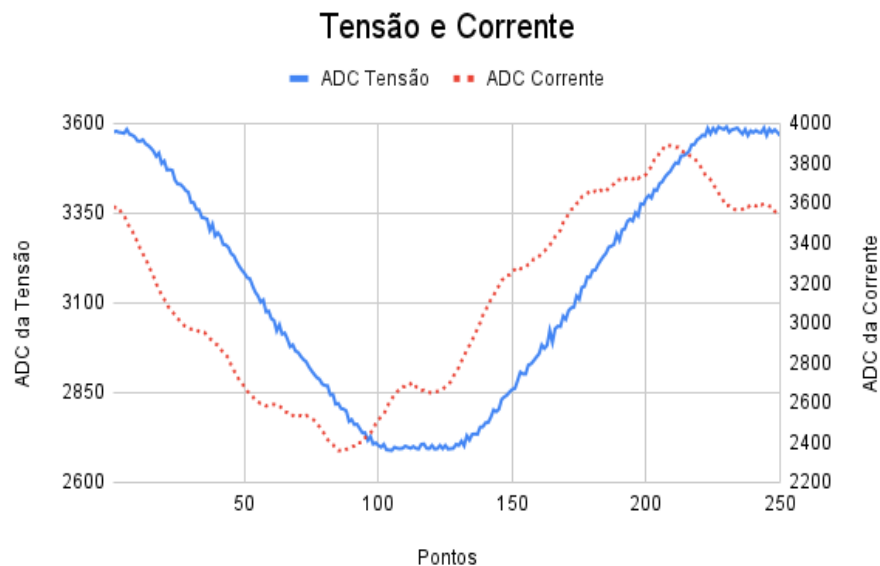
Valor da tensão RMS na bancada (V)	Valor da corrente RMS da bancada (A)	Impedância (Ω)	Valor teórico de defasagem (°)	Valor da defasagem medida pela bancada (°)	Erro relativo da bancada em relação ao valor teórico (%)	Valor da defasagem medida pelo protótipo (°)	Erro relativo do protótipo em relação ao valor teórico (%)
125,52	2,21	57,01 -j2,7	2,71	2,66	1,8	2,42	10,7
125,61	2,22	56,64 -j5,37	5,41	5,35	1,1	5,6	3,5
125,74	2,23	56,01 -j7,96	8,09	8,03	0,7	7,97	1,5
125,91	2,27	54,1 -j12,82	13,33	13,2	1,0	13,02	2,3
126,02	2,33	51,48 -j17,08	18,35	18,14	1,1	16,95	7,6
126,18	2,41	48,35 -j20,62	23,10	22,73	1,6	21,91	5,2
126,35	2,6	41,42 -j25,52	31,64	31,11	1,7	32,1	1,5
126,44	2,84	34,65 -j27,92	38,86	38,23	1,6	43,88	12,9
126,59	3,04	28,71 -j28,57	44,86	44,45	0,9	49,26	9,8

Fonte: Autor (2023).

A principal distinção com o aumento das cargas capacitivas é que estas causaram uma distorção na forma de onda da corrente, próxima ao valor de *offset* do sinal, resultando no aumento do erro relativo pelo protótipo.

Na figura a seguir, é retratado o registro de 250 pontos das formas de onda da tensão e da corrente após a adição de todas as cargas capacitivas e resistivas dos módulos da bancada.

Figura 24 - Gráfico de registro da tensão e corrente em carga resistiva e capacitiva



Fonte: Autor (2023).

Na figura 24, observa-se uma considerável distorção no sinal da corrente. Tal distorção é resultado das características das cargas capacitivas presentes no circuito, as quais não apenas deslocam a fase do sinal, mas também causam a distorção da amplitude da corrente.

4.3 Custo de fabricação do protótipo

Para verificar o preço do protótipo, na tabela 16 são listados os custos de produção da PCB e dos componentes que integram a placa. É importante considerar que os preços listados não incluem o valor do frete e estão referenciados no primeiro semestre de 2023. Portanto, avaliações futuras podem apresentar custos diferentes dos listados.

Tabela 16 - Orçamento do protótipo

Descrição do componente	Quantidade	Preço unitário (BRL)	Preço parcial (BRL)	Proporção (%)
Fabricação da Placa-PCBWay	1	25,44	25,44	9,97
Case ABS 125x80x32mm	1	11,41	11,41	4,47
ESP32-S3 WROOM	1	21,19	21,19	8,30
ADC externo MCP3204-BI/P	1	45,9	45,9	17,99
AmpOp MCP6022 I/SN	3	1,05	3,15	1,23
Porta XOR SN74AHC1G86	1	0,66	0,66	0,26
Conversor CC isolado B0303S-1WR3	1	8,41	8,41	3,30
AmpOp Isolado AMC1301	1	20,37	20,37	7,98
Sensor de corrente HSTS016L	1	81,26	81,26	31,85
Regulador de tensão AMS1117-3.3	1	0,32	0,32	0,13
Fonte chaveada Hi-link HLK-PM01	1	9,23	9,23	3,62
Bloco conector terminal 3 vias 5.08mm	2	1,01	2,02	0,79
Fusível PPTC 600 V - 160 mA	2	0,65	1,3	0,51
Varistor S20K460	3	2,64	7,92	3,10
Adaptador microSD	1	0,33	0,33	0,13
Diodo Transorb SMBJ6.0A	2	0,25	0,5	0,20
Capacitor SMD 1206 10uF	6	0,05	0,3	0,12
Capacitor SMD 1206 0.1 uF	13	0,05	0,65	0,25

Descrição do componente	Quantidade	Preço unitário (BRL)	Preço parcial (BRL)	Proporção (%)
Capacitor SMD 1206 47 uF	1	0,05	0,05	0,02
Capacitor SMD 1206 4.7 uF	1	0,05	0,05	0,02
Resistor SMD 1206 470K (1%)	2	0,03	0,06	0,02
Resistor SMD 1206 470R (1%)	1	0,03	0,03	0,01
Capacitor SMD 1206 2.2 uF	3	0,05	0,15	0,06
Resistor SMD 1206 10K (1%)	7	0,03	0,21	0,08
Resistor SMD 1206 1K (1%)	2	0,03	0,06	0,02
Capacitor SMD 1206 1 uF	3	0,05	0,15	0,06
Resistor SMD 1206 330R (1%)	1	0,03	0,03	0,01
Resistor SMD 1206 220R (1%)	1	0,03	0,03	0,01
Capacitor SMD 1206 4.7 nF	2	0,05	0,1	0,04
Capacitor Tântalo SMD 7343 220 uF	2	5,51	11,02	4,32
Resistor SMD 1206 0R (1%)	4	0,03	0,12	0,05
Resistor SMD 1206 22K (1%)	2	0,03	0,06	0,02
Capacitor SMD 1206 10 nF	3	0,05	0,15	0,06
Capacitor SMD 1206 10 pF	1	0,05	0,05	0,02
LED 5mm	2	0,24	0,48	0,19
Barra de pinos 2.54 mm	1	1,5	1,5	0,59
Button 4 terminais	2	0,25	0,5	0,20
Protótipo	-	-	255,16	100

Fonte: Aliexpress (2023), Mercado Livre (2023), Baú da eletrônica (2023), PCBWay (2023).

É importante considerar que os preços listados na tabela 16 são referentes aos preços unitários dos componentes, os quais podem ser reduzidos quando adquiridos em maior quantidade. Além disso, os preços são referenciados em diferentes empresas, incluindo tanto lojas nacionais quanto internacionais.

Para a execução do protótipo, nem sempre foram considerados os preços mais baixos dos componentes, em função dos prazos de entrega para realização do trabalho dentro do cronograma estabelecido.

Outro ponto a ser considerado é que foram contabilizados apenas os valores de aquisição dos componentes para fabricação do protótipo, sem levar em consideração o tempo de desenvolvimento.

Ao comparar o valor do protótipo com os analisadores de energia mencionados anteriormente, é evidente a diferença de custo de aquisição entre eles, mesmo avaliando apenas o preço de venda, sem considerar o custo de desenvolvimento. A seguir, na tabela 17, é apresentado o custo de aquisição dos analisadores de energia comerciais:

Tabela 17 - Custo de aquisição dos analisadores de energia

Analisador de Energia	Fabricante	Loja / Vendedor	Custo de aquisição (R\$)	Proporção (un)
1732 - Energy Logger	Fluke	Rio Link	35.499,00	139
ET-5062	Minipa	Mercado Livre	38.888,81	152
BlackBox G4500	Elspec	Power Meter Store	69.768,00	273

Fonte: Rio Link (2023), Mercado Livre (2023), Power Meter Store (2023).

O custo dos analisadores de energia comerciais difere bastante em relação ao protótipo devido aos conjuntos de parâmetros que podem ser medidos nesses equipamentos, além dos que são medidos pelo protótipo. Também, a forma de apresentação dos dados pode variar, desde a exibição por meio da interface do equipamento até a entrega dos dados por meio do software fornecido pelo fabricante.

Para as medições de tensão, corrente, frequência e ângulo de defasagem, o protótipo apresenta resultados satisfatórios, o que, considerando o custo de fabricação do mesmo, o torna bastante atrativo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Medições e Verificação do funcionamento do protótipo

Os resultados da operação do protótipo demonstram que ele possui a capacidade de medir tensão, corrente, frequência e o ângulo de defasagem em regime permanente de circuitos monofásicos. No entanto, ao contrário de equipamentos de medição de qualidade de energia disponíveis no mercado, é necessário melhorar os tratamentos dos dados, seja por meio de componentes eletrônicos ou software.

Outro ponto a considerar é o método de apresentação das amostras, uma vez que os registros estão sendo armazenados em um cartão microSD. Após as leituras, o protótipo deve ser desconectado da carga ou circuito para que os dados possam ser consultados e analisados posteriormente, o que dificulta a visualização em tempo real. No entanto, caso seja necessário, uma opção viável é utilizar a comunicação serial da placa com o computador, embora essa abordagem requer um espaço adequado para a visualização. Outra alternativa a ser considerada é a aplicação de protocolos wireless, como Bluetooth ou WiFi, disponíveis no microcontrolador.

Apesar do protótipo apresentar os dados apenas por meio de um cartão microSD, ele proporciona informações precisas sobre tensão, corrente e frequência da rede. Isso possibilita a análise de anomalias nos circuitos, como variações de tensão em regime permanente e mudanças no valor da frequência. Além disso, auxilia no cálculo da distorção de onda e harmônicas presentes na instalação, caso seja necessário. Porém, o circuito de defasagem do sinal apresenta erros que devem ser corrigidos. É possível melhorar essa questão através da implementação de filtros, ajuste de offset no circuito ou até mesmo através de uma implementação por software, como curvas de correção ou cálculo da defasagem com base nos pontos registrados na forma de onda.

5.2 Propostas e sugestões para trabalhos futuros

5.2.1 Técnicas e meios de medição

Este trabalho levou em consideração os módulos 8 e 5 do PRODIST. Uma sugestão seria estudar outras normas, tanto nacionais quanto internacionais, no que se refere à medição de fenômenos e anomalias presentes nas instalações.

Outro ponto a ser considerado é permitir realizar medições configuradas pelo usuário, independentemente de normas.

5.2.2 Sugestões de melhoria no protótipo

No que se refere ao protótipo, podem ser adotadas as seguintes sugestões de melhorias para aprimorar a apresentação de dados, desempenho e recursos:

- Melhorar a precisão das leituras de defasagem dos sinais, seja por meio de melhorias do circuito ou implementação no firmware do microcontrolador;
- Desenvolver um relatório da qualidade dos parâmetros abordados, atendendo todos os critérios dos módulos 5 e 8 do PRODIST;
- Desenvolver uma ferramenta de interface gráfica com o usuário, que pode variar desde um Web Server gerado a partir do microcontrolador até um dashboard completo desenvolvido em um servidor na nuvem;
- Incorporar tecnologias de transmissão de dados remotos utilizando protocolos padrões de internet, como HTTP e MQTT ou tecnologias de radiofrequência como a tecnologia Lora®;
- Integrar um módulo ou bateria ao protótipo, para casos em que a fonte chaveada não esteja alimentada, possibilitando a medição de corrente ou o registro de interrupções.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACENDE BRASIL. **Qualidade do fornecimento de energia elétrica:** confiabilidade, conformidade e presteza. Acende Brasil, 2014. Disponível em: https://acendebrasil.com.br/wp-content/uploads/2020/04/2014_WhitePaperAcendeBrasil_14_Qualidade_Fornecimento_Energia_Rev_0.pdf. Acesso em: 25/09/2022.

AMARAL, P.H.B.; OLIVEIRA, E.R.P. **PROTÓTIPO DE MEDIDOR DE BAIXO CUSTO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DA TENSÃO EM REGIME PERMANENTE.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2021.

ANALOG DEVICES. **LTspice Simulator.** Analog Devices, 2023. Disponível em: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>. Acesso em: 13/02/2023

ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 956/2021. **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: 16/09/ 2022.

ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 956/2021. **PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST:** Módulo 5 - Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura, 2021. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_4.pdf Acesso em: 20/09/ 2022.

ARDUINO. **Arduino® UNO R3.** Arduino CC, 2022. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf> Acesso em: 07/ 09/ 2022.

ELETROGATE. **Uno R3 + Cabo USB para Arduino.** Eletrogate, 2023. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/uno-r3-cabo-usb-para-arduino>. Acesso em: 06/01/2023.

ESPRESSIF. **ESP32-S3**: Technical Reference Manual. Espressif, 2023. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_technical_reference_manual_en.pdf. Acesso em: 21/01/2023.

ESPRESSIF. **ESP32-S3-WROOM-1**: Datasheet. Espressif, 2023. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3-wroom-1_wroom-1u_datasheet_en.pdf. Acesso em: 20/01/2023.

FLUKE. **Energy Loggers Elétrico Trifásico Fluke 1732 e 1734**. Fluke, 2022. Disponível em: <https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/analísadores-da-qualidade-de-energia/1732-1734>. Acesso em: 06/10/ 2022.

FESTO. **LabVolt Series - Data Acquisition and Control Interface**: 9063. Festo Didactic Inc, 2023. Disponível em: https://labvolt.festo.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-9063-0X_data_acquisition_and_control_interface Acesso em: 05/05/2023.

FESTO. **Sistema de aprendizagem de transmissão de energia CA LabVolt Series**: 8010-B. Festo Brasil Ltda, 2023. Disponível em: https://www.festo.com/br/pt/p/sistema-de-aprendizagem-de-transmissao-de-energia-ca-id_PROD_DID_579320/?page=0 Acesso em: 04/05/2023.

KRON. **KRON Medidores**: Qualidade de Energia Elétrica. Kron, 2015. Disponível em: https://kron.com.br/wp-content/uploads/2020/03/02_kron_catalogo_QEE_2015_otimizado.pdf Acesso em: 06/ 10/ 2022.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Qualidade na Energia Elétrica**: Efeitos dos distúrbios, diagnósticos e soluções. Ed. 2, São Paulo: Artliber Editora, 2013.

MERCADO LIVRE. **Analísador De Energia Trifásico- Cat IV - Minipa- Et-5062**. Mercado Livre, 2023. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2935213679-analisador-de-energia-trifasico-cat-iv-minipa-et-5062-_JM. Acesso em: 31/05/2023.

MERCADO LIVRE. **Nodemcu Esp32 S3**. Mercado Livre, 2023. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2614085487-nodemcu-esp32-s3-esp-wifi-bluetooth-5-ai-0492-_JM. Acesso em: 10/01/2023.

MICROCHIP. **MCP3204**: 12 bit, 100 kSPS, 4-Channel ADC. Microchip, [s.d]. Disponível em: <https://www.microchip.com/en-us/product/MCP3204>. Acesso em: 06/03/2023

MICROCHIP. **MCP3204/3208**: Datasheet. Microchip, 2008. Disponível em: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/APID/ProductDocuments/DataSheets/21298e.pdf>. Acesso em: 05/03/2023

MICROCHIP. **MCP6021/1R/2/3/4**: Datasheet. Microchip, 2017. Disponível em: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/APID/ProductDocuments/DataSheets/20001685E.pdf>. Acesso em: 23/01/2023.

MINIPA. **ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA ET-5062**. Minipa, 2022. Disponível em: http://www.minipa.com.br/images/Manual/ET-5062-1103-BR_manual.pdf. Acesso em: 06/ 10/ 2022.

MORNSUN. **DC/DC Converter**: Datasheet. Mornsun, 2018. Disponível em: <https://www.mornsun-power.com/html/pdf/B0303S-1WR2.html>. Acesso em: 20/10/2022.

PAULILO, Gilson. **Qualidade de energia**: Capítulo 1 - Conceitos gerais sobre qualidade da energia. O Setor Elétrico, 2013. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/02/Ed84_fasc_qualidade_energia_cap1.pdf. Acesso em: 29/10/2022.

PITI, Art. **Measure Small Signals Riding on High Voltages, and Avoid Sensor Ground Loops**. Digi-Key Electronics, 2018. Disponível em: <https://www.digikey.com.br/pt/articles/measure-small-signals-riding-on-high-voltages-avoid-sensor-ground-loops>. Acesso em: 27/12/2022.

POWER METER STORE. **Elspec G4500 BlackBox**. PowerMeterStore.com, 2023.

Disponível em:

<https://www.powermeterstore.com/p11834/elspec-portable-g4500-blackbox-power-quality-analyzer>. Acesso em: 31/05/2023.

RIO LINK. **FLUKE 1732- Registrador de Energia Elétrico Trifásico**. Rio Link, 2023.

Disponível em:

<https://www.riolink.com.br/eletrica/analizador-de-energia/fluke-1732-registrador-de-energia-eletrico-trifasico>. Acesso em: 31/05/2023.

SARAVATI. **Placa ESP32-S3 WROOM-1 N16R8**. Saravati, 2023. Disponível em:

<https://www.saravati.com.br/placa-esp32-s3-wroom-1-n16r8-wifi-bluetooth-dual-usb-c.html>. Acesso em: 10/01/2023.

TEXAS INSTRUMENTS. **AMC1301 Precision**: Datasheet. Texas Instruments, 2020.

Disponível em:

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/amc1301.pdf>. Acesso em: 16/08/ 2022.

TEXAS INSTRUMENTS. **SN74AHC1G86**: Datasheet. Texas Instruments, 2014.

Disponível em:

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74ahc1g86.pdf>. Acesso em: 15/11/2022.

YHDC. **Hall split core current sensor**: Datasheet. YHDC, s.d. Disponível em:

https://en.yhdc.com/product_detail.html?productId=103. Acesso em: 07/11/2022.

APÊNDICE

Apêndice A - Código desenvolvido para o protótipo.

```

/*
  INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
  TOCANTINS - CAMPUS PALMAS
  Firmware desenvolvido para o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado:
  PROTÓTIPO PARA AUXÍLIO EM ANÁLISE DOS FATORES DE QUALIDADE
  DE ENERGIA

  Criado em 27 de dezembro de 2022
  Última modificação em 23 de maio de 2023

  Autor do código:
  MATHAUSS DE OLIVEIRA CARVALHO

*/
#include <WiFi.h>
#include "time.h"
#include "FS.h"
#include "SD.h"
#include "SPI.h"

#if CONFIG_IDF_TARGET_ESP32S2 || CONFIG_IDF_TARGET_ESP32S3
#define VSPI FSPI
#endif

/*----Definições----*/

//Frequência
int Htime;
int Ltime;
float Ttime;
float frequencia;
float frequencia_conv;
float frequencia_MAX=0;
float frequencia_MIN=0;

//Valores RMS
float V_RMS;
float I_RMS;
float V_conv;
float I_conv;
float soma=0;

//Fator de potência
float angle_max;
float angle_conv;

```

```

float angle;
float pf;

int a=0;
int V [3000];
int I [3000];
int valor,valor2;
String Datashow;
int save,save2;

// WiFi e NTP
const char* ssid      = "SSID";
const char* password  = "PASSWORD";
const char* ntpServer = "pool.ntp.org";
const long  gmtoffset_sec = -10800;
const int   daylightOffset_sec = 0;

int salvar=0;
int segundo;
int minuto;
int hora;
int dia;
int mes;
int ano;
bool envio=false;
int mandar;

SPIClass Adc = SPIClass(VSPI);
SPIClass spi = SPIClass(HSPI);

void listDir(fs::FS &fs, const char * dirname, uint8_t levels){
    Serial.printf("Listagem do diretório: %s\n", dirname);

    File root = fs.open(dirname);
    if(!root){
        Serial.println("Falha ao abrir o diretório");
        return;
    }
    if(!root.isDirectory()){
        Serial.println("Não é um diretório");
        return;
    }

    File file = root.openNextFile();
    while(file){
        if(file.isDirectory()){
            Serial.print("  DIR : ");
            Serial.println(file.name());
            if(levels){

```

```

        listDir(fs, file.path(), levels -1);
    }
} else {
    Serial.print(" ARQUIVO: ");
    Serial.print(file.name());
    Serial.print(" TAMANHO: ");
    Serial.println(file.size());
}
file = root.openNextFile();
}
}

void createDir(fs::FS &fs, const char * path){
    Serial.printf("Criando diretorio: %s\n", path);
    if(fs.mkdir(path)){
        Serial.println("Diretório criado");
    } else {
        Serial.println("Falha na criação do diretório");
    }
}

void writeFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message){
    Serial.printf("Gravando o arquivo: %s\n", path);

    File file = fs.open(path, FILE_WRITE);
    if(!file){
        Serial.println("Falha ao abrir o arquivo para gravação");
        return;
    }
    if(file.print(message)){
        Serial.println("Arquivo escrito");
    } else {
        Serial.println("Falha na gravação");
    }
    file.close();
}

void appendFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message){
    Serial.printf("Anexando ao arquivo: %s\n", path);

    File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
    if(!file){
        Serial.println("Falha ao abrir arquivo para anexar");
        return;
    }
    if(file.print(message)){
        Serial.println("Mensagem anexada");
    } else {
        Serial.println("Falha ao anexar");
    }
}

```

```

    }
    file.close();
}

void testFileIO(fs::FS &fs, const char * path){
    File file = fs.open(path);
    static uint8_t buf[512];
    size_t len = 0;
    uint32_t start = millis();
    uint32_t end = start;
    if(file){
        len = file.size();
        size_t flen = len;
        start = millis();
        while(len){
            size_t toRead = len;
            if(toRead > 512){
                toRead = 512;
            }
            file.read(buf, toRead);
            len -= toRead;
        }
        end = millis() - start;
        Serial.printf("%u bytes lidos em %u ms\n", flen, end);
        file.close();
    } else {
        Serial.println("Falha ao abrir arquivo para leitura");
    }

    file = fs.open(path, FILE_WRITE);
    if(!file){
        Serial.println("Falha ao abrir arquivo para gravação");
        return;
    }

    size_t i;
    start = millis();
    for(i=0; i<2048; i++){
        file.write(buf, 512);
    }
    end = millis() - start;
    Serial.printf("%u bytes escritos em %u ms\n", 2048 * 512, end);
    file.close();
}

void printLocalTime(){
    struct tm timeinfo;
    if(!getLocalTime(&timeinfo)){

```

```

    Serial.println("Falha ao obter o tempo");
    return;
}
Serial.println(&timeinfo, "%A, %B %d %Y %H:%M:%S");
segundo = timeinfo.tm_sec;
minuto = timeinfo.tm_min;
hora = timeinfo.tm_hour;
dia = timeinfo.tm_mday;
mes = timeinfo.tm_mon;
ano = timeinfo.tm_year;
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    pinMode(21, OUTPUT); // LED DE AVISO

    pinMode(9, INPUT);
    pinMode(13, INPUT);
    pinMode(7, OUTPUT);

    pinMode(10, OUTPUT); // OFFSET da Tensão
    ledcAttachPin(10, 0);
    ledcSetup(0, 1000, 12);

    pinMode(12, OUTPUT); // OFFSET da Corrente
    ledcAttachPin(12, 1);
    ledcSetup(1, 1000, 12);
    delay(10);
    ledcWrite(0, 1858); //1849 -----1,49 V
    ledcWrite(1, 3133); //3103 -----2,5 V
    delay(20000);

    Serial.printf("Conectando a %s ", ssid); //
    WiFi.begin(ssid, password);
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
    Serial.println("CONECTADO!");
    configTime(gmtOffset_sec, daylightOffset_sec, ntpServer);
    printLocalTime();

    // Inicia o Cartão MicroSD
    spi.begin(39, 38, 40, 41);
    if(!SD.begin(41, spi, 80000000)){
        Serial.println("Falha na conexão com o cartão");
        return;
    }
}

```

```

uint8_t cardType = SD.cardType();

if(cardType == CARD_NONE){
    Serial.println("Nenhum cartão SD conectado");
    return;
}

Serial.print("Tipo de cartão SD: ");
if(cardType == CARD_MMC){
    Serial.println("MMC");
} else if(cardType == CARD_SD){
    Serial.println("SDSC");
} else if(cardType == CARD_SDHC){
    Serial.println("SDHC");
} else {
    Serial.println("Desconhecido");
}

uint64_t cardSize = SD.cardSize() / (1024 * 1024);
Serial.printf("Tamanho do cartão SD: %lluMB\n", cardSize);
Serial.printf("Espaço total: %lluMB\n", SD.totalBytes() / (1024 * 1024));
Serial.printf("Espaço ocupado: %lluMB\n", SD.usedBytes() / (1024 * 1024));

File file = SD.open("/DATACOM.txt");
if(!file) {
    Serial.println("Arquivo não encontrado!");
    Serial.println("Criando arquivo...");
    writeFile(SD, "/DATACOM.txt", "-----DATALOGGER-----
\r\n");
}
else {
    Serial.println("Arquivo DATACOM.txt já existe!");
}
file.close();
File file2 = SD.open("/DATACOM_RMS.txt");
if(!file2) {
    Serial.println("Arquivo não encontrado!");
    Serial.println("Criando arquivo...");
    writeFile(SD, "/DATACOM_RMS.txt", "-----DATALOGGER-----
---\r\n");
}
else {
    Serial.println("Arquivo DATACOM_RMS.txt já existe!");
}
file.close();
digitalWrite(7, HIGH);
Adc.begin(4,5,6);
Adc.beginTransaction(SPISettings(1080000, MSBFIRST, SPI_MODE0));
}

```

```

void loop() {
digitalWrite(21, HIGH);
for(a=0;a<3000; a++){
valor= readAdc(0);
V [a]=valor;
valor2= readAdc(1);
I [a]=valor2;
delay(1/15);
}

printLocalTime();
if((segundo - salvar >=15) || (segundo - salvar== -45)){
mandar = (segundo%15);
envio=true;}
else{envio=false;}

if(mandar==0 && envio==true){
a=0;
Datashow = String(hora) + ":" + String(minuto) + ":" + String(segundo) + "\r\n";
appendFile(SD, "/DATACOM.txt", Datashow.c_str());
appendFile(SD, "/DATACOM.txt", "-----tensao-----\r\n");
delay(1/60);
for(a=0;a<250;a++){
save=V [a]+1279;
Datashow = String(save) + "\r\n";
appendFile(SD, "/DATACOM.txt", Datashow.c_str());
delay(1/60);
}
appendFile(SD, "/DATACOM.txt", "-----fim da tensão-----\r\n");
delay(1/60);
appendFile(SD, "/DATACOM.txt", "-----corrente-----\r\n");
for(a=0;a<250;a++){
save2=I [a];
Datashow = String(save2) + "\r\n";
appendFile(SD, "/DATACOM.txt", Datashow.c_str());
delay(1/60);
}
appendFile(SD, "/DATACOM.txt", "-----fim da corrente-----\r\n");

// frequencia da tensão
frequencia_MAX=0;
frequencia_MIN=0;
for(a=0;a<14;a++){
Htime=pulseIn(9,HIGH);
Ltime=pulseIn(9,LOW);
Ttime = Htime + Ltime;
if(Ttime !=0){
frequencia=1000000/Ttime;
}
}
}

```

```

if(frequencia < 100){
    frequencia_conv = frequencia;
    if(frequencia_conv > frequencia_MAX){frequencia_MAX = frequencia_conv;}
    if(frequencia_MIN==0){frequencia_MIN = frequencia_conv;}
    else if(frequencia_conv < frequencia_MIN){frequencia_MIN = frequencia_conv;}
}
}
delay(16);
}
Serial.print("Frequencia da rede: ");
Serial.println(frequencia_conv);
/*
Serial.print("freq. Max: ");
Serial.println(frequencia_MAX);
Serial.print("freq. Min: ");
Serial.println(frequencia_MIN);*/

//Tensão RMS
V_conv=0;
soma=0;
for(a=0;a<3000;a++){
    V_conv = V [a];
    soma = soma + pow((((V_conv - 1849) * (3.3/4096))/8.13)*(1880000/470)), 2.0);
}
V_RMS = sqrt(soma/3000);
Serial.println(V_RMS);
delay(1);

//Corrente RMS
I_conv=0;
soma=0;
for(a=0;a<3000;a++){
    I_conv = I [a];
    soma = soma + pow((((I_conv - 3128)*(3.3/4096))/6)*(30/0.625)), 2.0);
}
I_RMS = sqrt(soma/3000);
Serial.println(I_RMS);
delay(1);

// Angulo de defasagem
angle_max=0;
for (a=0; a<12;a++){
    angle = (((pulseIn(13,HIGH))*(1 * pow (10,-6)))*(360)*(frequencia_conv));
    if(angle > angle_max){
        angle_max = angle;
    }
}
delay(17);
}

```

```

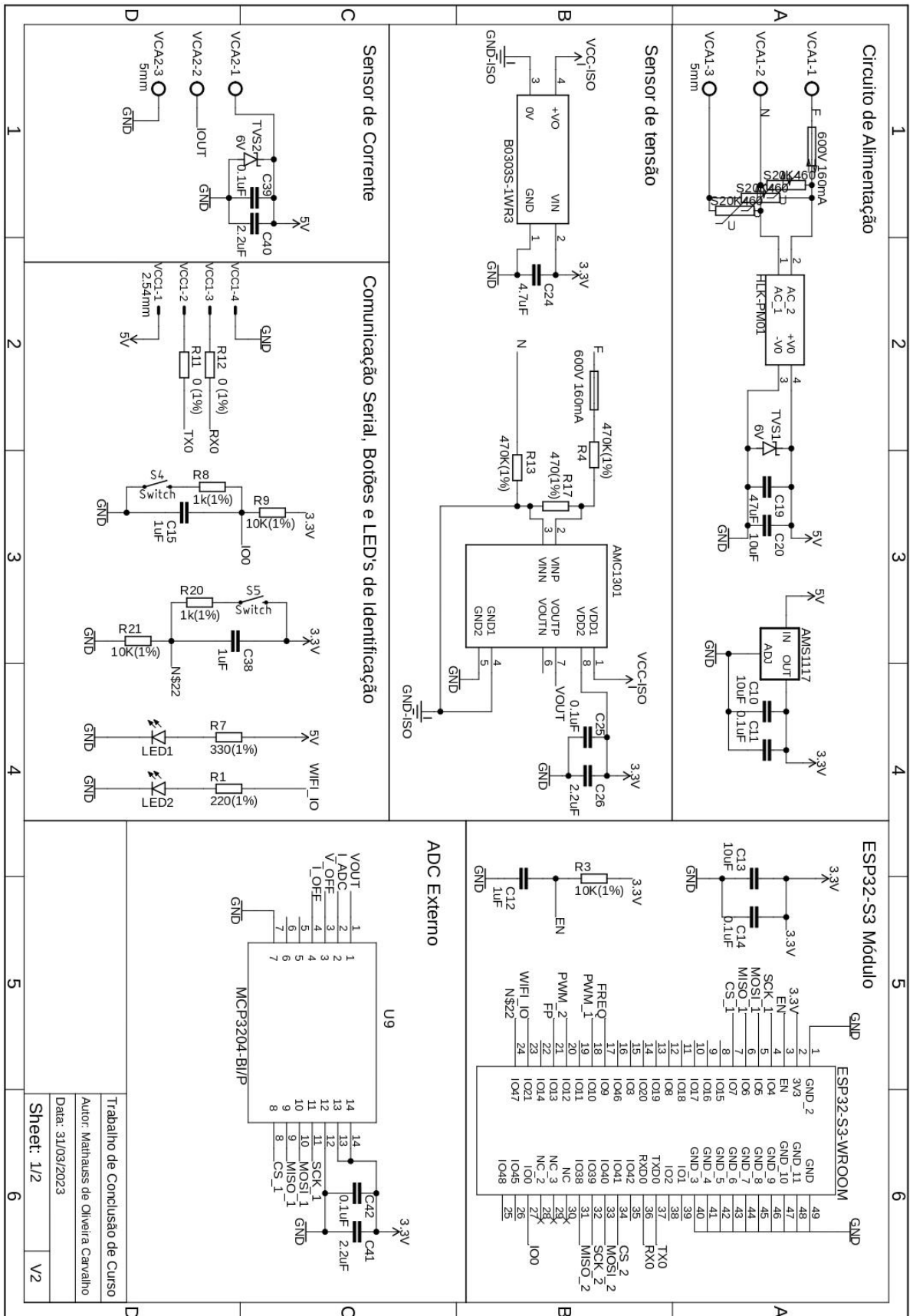
angle_conv = ((angle_max));
Serial.println(angle_conv);
delay(1000);

salvar=segundo;
Datashow = "Hora de leitura      Tensão RMS      Corrente RMS
Frequencia      Ângulo de defasagem\r\n";
appendFile(SD, "/DATACOM_RMS.txt", Datashow.c_str());
delay(1/60);
Datashow = String(hora) + ":" + String(minuto) + ":" + String(segundo) + "  " +
String(V_RMS) + " " + String(I_RMS) + " " + String(frequencia_conv) + "
" + String(angle_conv) + "\r\n";
appendFile(SD, "/DATACOM_RMS.txt", Datashow.c_str());
delay(1/60);
appendFile(SD, "/DATACOM.txt", "-----
\r\n");
appendFile(SD, "/DATACOM_RMS.txt", "-----
-----\r\n");
}
digitalWrite(21, LOW);
delay(75);
}

float readAdc(int canal) {
    byte adcPrimaryRegister = 0b000000110;
    byte adcPrimaryRegisterMask = 0b000000111;
    byte adcPrimaryByteMask = 0b000001111;
    byte adcPrimaryConfig = adcPrimaryRegister & adcPrimaryRegisterMask;
    byte adcSecondaryConfig = canal << 6;
    digitalWrite(7, LOW);
    Adc.transfer(adcPrimaryConfig);
    byte adcPrimaryByte = Adc.transfer(adcSecondaryConfig);
    byte adcSecondaryByte = Adc.transfer(0x00);
    digitalWrite(7, HIGH);
    adcPrimaryByte &= adcPrimaryByteMask;
    int digitalValor = (adcPrimaryByte << 8) | adcSecondaryByte;
    return digitalValor;
}

```

Apêndice B - Arquivo esquemático da placa desenvolvido para o protótipo



Apêndice C - Resultado das amostras armazenadas nos arquivos .txt

-----DATALOGGER-----

16:15:30

-----tensao-----

2965

2975

2982

2999

2990

3023

3008

3031

3054

3063

3070

...

2964

2989

2998

-----fim da tensão-----

-----corrente-----

3128

3128

3119

3132

3123

...

3127

3121

3127

3123

-----fim da corrente-----

-----DATALOGGER-----

Hora de leitura de defasagem	Tensão RMS	Corrente RMS	Frequencia	Ângulo
---------------------------------	------------	--------------	------------	--------

16:15:30	128.08	0.03	60.03	179.32
----------	--------	------	-------	--------

Hora de leitura de defasagem	Tensão RMS	Corrente RMS	Frequencia	Ângulo
---------------------------------	------------	--------------	------------	--------

16:15:45	129.63	0.03	60.01	179.51
----------	--------	------	-------	--------

Hora de leitura de defasagem	Tensão RMS	Corrente RMS	Frequencia	Ângulo
---------------------------------	------------	--------------	------------	--------

16:16:0	129.72	0.03	60.00	179.68
---------	--------	------	-------	--------

Hora de leitura de defasagem	Tensão RMS	Corrente RMS	Frequencia	Ângulo
---------------------------------	------------	--------------	------------	--------

16:16:15	128.37	0.11	59.98	10.56
----------	--------	------	-------	-------

...

Hora de leitura de defasagem	Tensão RMS	Corrente RMS	Frequencia	Ângulo
---------------------------------	------------	--------------	------------	--------

16:48:0	124.59	3.19	60.01	43.18
---------	--------	------	-------	-------

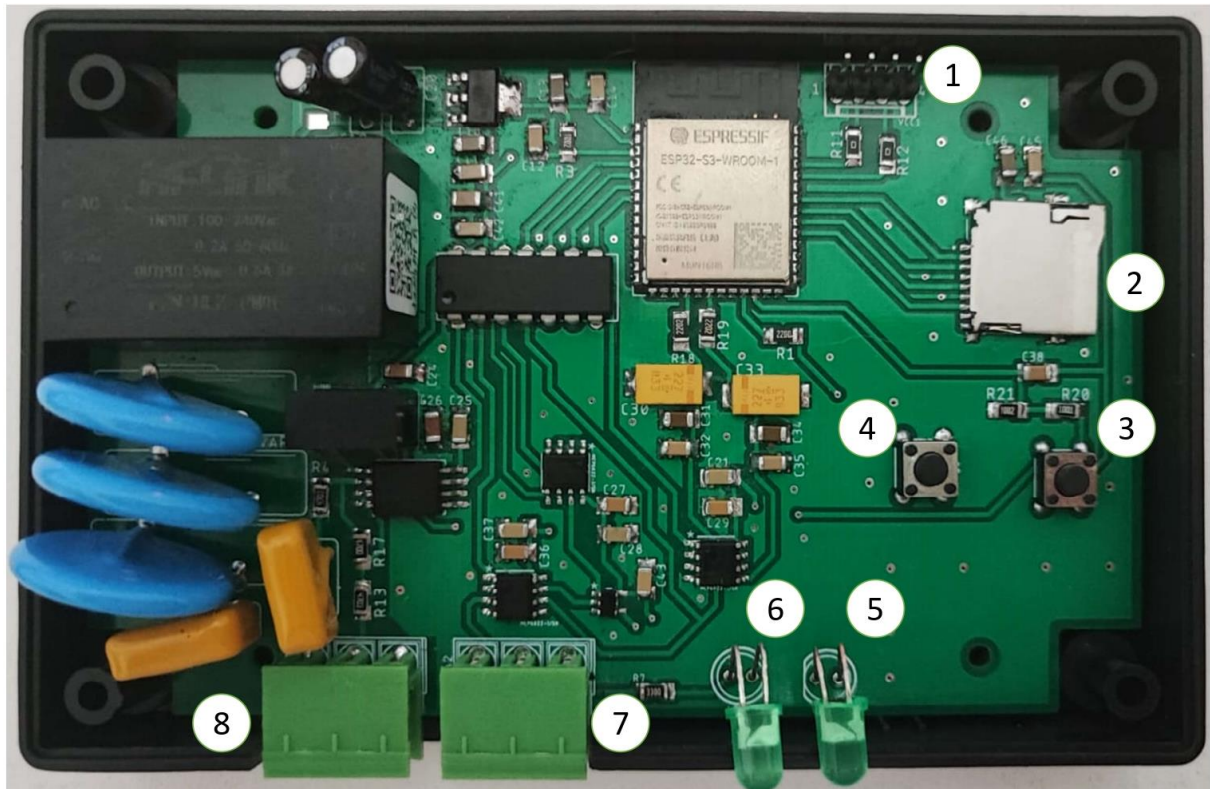
Hora de leitura de defasagem	Tensão RMS	Corrente RMS	Frequencia	Ângulo
---------------------------------	------------	--------------	------------	--------

16:48:15	124.25	3.22	60.01	43.21
----------	--------	------	-------	-------

Hora de leitura de defasagem	Tensão RMS	Corrente RMS	Frequencia	Ângulo
---------------------------------	------------	--------------	------------	--------

16:48:30	124.26	2.18	60.01	0.67
----------	--------	------	-------	------

Apêndice D - Manual de uso do protótipo.



Descrição dos componentes presentes na placa do protótipo:

- 1) Barra de pinos de comunicação serial (5V-TX-RX-GND);
- 2) Entrada para cartão microSD de até 32GB.
- 3) Botão sobressalente para uso futuro.
- 4) Botão para permitir o upload do software no microcontrolador.
- 5) Led de aviso, se estiver verde indica que as leituras estão sendo efetuadas corretamente.
- 6) Led de aviso, se estiver verde indica que o protótipo está ligado.
- 7) Bloco terminal de conexão do sensor de corrente.
- 8) Bloco terminal de conexão com a rede monofásica.

Parametrização da rede Wi-Fi no protótipo:

No início do firmware, presente no Apêndice A - Código desenvolvido para o protótipo, no tópico “WiFi e NTP”, é necessário realizar a substituição nas variáveis “ssid” e “password” pelo nome e senha da rede, respectivamente.

Upload do firmware no protótipo:

Para realizar o upload no protótipo, é necessário pressionar o botão (4) enquanto a placa ainda estiver desligada. Após ligar o protótipo, solte o botão (4) e faça o upload do firmware. Após concluir o upload, basta desligar e religar o protótipo para que ele esteja com a versão mais atualizada do software.

Formatação do cartão microSD:

Para que o protótipo possa armazenar todas as leituras, é necessário que o cartão microSD seja inserido na entrada (2) já formatado no sistema de arquivos FAT32.

Método de instalação do protótipo:

- Parametrizar a rede Wi-Fi no firmware do programa.
- Realizar o upload das configurações da rede no protótipo, utilizando um conversor serial na barra de pinos (1);
- Conectar o cartão microSD na entrada (2);
- Conectar o sensor de corrente no bloco terminal (7);
- Instalar o sensor de corrente no condutor fase do circuito, com o sentido correto, indicada pela parte inferior do sensor;
- Conectar os cabos na seguinte ordem: fase, neutro e terra, no conector macho do bloco terminal da tensão, no sentido da esquerda para a direita;
- Inserir o conector macho no bloco terminal da tensão (8);
- Conectar os cabos nos respectivos pontos da instalação ou da carga que se deseja medir.
- Ligar a energia elétrica da instalação ou da carga.

**Cuidados de uso:**

- Manusear o protótipo com cuidado quando estiver conectado à rede.
- Nunca remover o cartão microSD enquanto o protótipo ainda estiver sendo alimentado pela tensão da rede.