



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

**Projeto de um sistema para medição de
consumo e análise da qualidade da energia
elétrica para sistemas monofásicos**

Anatércia Pinto Coelho

João Monlevade, MG
2020

Anatércia Pinto Coelho

**Projeto de um sistema para medição de
consumo e análise da qualidade da energia
elétrica para sistemas monofásicos**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.
Orientador: Prof.^o Marcelo Moreira Tiago

**Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2020**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C672p Coelho, Anatercia Pinto .

Projeto de um sistema para medição de consumo e análise da qualidade da energia elétrica para sistemas monofásicos. [manuscrito] / Anatercia Pinto Coelho. - 2020.

59 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Energia elétrica - Consumo. 2. Instrumentos de medição. 3. Processamento de sinais - Técnicas digitais. 4. Energia elétrica - Controle da qualidade total. I. Tiago, Marcelo Moreira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.31

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA

**FOLHA DE APROVAÇÃO****Anatércia Pinto Coelho****PROJETO DE UM SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE CONSUMO E ANÁLISE DA QUALIDADE
DA ENERGIA ELÉTRICA PARA SISTEMAS MONOFÁSICOS**

Membros da banca

Igor Dias Neto de Souza - Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto
Juan Carlos Galvis Manso - Doutorado - Universidade Federal de Ouro Preto
Marcelo Moreira Tiago - Doutorado - Universidade Federal de Ouro Preto

Versão final

Aprovado em 15 de outubro de 2020.

De acordo

Marcelo Moreira Tiago



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Moreira Tiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/10/2020, às 18:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0097150** e o código CRC **CD0A1837**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.008211/2020-30

SEI nº 0097150

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: - www.ufop.br

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Geraldo e Vilma por terem me ensinado a viver com dignidade, lutar pelos meus sonhos e por todo o amor incondicional que me deram.

Agradeço a minha avó Jacirema que acreditou e ajudou na minha formação.

Agradeço ao Romeu por todo apoio, paciência, dedicação e carinho.

Agradeço à minha irmã Wilma e seu companheiro Lucas pelo apoio e incentivo que me foram dados.

Agradeço aos amigos que me apoiaram, me deram força e conselhos e que apesar da distância se fizeram presentes. Também agradeço aos amigos que a UFOP me deu e que estiveram ao meu lado durante esse percurso.

Agradeço aos Mestres que se fizeram fundamentais para minha formação, em especial ao Prof. Marcelo por toda a dedicação e orientação dada este trabalho e por sua compreensão durante o mesmo.

"So the problem is not so much to see what nobody has yet seen, as to think what nobody has yet thought concerning that which everybody sees."
– Arthur Schopenhauer

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo monofásico que monitora o consumo de energia total e os parâmetros elétricos referentes à qualidade de energia elétrica. O sistema desenvolvido realiza medições de forma não invasiva e é capaz de adquirir e processar os sinais elétricos em tempo real utilizando o microcontrolador ESP8266. Os dados adquiridos por este sistema são armazenados em nuvem e exibidos através de uma aplicação para *Android* e *iOS*. Além disso, por questões de segurança, uma cópia dos sinais adquiridos é mantida em um cartão de memória. A aplicação utilizada é personalizável e permite controlar remotamente o *software* embarcado, bem como visualizar as informações processadas pelo sistema embarcado. O equipamento apresentado neste trabalho mede tensões de até 127 V, correntes de até 30 A e possui uma largura de banda de 540 Hz. Além disso, o instrumento pode ser usado para medir potência ativa, potência reativa, potência aparente, fator de potência, tensão e corrente eficazes, além da taxa de distorção harmônica total para corrente e tensão. O sistema proposto analisa as 9 primeiras harmônicas de um sinal com frequência fundamental de 60 Hz, e utiliza o algoritmo de Goertzel para estimar os valores de magnitude e fase para cada harmônica. Os resultados obtidos mostram que o equipamento é capaz de medir tensões e correntes com resoluções de 147,7 mV e 24,42 mA, respectivamente.

Palavras-chave: *Data logger*, instrumento de medição, processamento digital de sinais, qualidade de energia, taxa de distorção harmônica.

Abstract

This work presents the development of a single-phase prototype that monitors the total energy consumption and the electrical parameters related to the quality of electric power. The developed system performs measurements in a non-invasive way and is able to acquire and process the electrical signals in real time using the ESP8266 microcontroller. The data acquired by this system is stored in a cloud and displayed through an application for Android and iOS. In addition, for security reasons, a copy of the acquired signals is kept on a memory card. The application used is customizable and allows remote control of the embedded software, as well as viewing the information processed by the embedded system. The equipment is able to measure voltages up to 127V, currents up to 30A and has a bandwidth of 540 Hz. Furthermore, the instrument can be used to measure active power, reactive power, apparent power, power factor, effective voltage and current, besides the total harmonic distortion rate for current and voltage. The proposed system analyzes the first 9 harmonics of a signal with a fundamental frequency of 60 Hz and uses Goertzel's algorithm to estimate the magnitude and phase values for each harmonic. The results show that the instrument is able to measure voltages and currents with resolution of 147,7 mV and 24,42 mA, respectively.

Keywords: Data logger, measuring instrument, digital signal processing, power quality, harmonic distortion rate.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sequência Periódica $\tilde{x}[n]$	11
Figura 2 – Dualidade entre os domínios do Tempo e Frequência da TDF.	12
Figura 3 – Representação de um Sistema Utilizado para Realizar a Análise Espectral de um Sinal.	13
Figura 4 – Diagrama de Fluxo do Cálculo Recursivo Complexo de Primeira Ordem de $X[k]$	15
Figura 5 – Diagrama de Fluxo do Cálculo Recursivo de Segunda Ordem de $X[k]$ (Algoritmo de Goertzel).	16
Figura 6 – SCT-013.	20
Figura 7 – Circuito Utilizado para os Testes de Resposta em Frequência do SCT013.	21
Figura 8 – Transformador.	22
Figura 9 – Circuito Utilizado para os Testes de Resposta em Frequência do Transformador.	23
Figura 10 – Módulo NodeMCU ESP-12E.	24
Figura 11 – Diagrama de Aquisição do Sinal de Corrente.	26
Figura 12 – Circuito de Ajuste de Referência.	27
Figura 13 – Diagrama de Aquisição do Sinal de Tensão.	28
Figura 14 – Circuito de Proteção para Transientes.	30
Figura 15 – Circuito de Conexão do MCP3208.	31
Figura 16 – Circuito do Cartão de Memória.	32
Figura 17 – Circuito de Conexão do Relógio.	32
Figura 18 – Circuito ESP.	32
Figura 19 – Placa de Circuito Impresso.	33
Figura 20 – Arquitetura <i>Blynk</i>	34
Figura 21 – Interface do Supervisório.	35
Figura 22 – Ensaio para Carga de $0,1 \Omega$ a Frequência de 60 Hz.	39
Figura 23 – Espectro de Magnitude para o sensor SCT-013 considerando $Rt = 0,1 \Omega$	40
Figura 24 – Fase Espectral para o sensor SCT-013 considerando $Rt = 0,1 \Omega$	40
Figura 25 – Espectro de Magnitude para o sensor SCT-013 considerando $Rt = 10 \Omega$	41
Figura 26 – Fase Espectral para o sensor SCT-013 considerando $Rt = 10 \Omega$	41
Figura 27 – Espectro de Magnitude para o sensor SCT-013 considerando $Rt = 100 \Omega$	42
Figura 28 – Fase Espectral para o sensor SCT-013 considerando $Rt = 100 \Omega$	42
Figura 29 – Ensaio com Transformador a Frequência de 60 Hz 127 V.	44
Figura 30 – Espectro de Magnitude para o transformador, considerando $V = 127 V$	44
Figura 31 – Fase Espectral para o transformador, considerando $V = 127 V$	45
Figura 32 – Espectro de Magnitude para o transformador, considerando $V = 220 V$	45

Figura 33 – Fase Espectral para o transformador, considerando $V = 220 V$	46
Figura 34 – Tensão e Corrente - Ensaio com a Furadeira.	47
Figura 35 – Espectro de Magnitude para o Sinal de Corrente.	48
Figura 36 – Espectro de Magnitude para o Sinal de Tensão.	48
Figura 37 – Harmônicas Ímpares de Corrente - Ensaio com a Furadeira.	50
Figura 38 – Harmônicas Ímpares de Corrente - Ensaio com a Furadeira.	50

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características dos Principais Analisadores Disponíveis no Mercado. . .	4
Tabela 2 – Análise comparativa entre os resultados obtidos a partir da análise dos sinais adquiridos pelo osciloscópio e pelo medidor.	49
Tabela 3 – Comparativo das Características dos Analisadores.	51

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AD	Analógico/Digital
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
COVID-19	do inglês <i>Coronavirus Disease 2019</i>
DHT_v	Distorção Harmônica Total de Tensão
DHT_i	Distorção Harmônica Total de Corrente
EUA	Estados Unidos da América
FAT 32	do inglês <i>File Allocation Table</i>
FeAD	Fundo de Escala Digital
FFT	Transformada Rápida de Fourier, do inglês <i>Fast Fourier Transform</i>
FP	Fator de potência
FPGA	do inglês <i>Field Programmable Gate Array</i>
GPIO	do inglês <i>General Purpose Input/Output</i>
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado, do inglês <i>Integrated Development Environment</i>
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IP	do inglês <i>Internet Protocol Address</i>
IOS	Sistema Operacional Apple, do inglês <i>iPhone Operation System</i>
I2C	do inglês <i>Inter-Integrated Circuit</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P	Potência ativa
PIB	Produto Interno Bruto

PIC	do inglês <i>Programmable Interrupt Controller</i>
PWM	Modulação por largura de pulso, do inglês <i>Pulse-Width Modulation</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
Q	Potência reativa
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RAM	Memória de acesso randômico, do inglês <i>Random Access Memory</i>
RISC	do inglês <i>Reduced Instruction Set Computer</i>
S	Potência aparente
SD	do inglês <i>Secure Digital Card</i>
SOIC	do inglês <i>Small Outline Integrated Circuit</i>
SPI	do inglês <i>Serial Peripheral Interface</i>
TC	Transformador de Corrente
TCP	do inglês <i>Transmission Control Protocol</i>
TDF	Transformada Discreta de Fourier
THD	Distorção harmônica total, do inglês <i>Total Harmonic Distortion</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo	2
1.2	Revisão da Literatura	2
1.3	Estrutura do Trabalho	5
2	REVISÃO TEÓRICA	6
2.1	Recomendações e Procedimentos	6
2.1.1	IEEE-519/2014	6
2.1.2	PRODIST Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica	6
2.1.3	Cálculo das Potências Ativa, Reativa e Aparente	7
2.1.4	Fator de Potência	8
2.1.5	Frequências Harmônicas	9
2.1.6	Índices de Distorção de Sinais	9
2.2	Processamento Digital de Sinais	10
2.2.1	Transformada Discreta de Fourier	10
2.2.2	Análise Espectral	13
2.2.3	Algoritmo de Goertzel	13
2.3	Instrumentação	16
2.3.1	Terminologia	17
3	METODOLOGIA	19
3.1	Sensor de Corrente	19
3.2	Sensor de Tensão	21
3.3	Microcontrolador ESP8266	23
3.4	Conversor Analógico Digital MCP3208	25
3.5	Projeto do circuito	26
3.6	Sistema Supervisório	33
3.7	Processamento dos Sinais Adquiridos	35
3.7.1	Aquisição dos sinais	36
3.7.2	Cálculo das Potências e Taxa de Distorção Harmônica	36
3.7.3	Tratamento dos Dados Adquiridos	36
3.8	Procedimento Experimental	37
4	RESULTADOS	38
4.1	Testes de Resposta em Frequência dos Sensores	38
4.1.1	Sensor SCT-013	38

4.1.2	Transformador	43
4.2	Validação do Sistema	46
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
5.1	Propostas para trabalhos futuros	53
	REFERÊNCIAS	55
A	APÊNDICE A - CIRCUITO DESENVOLVIDO	58

1 Introdução

O aumento do consumo de energia elétrica pode ser considerado um indicador de uma sociedade desenvolvida economicamente, e o consumo elevado significa que os setores industrial e comercial estão em expansão e a população aumentou seu poder aquisitivo (ANEEL, 2008). No entanto, diante do cenário atual a economia está sofrendo grande impacto com a pandemia do novo coronavírus (COVID-19). No primeiro trimestre de 2020 o PIB brasileiro teve uma queda de 1,5%, ressaltando que no último mês do primeiro trimestre, foi implementado a política de isolamento social (ONS, 2020).

O novo coronavírus provocou grandes mudanças nos hábitos e no modo de vida da população, dentre eles destacam-se o *home-office*, fechamento de indústrias, escolas, shoppings, comércio e restaurantes. Com todas essas mudanças o perfil de consumo energético sofreu grande impacto, ao final do mês de maio de 2020, registrou queda de 11,0%, ligada diretamente às mudanças nos setores industrial e comercial. Já a classe residencial registrou aumento de 0,3% (ONS, 2020; STIMA, 2020).

Com a adesão de mudanças nas jornadas de trabalho para o *home-office*, muitas empresas poderão optar por continuar com seus colaboradores em casa mesmo após a estabilização dos casos de COVID-19. Considerando o atual cenário, o ONS (Operador Nacional de Sistema Elétrico) realizou uma revisão sobre as previsões de cargas quadrimestral entre o período de 2020 à 2024. Essas previsões consideram um aumento de consumo de 1,9% ao ano para as indústrias, 1,7% ao ano para o comércio e 3% ao ano para a classe residencial (ONS, 2020).

Pensando na reconfiguração de carga durante e após a pandemia, a tendência é que o setor residencial tenha um aumento no consumo de eletrônicos, eletrodomésticos e outros equipamentos que podem ser considerados cargas sensíveis a perturbações nos parâmetros da rede elétrica. Portanto, as concessionárias e órgãos normalizadores devem ter uma crescente preocupação com a qualidade e com o consumo de energia elétrica, investindo em pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias, além de políticas de conscientização do consumo.

Esses pontos motivaram o desenvolvimento deste trabalho, cujo objetivo é apresentar as etapas de projeto de um sistema de medição de qualidade de energia elétrica monofásico de baixo custo. Nessa análise, o sistema de medição é definido como um conjunto de dispositivos (sensores, circuitos, modelos matemáticos, *software*, etc.) cujo objetivo é fornecer informação sobre o valor da grandeza física que se deseja medir (AGUIRRE, 2013).

Desta maneira, a decisão de alterar ou não um processo deve sempre se basear em dados e fatos, sendo crucial garantir que os dados tenham precisão e sejam um retrato correto da realidade. Para isso, é fundamental entender o processo de desenvolvimento

de instrumento de medição, que envolve a seleção de módulos adequados, calibração do sistema, estimativas de incerteza, análises da possibilidade de erros e suas possíveis propagações, além da classificação do instrumento quanto à precisão e exatidão (AGUIRRE, 2013).

1.1 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um protótipo de medidor/analizador, de qualidade de energia elétrica de baixo custo, voltado ao monitoramento de sistemas monofásicos.

Os objetivos específicos são:

- Monitorar a demanda consumida e indicadores de QEE (Qualidade de Energia Elétrica) em tempo real através de aplicação para *smartphone* (tensão máxima 127 V, corrente máxima 30 A);
- Armazenar informações em base de dados na nuvem e cartão de memória para análise *offline*;
- Desenvolver uma metodologia para quantificar e classificar os distúrbios de QEE baseado em ferramentas matemáticas de análise (análise espectral, algoritmo de Gortzel);
- Determinar os índices de distorção harmônica total e individual, de tensão e corrente.

1.2 Revisão da Literatura

O aumento do consumo da energia elétrica nos últimos anos, somado à reconfiguração do perfil de carga no presente momento e ao aumento do consumo devido a utilização de produtos eletrônicos (considerados cargas sensíveis a perturbações), demonstram um crescente interesse por esse tema.

Back (2012) desenvolveu um sistema embarcado para monitoramento da energia elétrica em processos industriais. Esse sistema é capaz de analisar as perturbações elétricas, além de registrar o consumo de energia elétrica nos processos de produção, possibilitando assim traçar a curva de demanda de uma empresa. O dispositivo desenvolvido utiliza tecnologias de baixo custo, como microcontroladores dsPIC e plataformas *Friendly ARM MINI2440*. Ao longo do trabalho, o dsPIC30F foi utilizado como plataforma de aquisição, por possuir um conversor AD (analógico/digital) com resolução de 12 bits, 4 canais de entrada e frequência de amostragem de até 40 MHz. A análise dos dados adquiridos foi feita de forma *offline* através de duas aplicações, uma utilizando o software MatLab e

outra para rodar no dispositivo embarcado. Para detectar as perturbações elétricas, o autor utilizou a Transformada Wavelet Discreta.

Já no trabalho apresentado por Bacaru (2014) foi desenvolvido um medidor de energia residencial capaz de monitorar o consumo de energia total e os parâmetros elétricos necessários para a discriminação de consumo de energia por aparelho. O módulo desenvolvido é capaz de calcular a tensão e corrente eficazes, as potências ativa e reativa, o fator de potência e os componentes harmônicos ímpares do sinal de corrente e também conta com uma interface de comunicação que permita o envio em tempo real dos parâmetros calculados para o módulo de processamento (computador PC mini-ITX). O algoritmo desenvolvido é executado pelo *software LabVIEW* e é capaz de identificar cargas, calcular consumos instantâneos e é responsável por prover a interface com o usuário. Os módulos medidores trabalham com microcontroladores (*Texas Instruments MSP430AFE253*), e utilizam conversores AD de 16 bits, com frequências de amostragem de até 12 MHz. Nesta aplicação foram utilizados dois conversores AD independentes para amostragem simultânea dos sinais de tensão e corrente.

Duarte (2015) deu continuidade ao sistema desenvolvido por Bacaru (2014), identificando o consumo energético por aparelho a partir de uma medição centralizada através de técnicas de conjuntos nebulosos. O sistema era capaz de informar o consumo energético das principais cargas elétricas na residências monofásicas em unidades consumidoras de baixa tensão, e a técnica de desagregação do consumo foi implementada em sistemas microcontrolados. O sistema monitora potência ativa e as cinco primeiras harmônicas ímpares da corrente elétrica como notação das assinaturas de cargas, sendo a secessão das cargas discriminadas através de técnicas de conjuntos nebulosos.

O trabalho apresentado por Xavier (2016) descreve as etapas de desenvolvimento de uma plataforma de medição utilizando o *hardware CompactRIO 9075 da National Instruments* e o *software LabVIEW*, capaz de monitorar e detectar perturbações que possam ocorrer no sistema de energia. O monitoramento dos harmônicos do sistema foi realizado através da transformada rápida de Fourier (FFT), e a transformada Wavelet foi utilizada para detecção das variações de tensão de curta duração (VTCD's). O sistema registrava qualquer evento ou variação de curta duração ou uma violação nos limites de conteúdo harmônico. A plataforma também armazenava todo o sinal no domínio do tempo de forma contínua para utilização posterior. Na etapa de pós processamento, os sinais adquiridos podem ser utilizados e o usuário pode escolher quantos ciclos pré e/ou pós distúrbio deseja reconstruir para a sua análise.

Arenas (2019) descreve as etapas de desenvolvimento de um equipamento de medição de parâmetros de qualidade de energia elétrica que utiliza como plataforma de processamento um FPGA (do inglês, *Field-programmable gate array*) (Xilinx, modelo CLG484). O dispositivo desenvolvido possui funcionalidades que o caracterizam como inteligente, pois é capaz de medir o consumo de energia, registrar dados em um tempo

configurável e comunicar-se de forma bidirecional com o centro de controle de medição. A grande vantagem de se utilizar um FPGA é que as tarefas de processamento podem ser realizadas em altas frequências e de forma paralela, entretanto, o custo desse tipo de dispositivo é bem maior do que o de um microcontrolador. Um *software* foi utilizado para monitorar os parâmetros obtidos através do medidor em tempo real. No trabalho, apenas o setor lógico programável foi utilizado para os cálculos de potência e controle de periféricos. A utilização de um filtro *Notch* e deslocadores de fase adaptativos permitiu a extração das componentes fundamentais e sequência positiva.

No mercado, existem diversos sistemas de monitoramento de qualidade de energia elétrica disponíveis, com funções, objetivos e custos diferentes. Todos os equipamentos de monitoramento comerciais devem seguir as definições do manual PRODIST (2018) módulo 8. Equipamentos de fabricantes diferentes instalados num mesmo sistema devem apresentar resultados com uma diferença aceitável (XAVIER, 2016).

A Tabela 1 apresenta alguns analisadores de qualidade da energia dos principais fabricantes encontrados no mercado.

Tabela 1 – Características dos Principais Analisadores Disponíveis no Mercado.

	FLUKE 435 Série II	PQUBE 3	Kit DMI T5T
Equipamento:			
Trifásico	sim	sim	sim
Faixa de medição de tensão	1 até 1000V	0 até 900 V	1V até 440V
Faixa de medição de corrente	0,5A até 6000A	1A até 6000A	1A até 200A
Acurácia	5%	0,2%	1%
Taxa de amostragem	500 amostras por ciclo	512 amostras por ciclo	15 mil amostras por segundo
Conversor analógico	16 bits	16 bits	Não fornecido pelo fabricante
Capacidade de identificar harmônicos h	até a 50ª ordem	até a 50ª ordem	até a 31ª ordem
Calcula a distorção harmônica total de tensão e corrente	sim	sim	sim
Outros indicadores de qualidade da energia	Afundamentos, flutuações de tensão e desequilíbrios de tensão	Sobretensões, afundamentos, interrupções, variações de frequência, impulsos de alta frequências	Flutuações de tensão
Cartão de Memória	sim	não informado pelo fabricante	sim
Comunicação Ethernet	sim	sim	sim
Fonte	(FLUKE, 2018)	(PSL, 2018)	(ISSO, 2018)

Fonte: Elaborada pela Autora.

Pode-se observar que o medidor PQUBE 3 apresenta a melhor acurácia dentre os medidores. Quanto à capacidade de identificar harmônicas e faixa de operação, o Kit DMI

T5T mostrou-se inferior em comparação aos demais. Em uma avaliação geral o medidor PQUBE 3 apresenta melhores especificações dentre os medidores avaliados.

Considerando que o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um protótipo monofásico, a faixa de medição para as grandezas de tensão e corrente pode ser menor, de acordo com o perfil residencial. Esse fator foi levado em consideração durante a escolha dos sensores para medição de tensão e corrente utilizados neste trabalho. As etapas de projeto e calibração do sistema de medição desenvolvido são descritas nas próximas seções.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma revisão bibliográfica, bem como a motivação e justificativas para o desenvolvimento deste trabalho.

O Capítulo 2 descreve os principais pontos relacionados à fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento de medidores, tais como metodologia de cálculo de indicadores de qualidade de Energia Elétrica, fenômenos associados a variações do sinal elétrico da rede e às principais recomendações tanto em nível internacional quanto nacional.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada, descrevendo as etapas de projeto e caracterização do sistema de aquisição e processamento de sinais, as etapas de calibração das sondas empregadas para medição de tensão e corrente e as etapas de medição com o sistema já calibrado.

No capítulo 4, são apresentados os principais resultados obtidos durante os ensaios de calibração e medição e são discutidos os principais pontos relacionados ao procedimento experimental.

No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Teórica

Este capítulo apresenta um breve resumo referente à recomendações e procedimentos nacionais e internacionais para desenvolvimento de equipamentos que monitoram a qualidade da energia elétrica, introduz termos e conceitos sobre instrumentação e calibração de sensores e equipamentos, além de abordar técnicas de processamento digital de sinais importantes para a compreensão deste trabalho.

2.1 Recomendações e Procedimentos

Os procedimentos PRODIST (Procedimentos de Distribuição) e as recomendações IEEE (Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos) padronizam o procedimento de medição utilizado por medidores de qualidade de energia elétrica e especificam a classe de exatidão do equipamento de medição, de forma que se possam realizar comparações eficazes com diversos outros sistemas existentes. Existem especificações de âmbito internacional e nacional de padronização para sistemas de monitoramento da qualidade da energia elétrica. Neste trabalho, utilizou-se como referência internacional as recomendações IEEE 519/2014, que estabelece práticas para o monitoramento de parâmetros elétricos de tensão e corrente relacionados à qualidade da energia elétrica em regime permanente. Já o módulo 8 do PRODIST, referente aos conceitos de QEE (Qualidade da Energia Elétrica) no Brasil, foi utilizado como referência nacional (XAVIER, 2016).

2.1.1 IEEE-519/2014

A IEEE-519/2014 traz um conjunto de definições relacionadas à qualidade de energia, dentre as quais destacam-se (IEEE-519, 2014):

- Componente harmônico: Um componente de frequência periódica que é múltiplo inteiro e maior que a frequência na qual o sistema de fornecimento está operando. Por exemplo, em um sistema de 60 Hz, a terceira harmônica é 180 Hz.
- Distorção Harmônica Total (THD): A razão entre a raiz quadrada média do conteúdo harmônico, considerando componentes harmônicos até a 50^a ordem e excluindo especificamente as inter-harmônicas, expressas como percentual da fundamental.

2.1.2 PRODIST Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica

Segundo Bollen (2000), a primeira menção ao termo "qualidade de energia" surgiu em um artigo publicado pela marinha dos EUA em 1968, que detalhava um estudo

de especificações de potências em equipamentos eletrônicos. Em 1970 o termo "alta qualidade de energia" foi mencionado como um dos principais objetos de estudo a respeito de energia industrial juntamente com "segurança", "serviço confiável" e "baixos custos iniciais e operacionais". Posteriormente os países escandinavos e a união soviética também realizaram menções com o termo "Qualidade de Tensão" para referir-se as variações na magnitude de tensão.

A Qualidade de energia elétrica (QEE) pode ser definida como a interação entre o sistema de energia e a carga, sendo analisada através de monitoramento do comportamento do sistema em operação sobre efeito de cargas, de maneira que estas cargas operem sem introduzir distúrbios ao sistema e não tenham prejuízos em seu desempenho e vida útil (BOLLEN, 2000). Estas preocupações estão relacionadas ao fato de alguns equipamentos apresentarem maior sensibilidade aos distúrbios de tensão. Por outro lado, há equipamentos que podem ser as fontes destes distúrbios, de modo que existe uma necessidade crescente de critérios de padronização da QEE entregue às cargas para que as mesmas não tenham seus desempenhos afetados ou intensifiquem distúrbios no sistema de alimentação (BACK, 2012; XAVIER, 2016).

De acordo com PRODIST (2018), a QEE é dividida em três níveis:

1. Qualidade do produto: Define terminologias, distúrbios associados a QEE e seus respectivos limites, considerando que o sistema esteja operando em regime permanente.
2. Qualidade de serviço: Define limites e seus indicadores de serviço ofertado as unidades consumidoras.
3. Qualidade do tratamento de reclamações: Destinada a verificar os limites dos indicadores da qualidade da energia que está sendo comercializada.

Quanto a Qualidade do produto, certos fenômenos devem ser analisados em regime permanente e transitório. De acordo com PRODIST (2018), em regime permanente, deve-se analisar o comportamento da tensão (desequilíbrio, flutuação e variação de frequência), fator de potência e harmônicos. Já em regime transitório também devem ser verificadas as variações de tensão de curta duração.

2.1.3 Cálculo das Potências Ativa, Reativa e Aparente

Segundo Arenas (2019) em 2010 o IEEE publicou o padrão que defini critérios para a quantificação da potência em condições senoidais e não-senoidais (IEEE 1459-2010).

Para circuitos monofásicos não-senoidais os valores eficazes de tensão e corrente, são dados por

$$V_{ef} = \sqrt{V_1^2 + \sum_{k \neq 1}^{\infty} V_k^2} = \sqrt{V_1^2 + V_H^2}, \quad (2.1)$$

$$I_{ef} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{k \neq 1}^{\infty} I_k^2} = \sqrt{I_1^2 + I_H^2}, \quad (2.2)$$

onde a componente fundamental é representada pelo índice 1 e o H representa as componentes não-fundamentais.

A potência ativa que descreve a parte da potência que é convertida em trabalho, também denominada potência média, é a média das potências instantâneas, ou seja

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v(t) \cdot i(t) dt = P_1 + P_H, \quad (2.3)$$

onde P é a potência ativa em W, T é o período de amostragem.

A potência aparente, também denominada potência complexa pode ser obtida pelo produto entre tensão eficaz e a corrente eficaz,

$$S = I_{ef} \cdot V_{ef}, \quad (2.4)$$

sendo S a potência aparente, em VA.

A potência reativa está diretamente associada a características indutivas e capacitivas no sistema, pode ser definida como

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}, \quad (2.5)$$

sendo Q a potência reativa, em VAR.

2.1.4 Fator de Potência

Segundo PRODIST (2018), o valor do fator de potência é utilizado como um indicador entre a razão dos valores registrados das potências ativa e reativa (P, Q):

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{P}{S}. \quad (2.6)$$

Já as recomendações IEEE 1459-2010 define o fator de potência para circuitos monofásicos não-senoidais como

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_N^2}} = \frac{1 + (P_H/P_1)}{\sqrt{1 + THD_I^2 + THD_V^2 + (THD_I \cdot THD_V)^2}} \cdot \cos(\varphi_1), \quad (2.7)$$

onde φ_1 é ângulo de defasagem entre as componentes fundamentais da tensão e da corrente.

O fator de potência pode ser classificado como indutivo, capacitivo ou resistivo. O fator de potência indutivo tem como característica a corrente atrasada em relação a tensão, produzindo potência reativa ao sistema. Já o fator de potência capacitivo tem sua corrente adiantada em relação a tensão produzindo potência reativa ao sistema, e o

fator de potência resistivo garante que a corrente e a tensão estão em fase logo não existe potência reativa no sistema (NILSSON JAMES W.; RIEDEL, 2009).

Para que o sistema elétrico não sofra com reativos inseridos na rede, foram estabelecidas condições de operação e monitoramento do fator de potência ao longo do dia. Desta forma é possível realizar o faturamento desta energia reativa excedente. O fator de potência deve permanecer dentro do limite de 0,92 indutivo ou 0,92 capacitivo de acordo com o horário do dia. A energia indutiva será monitorada durante o intervalo de 6h às 0h, e a energia capacitiva de 0h às 6h, sempre em intervalos de 1h (FILHO, 2002).

2.1.5 Frequências Harmônicas

Segundo Leao R. P. S.; Sampaio (2013), harmônicas são o resultado da sobreposição de várias ondas senoidais que possuem frequência múltiplas de uma componente fundamental, que resultam em um sinal distorcido. Um sinal pode ser composto também por outras componentes espectrais, como as inter-harmônicas (frequências que estão situadas entre as múltiplas inteiras da fundamental) e sub-harmônicas (frequências menores do que a fundamental).

A necessidade de identificar e neutralizar harmônicas e suas respectivas distorções tem grande importância devido ao fato de que sua presença em um sistema pode gerar distúrbios e efeitos indesejados, como excitação de correntes ou tensões ressonantes, erros na medição de grandezas elétricas, sobrecorrente no neutro, entre outros (DECKMANN S. M.; POMILIO, 2013).

Em um sistema elétrico, a maioria dos harmônicos presentes é resultante da utilização de cargas com características não lineares. Para minimizar este efeitos, é comum utilizar filtros ativos ou passivos (LEAO R. P. S.; SAMPAIO, 2013).

2.1.6 Índices de Distorção de Sinais

As distorções harmônicas são fenômenos associados à deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal de frequência fundamental. De acordo com as recomendações IEEE-519 (2014) para os cálculos de distorção harmônica total deve-se considerando componentes harmônicos até a 50ª ordem. Para os procedimentos PRODIST (2018), para os cálculos de distorção harmônica total deve-se considerando componentes harmônicos até a 40ª ordem.

O desvio total de um sinal de tensão distorcido pode ser determinado como

$$DHT_v = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} V_h^2}}{V_1}, \quad (2.8)$$

onde V_1 é a tensão fundamental medida, V_h é a tensão harmônica de ordem h .

No entanto a equação (2.8) pode ser reescrita para valores de tensão rms:

$$DHT_v = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{rms,1}^2}}{V_{rms,1}} = \frac{V_{rms,H}}{V_{rms,1}}. \quad (2.9)$$

De forma análoga, o cálculo para distorção harmônica total de corrente é definido com (IEEE-519, 2014):

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} I_h^2}}{I_1}, \quad (2.10)$$

onde I_1 é a corrente fundamental medida, I_h é a corrente harmônica de ordem h .

Assim como no caso anterior, a equação (2.10) pode ser reescrita para valores de corrente rms como:

$$DHT_i = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{rms,1}^2}}{I_{rms,1}} = \frac{I_{rms,H}}{I_{rms,1}}. \quad (2.11)$$

2.2 Processamento Digital de Sinais

2.2.1 Transformada Discreta de Fourier

O método mais comum para identificação de harmônicas nos sinais de interesse é utilizando a análise de Fourier, desenvolvida em 1822. Trata-se de uma ferramenta matemática capaz de decompor um sinal utilizando ondas senoidais como base na análise espectral dos sinais, é possível determinar a frequência e a amplitude de cada harmônico presente no sinal. Essa análise pode ser realizada por meio de processadores digitais através da Transformada Discreta de Fourier (TDF) (LEAO R. P. S.; SAMPAIO, 2013; UFU, 2014).

Para que se possa determinar a Transformada Discreta de Fourier, deve-se considerar um sinal de duração finita $x[n]$ com N amostras, sendo $x[n] = 0$ para $n < 0$ e $n \geq N$. (OPPENHEIM ALAN V.; SCHAFER, 2013)

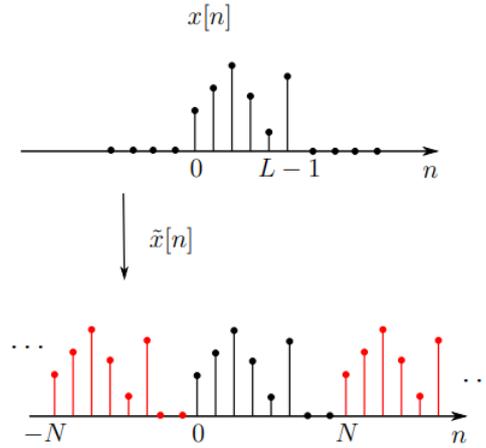
Utilizando o sinal $x[n]$, pode-se montar uma sequência periódica $\tilde{x}[n]$ definida por

$$\tilde{x}[n] = \sum_{r=-\infty}^{\infty} x[n - rN], \quad (2.12)$$

sendo r é um número inteiro.

Como pode ser visto na Figura 1, a sequência periódica $\tilde{x}[n]$ é composta por repetições do sinal amostrado $x[n]$.

Figura 1 – Sequência Periódica $\tilde{x}[n]$.



Fonte: Retirado de Higuti (1999b)

Essa sequência pode ser representada por uma série de Fourier correspondente a uma soma de sequências exponenciais complexas harmonicamente relacionadas, que podem ser escritas na forma,

$$e_k[n] = e^{j(\frac{2\pi}{N})kn} = e_k[n + rN], \quad (2.13)$$

sendo k um inteiro qualquer.

A representação por série de Fourier tem a forma,

$$\tilde{x}[n] = \frac{1}{N} \sum_k \tilde{X}[k] e^{j(\frac{2\pi}{N})kn}, \quad (2.14)$$

em que k está contido no intervalo de 0 a $N-1$ e $\tilde{X}[k]$ representa a série discreta de Fourier da sequência anterior.

A equação (2.14) pode ser reescrita como,

$$\tilde{x}[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{X}[k] e^{j(\frac{2\pi}{N})kn}. \quad (2.15)$$

Para obter a sequência dos coeficientes da série de Fourier $\tilde{X}[k]$ a partir da sequência periódica $\tilde{x}[n]$, utiliza-se do princípio da ortogonalidade do conjunto das sequências exponenciais complexas. Multiplicando os dois lados da equação (2.15) por $e^{-j(\frac{2\pi}{N})rn}$ e somando de $n = 0$ a $n = N - 1$, obtém-se,

$$\sum_{k=0}^{N-1} \tilde{x}[n] e^{-j(\frac{2\pi}{N})rn} = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{X}[k] e^{j(\frac{2\pi}{N})(k-r)n}, \quad (2.16)$$

que pode ser reescrita na forma,

$$\sum_{k=0}^{N-1} \tilde{x}[n] e^{-j(\frac{2\pi}{N})kn} = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{X}[k] \left[\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j(\frac{2\pi}{N})(k-r)n} \right], \quad (2.17)$$

onde a identidade da ortogonalidade é expressa por,

$$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j(\frac{2\pi}{N})(k-r)n} = \begin{cases} 1, & k - r = mN, \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (2.18)$$

sendo m um número inteiro.

Quando aplica-se a identidade (2.18) ao somatório entre colchetes na Equação (2.17), obtém-se os coeficientes da série de Fourier $\tilde{X}[k]$ pela relação de $\tilde{x}[n]$ como mostra a equação (2.19), sendo esta a equação de análise da TDF (OPPENHEIM ALAN V.; SCHAFER, 2013).

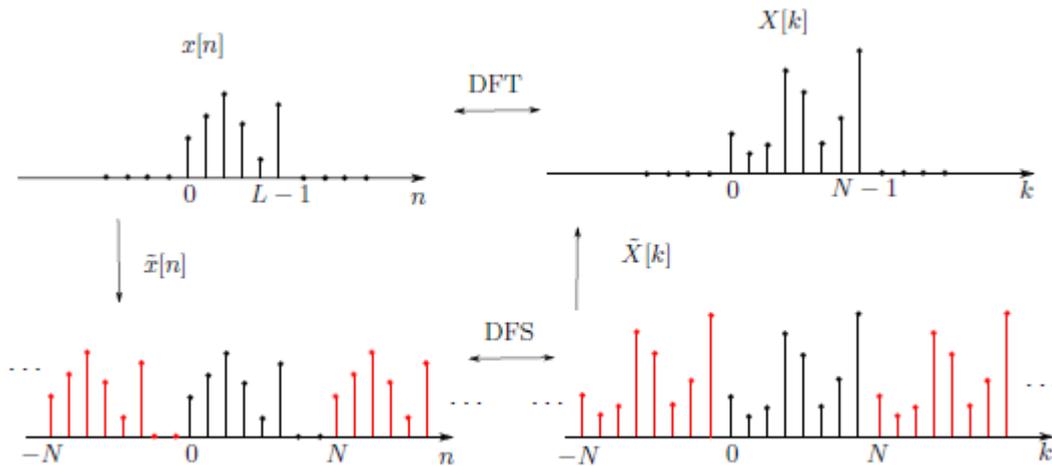
$$\tilde{X}[k] = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{x}[n] e^{-j(\frac{2\pi}{N})kn}, \quad (2.19)$$

Para manter a dualidade entre os domínios do tempo e frequência, essa sequência de duração finita, $X[k]$, é definida como,

$$X[k] = \begin{cases} \tilde{X}[k], & 0 \leq k \leq N - 1; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (2.20)$$

Tal comportamento pode ser verificado na Figura 2.

Figura 2 – Dualidade entre os domínios do Tempo e Frequência da TDF.



Fonte: Retirado de Higuity (1999b)

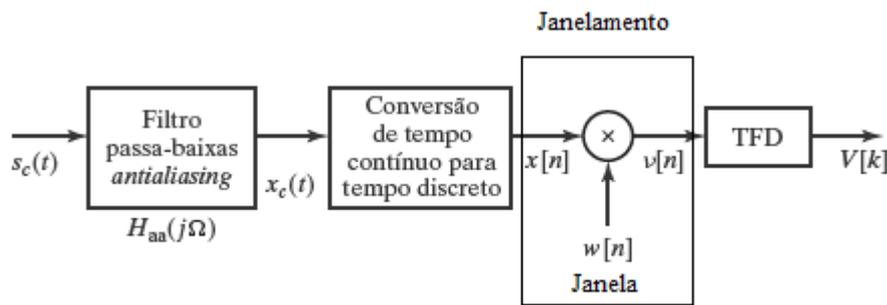
Por fim, a equação de síntese da TDF dada por,

$$\tilde{x}[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{X}[k] e^{-j(\frac{2\pi}{N})kn}. \quad (2.21)$$

2.2.2 Análise Espectral

Para definir a magnitude das harmônicas presentes nos sinais de interesse, a análise espectral é uma ferramenta importante. A análise espectral mostra como a energia do sinal está distribuída sobre suas frequências, ou seja, a análise espectral nada mais é do que a representação gráfica da Transformada de Fourier. A Figura 3 sintetiza o diagrama de blocos que resume o processo de análise espectral para um sinal de tempo contínuo amostrado por um conversor AD (HIGUTI, 1999a; OPPENHEIM ALAN V.; SCHAFER, 2013; AGUIRRE, 2013).

Figura 3 – Representação de um Sistema Utilizado para Realizar a Análise Espectral de um Sinal.



Fonte: Retirado de Oppenheim Alan V.; Schafer (2013)

Como pode ser observado na Figura 3, o sinal de tempo contínuo deve ser submetido ao filtro *anti-aliasing*. Este filtro tenta eliminar ou atenuar ao máximo as componentes de frequência com valores superiores a metade da frequência de amostragem (Teorema de Nyquist).

Em seguida utiliza-se um conversor analógico/digital para amostrar o sinal $x_c(t)$ a uma taxa de f_s de amostras por segundo. A necessidade de se utilizar o janelamento é uma consequência da condição de comprimento finito da TDF. Para isso, basta multiplicar o sinal $x[n]$ por um janelamento $w[n]$ com duração finita.

Por fim calcula-se a TDF do sinal, utilizando $N \leq L$ pontos, através da equação:

$$V[k] = \sum_{n=0}^{L-1} v[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad (2.22)$$

onde $K = 0, 1, 2, \dots, N-1$ e $v[n] = w[n]x[n]$.

2.2.3 Algoritmo de Goertzel

Segundo a recomendação da IEEE-519 (2014), a THD considera apenas as componentes harmônicas, ou seja, apenas as frequências múltiplas da fundamental, desprezando

especificamente contribuições de frequências inter-harmônicas. Para esta aplicação é necessário determinar componentes específicas de frequências e assim definir um procedimento de cálculo que reduza o número de multiplicações e adições. Embora os algoritmos de FFT para o cálculo de todos os valores da TDF sejam eficientes, o algoritmo de Goertzel é mais flexível e possui vantagens em relação ao uso de memória relacionado ao espectro harmônico de cada sinal processado (OPPENHEIM ALAN V.; SCHAFER, 2013; ARENAS, 2019).

O algoritmo Goertzel é um método que determina o valor de uma componente k do espectro em frequência $X(k)$ através da transformada discreta de Fourier (ARENAS, 2019). Definindo inicialmente

$$W_N^{-kN} = e^{j(2\pi/N)Nk} = e^{j2\pi k} = 1, \quad (2.23)$$

e considerando k um inteiro. Pode-se reescrever as equações da TDF (2.19) e (2.21) como

$$\tilde{X}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}[n] W_N^{kn}, \quad (2.24)$$

onde $k= 0,1,2,\dots,N-1$, e

$$\tilde{x}[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{X}[k] W_N^{kn}, \quad (2.25)$$

onde $k= 0,1,2,\dots,N-1$.

O algoritmo leva em consideração a periodicidade da sequência W_N^{-kn} , tendo N como período em n ou k . Multiplicando-se o membro direito da equação (2.24) por W_N^{-kn} tem-se

$$X[k] = W_N^{-kn} \sum_{r=0}^{N-1} x[r] W_N^{kr} = \sum_{r=0}^{N-1} x[r] W_N^{-k(N-r)}. \quad (2.26)$$

Definindo-se a sequência

$$y_k[n] = \sum_{r=-\infty}^{\infty} x[r] W_N^{-k(n-r)} u[n-r]. \quad (2.27)$$

A partir das equações (2.26), (2.27) e considerando o fato de que $x[n] = 0$ para $n < 0$ e $n \geq N$, tem-se

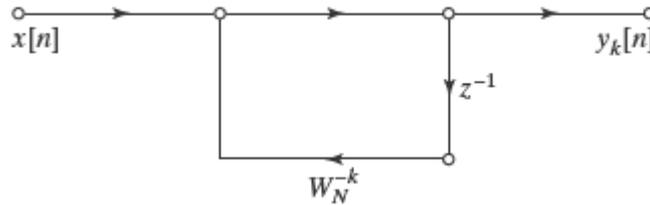
$$X[k] = y_k[n]_{n=N}. \quad (2.28)$$

Ao analisar a equação (2.27), verifica-se que ela se comporta como uma convolução discreta entre a sequência de duração finita $x[n]$, $0 \leq n \leq N-1$, e a sequência $W_N^{-kn} u[n]$. Dessa forma, $y_k[n]$ pode ser interpretada como a resposta de um sistema $W_N^{-kn} u[n]$ a uma entrada de comprimento finito $x[n]$. Quando $n = N$, o valor da saída é $X[k]$.

O sistema $W_N^{-kn} u[n]$ é descrito pela equação (2.29) e está representado pelo diagrama de fluxo da Figura 4.

$$y_k[n] = W_N^{-k} y_k[n-1] + x[n], \quad (2.29)$$

Figura 4 – Diagrama de Fluxo do Cálculo Recursivo Complexo de Primeira Ordem de $X[k]$.



Fonte: Retirado de Oppenheim Alan V.; Schafer (2013)

A partir da equação (2.29), nota-se que usando o método direto, os cálculos de cada valor de $y_k[n]$ dependem de $x[n]$ e W_N^{-k} . Para obter tal resultado a partir do diagrama da Figura 4, é necessário realizar 4 multiplicações reais e 4 adições reais, e todos os valores intermediários $y_k[1], y_k[2], \dots, y_k[N - 1]$ precisam ser determinados.

Entretanto, utilizando-se o artifício de recursão, pode-se determinar o valor de $X[k]$ através de $4N$ multiplicações e $4N$ adições, sem a necessidade de se armazenar os coeficientes W_N^{kn} .

A função de transferência do sistema da Figura 4 é dada por

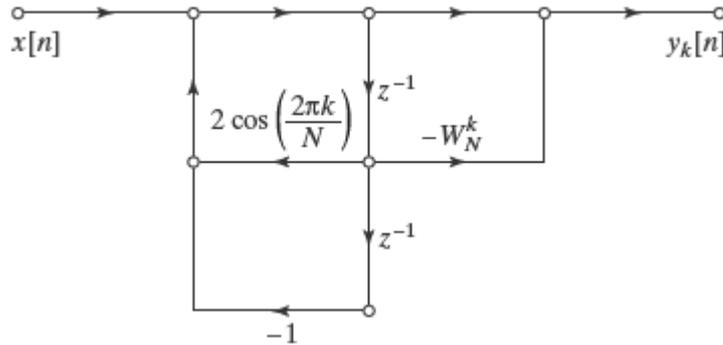
$$H_k[z] = \frac{1}{1 - W_N^{-k} z^{-1}}. \quad (2.30)$$

Multiplicando-se o numerador e o denominador da equação (2.30) pelo fator $(1 - W_N^k z^{-1})$, tem-se

$$H_k[z] = \frac{1 - W_N^k z^{-1}}{(1 - W_N^{-k} z^{-1})(1 - W_N^k z^{-1})} = \frac{1 - W_N^k z^{-1}}{1 - 2 \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) z^{-1} + z^{-2}}. \quad (2.31)$$

A função de transferência na forma direta II (2.31) é representada pelo digrama de fluxo da Figura 5, onde o algoritmo de Goertzel pode ser representado através de um cálculo recursivo de segunda ordem. A equação de diferenças que representa o sistema pode ser definida como

Figura 5 – Diagrama de Fluxo do Cálculo Recursivo de Segunda Ordem de $X[k]$ (Algoritmo de Goertzel).



Fonte: Retirado de Oppenheim Alan V.; Schafer (2013)

$$v_k[n] = 2 \cos\left(\frac{2k\pi}{N}\right)v_k[n-1] - v_k[n-2] + x[n]. \quad (2.32)$$

Após N iterações começando pelas condições de repouso inicial $w_k[-2] = w_k[-1] = 0$, o valor desejado da TDF pode ser obtido através da determinação dos zeros da função de transferência

$$X[k] = y_k[n]|_{n=N} = v_k[N] - W_N^k v_k[N-1]. \quad (2.33)$$

O artifício da recursão do sistema da Figura 5 permite que apenas os coeficientes $\cos(2k\pi/N)$ e W_N^k sejam calculados e armazenados a cada interação. Tanto o método direto quanto o algoritmo de Goertzel podem calcular $X[k]$ para quaisquer valores, sem ser necessário calcular todos os valores de K , sendo cada valor de TDF calculado por um sistema recursivo como na Figura 5. O algoritmo de Goertzel calcula o valor da TDF $X[k]$ na frequência $\omega = 2\pi k/N$ (OPPENHEIM ALAN V.; SCHAFFER, 2013).

2.3 Instrumentação

Informações sobre a instrumentação e metodologia de medição que os equipamentos de monitoramento de qualidade de energia elétrica devem possuir são apresentadas por ANEEL (2011). A seguir serão descritas as principais características presente no manual, que tem como referência os protocolos estabelecidos pelas normas vigentes internacionais (IEC 6100, série 4) e procedimentos nacionais (PRODIST (2018), módulo 8).

Esses protocolos utilizam como padrão janelas retangulares com duração de 12 ciclos consecutivos para sistemas de 60 Hz a fim de obter uma resolução espectral de 5 Hz e utilizam de agrupamentos dos valores eficazes dos espectros resultantes em grupos e subgrupos harmônicos, a fim de minimizar o fenômeno de espalhamento espectral. Além

disso as normas IEC 61000-4-30 definem os instrumentos de medição em duas classes: A ou S (UFU, 2014; ANEEL, 2011).

Os medidores classe A são utilizados para monitoramento onde a precisão da medição é extremamente importante, como em aplicações contratuais no setor de distribuição de energia elétrica nacional e em questões judiciais. A incerteza de medição para medidores do tipo classe A devem ser inferiores ou iguais a 5,0%;

Os medidores classe S são utilizados para monitoramento onde o propósito é estatístico, como no caso particular de aplicação no setor de distribuição de energia elétrica nacional, entre outros. A incerteza de medição para medidores do tipo classe S devem ser inferiores ou iguais a 10,0%;

Segundo UFU (2014), até o ano de 2030 foi definido que para a medição de tensão em regime permanente, poderão ser utilizados instrumentos com precisão de até 1% da leitura em relação ao valor exato. Os valores eficazes podem ser calculados a partir de janelas de amostras adquiridas sucessivamente, sendo estas compreendidas em sequência de doze a quinze ciclos.

Para cálculos relacionadas com a distorção harmônica total, o espectro harmônico a ser considerado deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, pelo menos, a 40^a ordem harmônica.

Para que o conjunto de leituras possa ser utilizado para cálculos de indicadores QEE em regime permanente, deve-se possuir o registro de 1008 leituras obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada, cujo o tempo mínimo para a aquisição é de 7 dias.

2.3.1 Terminologia

Quando se está trabalhando com sistemas de medição, a padronização da terminologia é importante para que sistemas feitos por diferentes fabricantes possam ser comparados. A seguir, alguns dos principais termos e conceitos básicos utilizados neste trabalho serão apresentados, seguindo o padrão apresentado por Inmetro (2008), Inmetro (2012).

- **Medição:** Tem como objetivo determinar ou mensurar o valor de uma determinada grandeza. Para que se possa realizar uma medição, deve-se especificar de maneira apropriada a grandeza a ser mensurada, o método de medição e o procedimento de medição a ser utilizado. O resultado de uma medição é uma aproximação do valor mensurado, sendo considerado completo quando a incerteza dessa estimativa é conhecida.
- **Exatidão de medição:** Indica o quão próximo do valor real está o valor medido, sendo a grandeza mensurada definida quando a exatidão requerida é alcançada, de modo que seu valor seja único.

- Precisão de medição: Indica o quanto as medidas realizadas repetidas vezes de uma grandeza mensurada estão próximas umas das outras, sendo o instrumento de medição e o método utilizados ditos precisos quando a faixa de variação destas medidas é limitada em uma pequena faixa de valores.
- Condições de repetibilidade: São condições em comum, as quais o sistema mensurado é submetido em todas as medições realizadas sucessivamente, onde variações nas grandezas de influência afetam o resultado de medição por não serem mantidas constantes.

3 Metodologia

Este capítulo descreve os métodos empregados para o desenvolvimento de um protótipo eletrônico, capaz de realizar a aquisição e processamento de sinais provenientes da leitura de sensores não invasivos de tensão e corrente. Além disso, são abordadas as técnicas de processamento aplicados e os protocolos experimentais utilizados durante os ensaios. Os sensores e o circuito desenvolvido foram descrito, juntamente com o sistema supervisor.

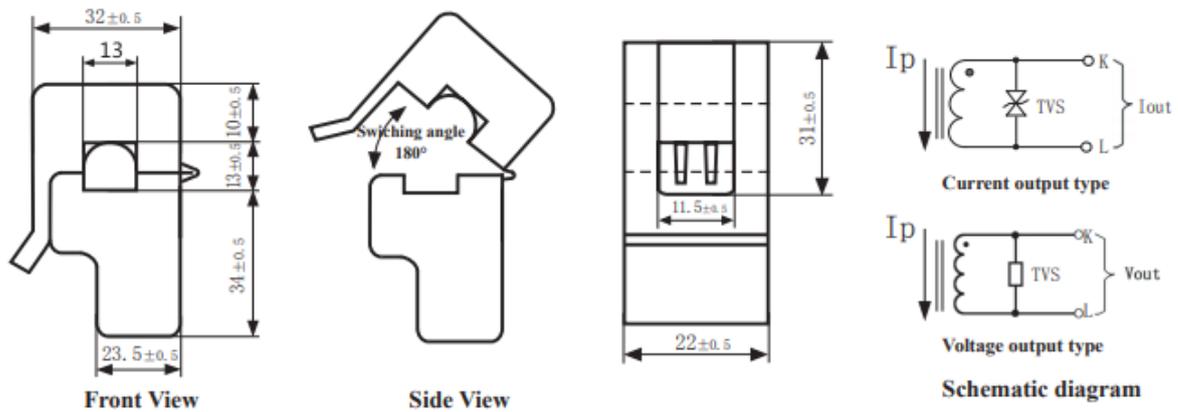
O protótipo desenvolvido é composto por um sistema de monitoramento monofásico possui entradas para sete canais de leitura de corrente e três canais de leitura para tensão. Foram utilizados um sensor de corrente (0-30 A) e um transformador abaixador para medidas de tensão (0 - 220 VCA). Para o processamento dos sinais optou-se pelo microcontrolador ESP 8266 por possibilitar a comunicação com um sistema supervisor compatível com ambiente *Android Blynk* que oferece uma interface para o usuário, exibindo todos os resultados obtidos ao longo do ensaio. Além de realizar medições de corrente e tensão, o sistema pode ser utilizado para calcular as potências aparente, ativa e reativa, fator de potência e índice de distorção harmônica total em tempo real.

3.1 Sensor de Corrente

A escolha dos sensores de corrente e tensão utilizados neste trabalho foi feita levando-se em consideração o custo e as regulamentações definidas por PRODIST (2018). Para monitorar a corrente, optou-se por um utilizar um sensor de 0 a 30 A (YHDC, modelo SCT-013). Trata-se de um sensor não invasivo, com faixa de operação dentro dos padrões residenciais.

Os sensores da família SCT-013 utilizam um transformador de corrente (TC) e são dispositivos compostos por dois enrolamentos, onde o primário é o próprio condutor no qual se deseja monitorar a corrente e o secundário do TC apresenta uma corrente alternada induzida proporcional à corrente alternada que percorre o condutor. Este sensor utiliza um resistor para converter a corrente em uma tensão que varia de 0-1 V. A Figura 6 mostra um diagrama do sensor SCT-013, composto por um transformador de corrente de núcleo dividido que possui uma bobina interna em sua estrutura.

Figura 6 – SCT-013.



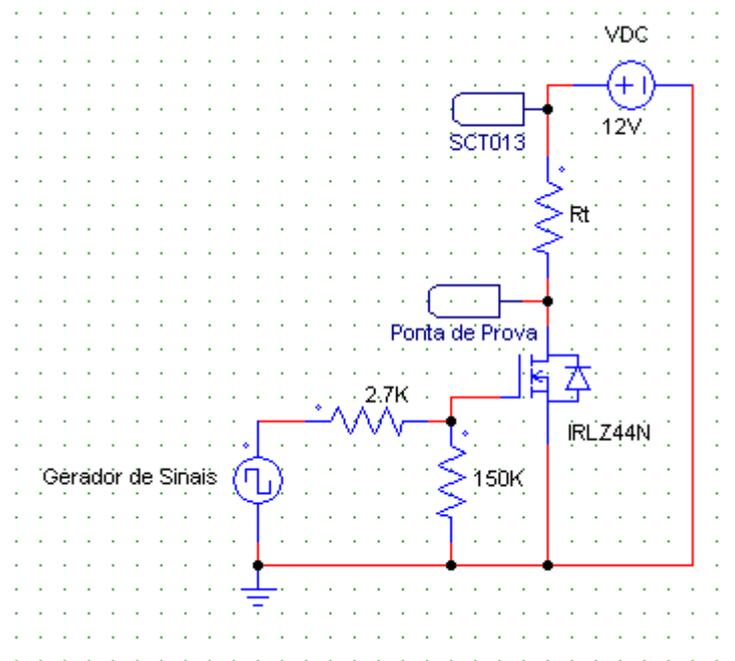
Fonte: Retirado de (YHDC, 2015)

As principais especificações do sensor de corrente utilizado são (YHDC, 2015):

- Faixa de medição: 0 à 30 Arms;
- Tensão de saída: 0 a 1 Vrms;
- Temperatura de trabalho: -25 à 70 °C;
- Tensão de trabalho ≤ 660 V;
- Precisão: 1%;
- Linearidade: 1%;
- Frequência de operação: 50 Hz à 1 kHz;
- Faixa de medição: 10% à 120% da corrente nominal;

Ao analisar as características deste sensor, verifica-se que a frequência de operação não atende os requisitos especificados pela PRODIST (2018) no que diz respeito ao número de harmônicas que devem ser monitoradas, pois seria possível garantir medições até a 16ª harmônica, ao passo que o procedimento padrão recomenda que sejam monitoradas as 40 primeiras harmônicas. A fim de avaliar o comportamento do sensor para frequências superiores ao valor máximo informado pelo fabricante, foram realizados ensaios em laboratório para verificar sua resposta em frequência para faixas de operação de até 3 kHz. Para isso, utilizou-se o circuito apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Circuito Utilizado para os Testes de Resposta em Frequência do SCT013.



Fonte: Elaborada pela Autora.

Para validação desse sensor, o ideal seria realizar o teste com sinal de corrente senoidal, passivo de variação da frequência fundamental. No entanto considerando as limitações dos laboratórios disponíveis e ausência de um amplificadores de potência, não seria possível gerar um sinal senoidal com corrente alta o suficiente para leitura do sensor utilizando um gerador de sinais.

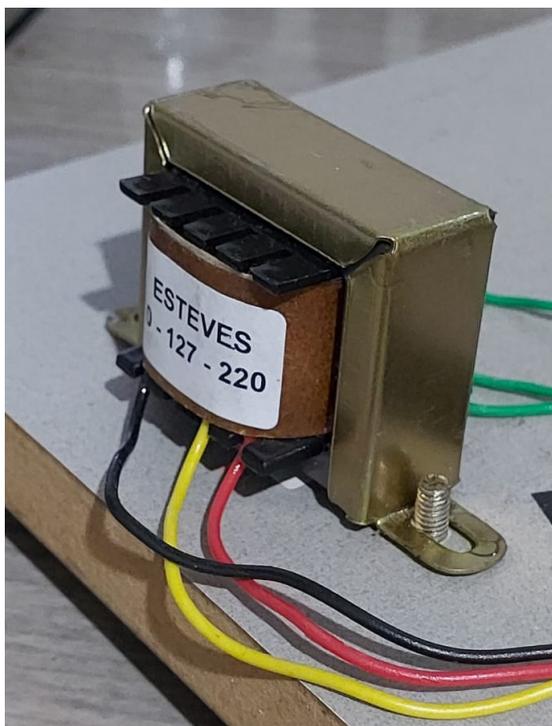
Portanto foi desenvolvido um circuito para testes que utiliza um transistor MOSFET (IRLZ44N), controlado por um gerador de sinais, que aplica um sinal de onda quadrada no gate do MOSFET. O dreno desse transistor está conectado a um resistor de potência (R_t) que é alimentado por uma fonte DC (0 a 12 V). Utilizando esse artifício foi possível ajustar a frequência do sinal onda quadrada através do gerador de sinais. As aquisições dos sinais foram realizadas através de um osciloscópio digital, que monitorava as formas de onda de tensão sobre o resistor de R_t (ponta de prova) e de tensão na saída do sensor SCT013. Para a análise da resposta em frequência, os dados obtidos pelo osciloscópio foram processados para determinar a magnitude e fase dos sinais medidos pelo sensor. Os resultados desses ensaios serão apresentados no capítulo 4.

3.2 Sensor de Tensão

Para adquirir os sinais de tensão, utilizou-se um transformador abaixador (Esteves, modelo ST 220 V/127 V para 9 V). Transformadores de tensão são compostos por dois enrolamentos (primário e o secundário), envolvidos em um núcleo metálico, onde a diferença

de potencial no enrolamento primário induz a diferença de potencial no enrolamento secundário. A relação de transformação e as características de resposta em frequência são determinadas pela razão de espiras entre os enrolamentos e pelas características construtivas do núcleo. A Figura 8 mostra o transformador utilizado.

Figura 8 – Transformador.



Fonte: Elaborada pela Autora.

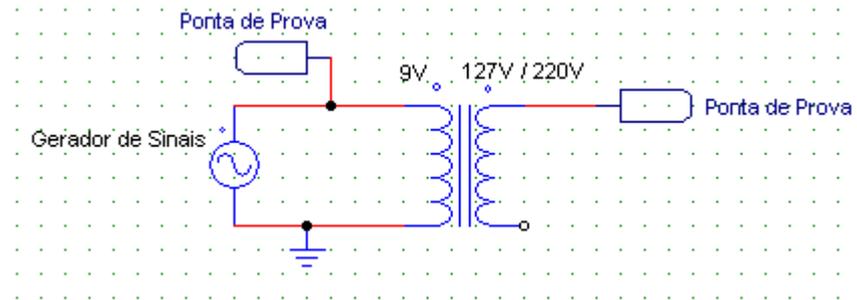
As principais especificações do transformador utilizado são (ESTEVES, 2015):

- Tensões do primário: 110/220 VAC;
- Tensões do secundário: 9 V;
- Corrente do secundário: 300 mA;
- Temperatura de trabalho: -10 à 80 °C;
- Frequência de operação: 60 Hz;
- Precisão: 5%;

Assim como no caso do sensor de corrente, as especificações deste transformador não informam a resposta em frequência para faixas superiores a 60 Hz. Portanto foram realizados ensaios semelhantes aos ensaios como do sensor de corrente em laboratório, verificando sua resposta em frequência para faixas de operação até 3 kHz. É importante ressaltar que para operações em altas frequências seria mais indicado utilizar um transformador com núcleo

de ferrite, mas devido a restrições no orçamento, optou-se por utilizar um transformador de valor mais baixo. O circuito utilizado para analisar a resposta de magnitude e fase do transformador é apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Circuito Utilizado para os Testes de Resposta em Frequência do Transformador.



Fonte: Elaborada pela Autora.

Para validação do Transformador, o ideal seria realizar o teste com sinal de tensão senoidal nominal, passivo de variação da frequência fundamental. No entanto considerando as limitações dos laboratórios disponíveis, utilizou-se um gerador de sinais para alimentar a entrada de 9 V do transformador e com o osciloscópio digital, monitorou-se o comportamento da saída para 127 V e 220 V. Os resultados desses ensaios serão apresentados no capítulo 4.

3.3 Microcontrolador ESP8266

O microcontrolador ESP8266 é um SoC (*System-on-a-Chip*) desenvolvido pela empresa chinesa Espressif. Esse dispositivo vem sendo utilizado por diversas empresas, que desenvolveram módulos para incorporação deste componente. Esses módulos podem variar em tamanho, número de pinos, tipos de interface (I2C, PWM e SPI), entre outros.

As principais especificações do SoC ESP8266 são (ESPRESSIF, 2013):

- *Wi-Fi* 2,4 GHz embutido;
- Frequência de operação: 80 MHz / 160 MHz;
- Arquitetura RISC de 32 *bits*;
- Tensão de operação: 3,3 V;
- Memória RAM para instruções: 32 *kBytes*;
- Memória RAM para dados: 96 *kBytes*;
- Temperatura de operação: -20 à 100 °C.

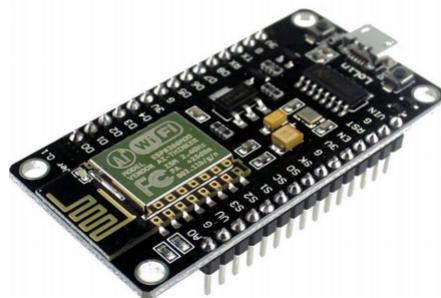
Atualmente, o SoC ESP8266 vem sendo utilizado em diversas aplicações, tais como sistemas de alimentação inteligentes, automação residencial, rede Mesh, controle sem fio industrial, câmeras IP, redes de sensores, dispositivos com reconhecimento de localização (Wi-Fi), etiquetas de identificação de segurança, entre outras (ESPRESSIF, 2013).

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se o módulo *NodeMcu* modelo ESP-12E, mostrado na Figura 10. O módulo *NodeMcu* ESP-12E é uma plataforma de desenvolvimento de código aberto, que combina o CI ESP8266, uma interface USB-serial e um regulador de tensão 3,3 V. A programação pode ser feita utilizando diversas IDE's (Ambiente de Desenvolvimento Integrado, do inglês *Integrated Development Environment*), através de comunicação via cabo micro-usb ou *Wi-Fi*. O dispositivo possui 11 pinos que podem ser utilizados como entradas (digitais ou analógicas) e saídas (digitais).

As principais especificações do *NodeMCU* ESP-12E são (ESPRESSIF, 2013):

- *Wireless* padrão 802.11 b/g/n;
- Antena embutida;
- Conector micro-usb;
- Modos de operação: STA/AP/STA+AP;
- Suporta 5 conexões TCP/IP;
- Portas GPIO: 11;
- Funções de PWM, I2C, SPI;
- Tensão de operação: 4,5 - 9V;
- Taxa de transferência: 110-460800bps;
- Suporta *upgrade* remoto de *firmware*;
- Conversor analógico digital (AD) de 10 *bits*, canal único.

Figura 10 – Módulo NodeMCU ESP-12E.



Fonte: retirado de Technology (2020)

3.4 Conversor Analógico Digital MCP3208

De acordo com o módulo 8 do PRODIST (2018), para a medição de tensão em regime permanente, os valores eficazes devem ser calculados a partir de amostras coletadas em janelas sucessivas com sequência de doze ciclos a quinze ciclos. O PRODIST (2018) também informa que, para cálculos relacionados a distorção harmônica total de tensão, o espectro harmônico a ser considerado deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até pelo menos a 40ª ordem.

Considerando essas recomendações, a frequência máxima analisada pela amostragem é dada pelo produto entre a ordem da harmônica desejada e frequência fundamental. Segundo o critério de Nyquist, a frequência mínima necessária para a amostragem é de pelo menos duas vezes a frequência máxima analisada, ou seja

$$f_s = f_{max} \cdot h_1 \cdot 2 = 40 \cdot 60 \cdot 2 = 4,8 \text{ kHz} \quad (3.1)$$

sendo f_s a frequência de amostragem, f_{max} a frequência máxima que se deseja medir e h_1 a frequência fundamental.

Para janelas com sequência de doze ciclos, o número mínimo de amostras a ser analisado é

$$N_{s_{min}} = f_{s_{min}} \cdot \frac{1}{h_1} \cdot N_{ciclos} = 4,8 \text{ kHz} \cdot \frac{1}{60 \text{ Hz}} \cdot 12 = 960 \text{ amostras} \quad (3.2)$$

onde, $N_{s_{min}}$ é o número mínimo de amostras e $f_{s_{min}}$ é a frequência mínima necessária para amostragem.

Para janelas com sequência de quinze ciclos, o número mínimo de amostras a ser analisado é dado pela Equação (3.3)

$$N_{s_{min}} = f_{s_{min}} \cdot \frac{1}{h_1} \cdot N_{ciclos} = 4,8 \text{ kHz} \cdot \frac{1}{60 \text{ Hz}} \cdot 15 = 1200 \text{ amostras} \quad (3.3)$$

De acordo com a proposta apresentada neste trabalho e as recomendações do módulo PRODIST (2018), o conversor AD (Analógico/Digital) utilizado para adquirir os sinais deve apresentar uma frequência de amostragem mínima de 4,8 kHz e possuir pelo menos dois canais, sendo um para a aquisição do sinal de tensão e outro para aquisição do sinal de corrente.

Para o desenvolvimento do protótipo, utilizou-se um conversor AD externo (*Texas Instruments*, modelo MCP3208) com as seguintes características (*Microchip Technology Inc*, 2008):

- 8 canais de entrada;
- Entradas analógicas programáveis (terminação única ou diferencial);
- Frequência de amostragem de até 50 kHz, para alimentação de 2,7 Vcc, ou até 100 kHz para alimentação de 5 Vcc;

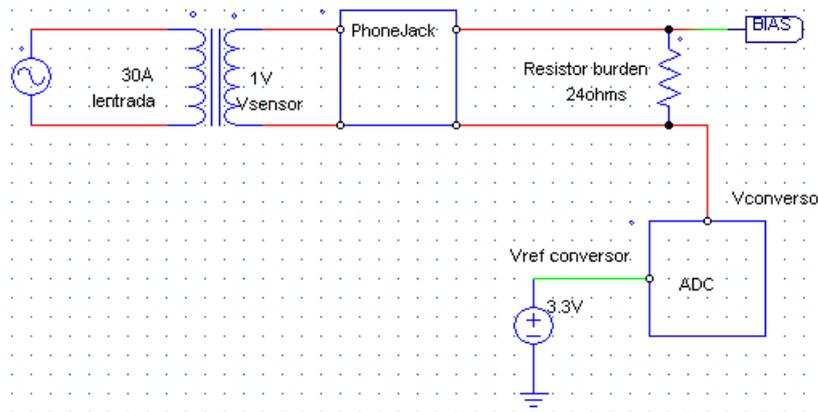
- Resolução de 12 *bits*;
- Interface serial SPI;
- Temperatura de operação: $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $85\text{ }^{\circ}\text{C}$;

3.5 Projeto do circuito

A seguir serão descritos os circuitos de condicionamento de sinais utilizados para realizar a leitura dos sensores de tensão e corrente, e os circuitos auxiliares utilizados para controlar o conversor AD, o microcontrolador e o CI responsável por armazenar os dados adquiridos num cartão de memória SD.

O sensor de corrente SCT-013 possui um conector do tipo P2 estéreo, portanto, foi necessário utilizar conectores do tipo *phone jack*. O princípio de funcionamento de TC é baseado na conversão de corrente e para esta aplicação, o TC comporta-se como fonte de corrente. Como descrito na seção anterior, para converter o sinal de corrente da saída do TC num sinal de tensão, é necessário utilizar um resistor de carga. Neste trabalho, utilizou-se um resistor de $24\ \Omega$ (*burden resistor*), como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Diagrama de Aquisição do Sinal de Corrente.



Fonte: Elaborada pela Autora.

Considerando uma tensão de referência de 3,3 V, pode-se calcular a resolução em tensão do conversor AD da seguinte forma:

$$Res_{AD} = \frac{V_{REF(conversor)}}{2^{n-1}} = \frac{3,3\text{ V}}{4095} = 805\ \mu\text{V/bit}, \quad (3.4)$$

sendo Res_{AD} a resolução do conversor e $V_{REF(conversor)}$ a tensão de referência do conversor. Considerando o valor máximo de saída do sensor igual a 1 Vrms, o fundo de escala digital

(FeAD) será

$$Fe_{AD} = \frac{1 V \cdot 2 \cdot \sqrt{2}}{Res_{AD}} = \frac{2,82 V_{pp}}{805 \mu V/bit} = 3503 bits. \quad (3.5)$$

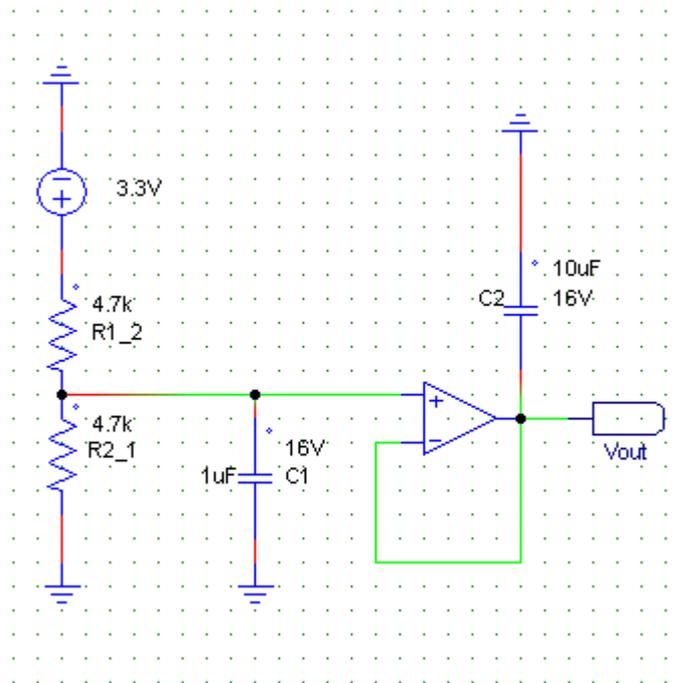
Sabendo que a razão entre corrente e tensão do TC é de 30 A / 1 Vrms, o fundo de escala de corrente na entrada pode ser determinado como,

$$Res_{Entrada} = \frac{30 A \cdot 2 \cdot \sqrt{2}}{Fe_{AD}} = \frac{84,85 A_{pp}}{3503 bits} = 24,42 mA. \quad (3.6)$$

sendo $Res_{Entrada}$ a resolução para medição da corrente de entrada, ou seja o menor valor que o protótipo é capaz de ler para o sinal de corrente, é de 24,42 mA.

O termo BIAS indica um nível de *offset* que precisou ser adicionado ao sinal de saída do sensor para condicionar o sinal dentro dos limites de operação do converso AD (0 - 3 V). Para isso utilizou-se um divisor de tensão junto a um circuito operacional (LM358) para somar um nível de offset de 1,65 V aos sinais de entrada. A Figura 12 apresenta o esquemático do circuito empregado.

Figura 12 – Circuito de Ajuste de Referência.

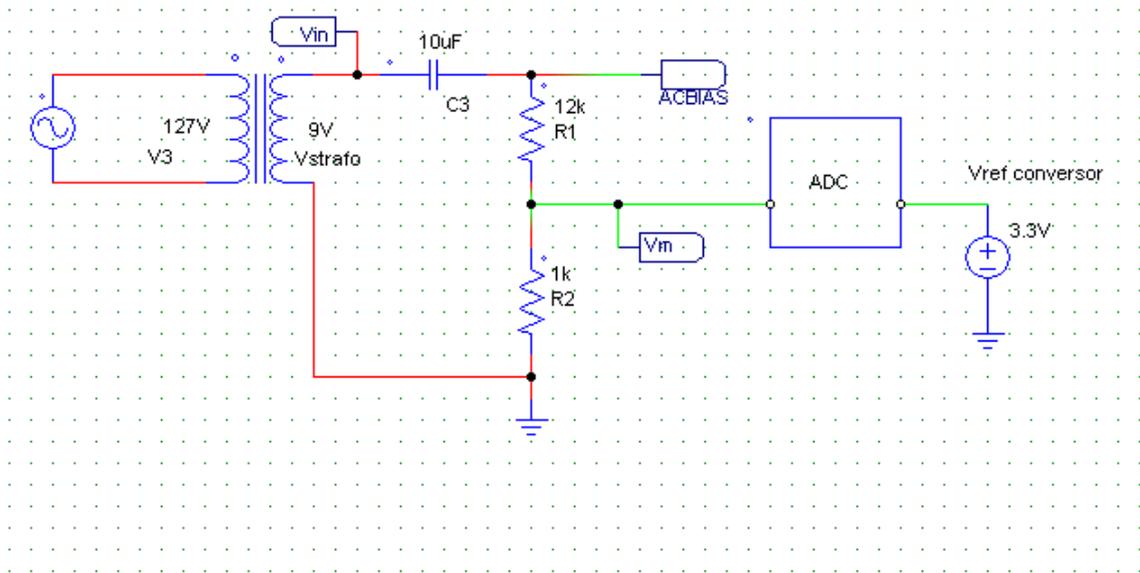


Fonte: Elaborada pela Autora.

Além de condicionar o sinal de entrada, o circuito também funciona como um *buffer*, isolando a entrada do conversor AD da saída dos sensores. Também foi implementado um filtro passa-baixas não inversor de ganho unitário para eliminar possíveis ruídos na referência e optou-se por separar as referências para os sinais de tensão e corrente onde V_{out} são equivalentes ACBIAS e BIAS respectivamente.

Para aquisição do sinal de tensão, foi implementado um filtro RC passa-altas com ganho unitário, cujo objetivo é remover possíveis níveis DC do sinal de entrada gerados por ruídos presentes no protótipo. Como a saída do transformador é de 9 V, foi necessário ajustar o ganho do filtro de modo que a amplitude do sinal fosse compatível com a tensão de referência do conversor AD. A Figura 13 mostra o filtro e o divisor de tensão implementados.

Figura 13 – Diagrama de Aquisição do Sinal de Tensão.



Fonte: Elaborada pela Autora.

Como mencionado o termo ACBIAS indica um nível de *offset* do circuito de ajuste de referência.

Considerando inicialmente $ACBIAS = 0$, as expressões para a função de transferência e a frequência de corte para o circuito utilizado são descritas a seguir.

$$H(j\omega) = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{R2}{R1 + R2 - jX_c} = \frac{1}{\left(1 + \frac{R1}{R2}\right) - \left(\frac{j}{\omega R2C}\right)}. \quad (3.7)$$

O ganho (G_v) é dado por

$$G_v(\omega) = \sqrt{\frac{1}{\left(1 + \frac{R1}{R2}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega R2C}\right)^2}}. \quad (3.8)$$

Para $\omega R2C \gg 1$, $\left(\frac{1}{\omega R2C}\right)^2 \simeq 0$

$$G_v(\omega) = \frac{R2}{R1 + R2}. \quad (3.9)$$

A frequência de corte para $G_v(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}}$, pode ser obtida por

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(1 + \frac{R1}{R2}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega R2C}\right)^2}}, \quad (3.10)$$

$$\left(\frac{1}{\omega R2C}\right)^2 = 2 - \left(1 + \frac{R1}{R2}\right)^2, \quad (3.11)$$

$$\omega_c = \frac{1}{R2C \cdot \sqrt{2 - \left(1 + \frac{R1}{R2}\right)^2}}, \quad (3.12)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R2C \cdot \left(\sqrt{2 - \left(1 + \frac{R1}{R2}\right)^2}\right)} = 1,23 \text{ Hz}. \quad (3.13)$$

Como descrito, para ajustar a amplitude do sinal de tensão em uma faixa compatível com a entrada do conversor, utilizou-se um divisor de tensão em que a razão de atenuação é dada por

$$V_m = \frac{R1}{R1 + R2} \cdot V_o = \frac{1}{13} \cdot V_o, \quad (3.14)$$

onde V_m é o sinal na entrada do conversor.

O cálculo da resolução para as medidas de tensão foi feito de forma análoga ao apresentado para as medidas de corrente. Inicialmente, calculou-se a resolução do conversor AD:

$$Res_{AD} = \frac{V_{REF(conversor)}}{2^{n-1}} = \frac{3,3 \text{ V}}{4095} = 805 \text{ } \mu\text{V}, \quad (3.15)$$

sendo Res_{AD} a resolução do conversor e $V_{REF(conversor)}$ a tensão de referência do conversor.

Considerando o valor máximo de saída do transformador igual a $9 V_{rms}$, o valor da tensão pico a pico é dado por

$$V_{pptrafo} = V_{strrafo} \cdot 2 \cdot \sqrt{2} = 9 \text{ V} \cdot 2 \cdot \sqrt{2} = 25,45 \text{ } V_{pp}. \quad (3.16)$$

Considerando o resultado apresentado na equação (3.13), verifica-se que para frequências acima da f_c , o ganho é aproximadamente, $R1/(R1+R2)$. Dessa forma,

$$V_e = V_{pptrafo} \cdot \frac{R1}{R1 + R2} = 1,96 \text{ } V_{pp}, \quad (3.17)$$

sendo V_e a tensão de pico a pico na entrada do conversor AD e $V_{pptrafo}$ a tensão de pico a pico na saída do transformador.

O fundo de escala digital pode ser determinado por,

$$Fe_{AD} = \frac{V_e}{Res_{AD}} = \frac{1,96 \text{ } V_{pp}}{805 \text{ } \mu\text{V}} = 2432 \text{ bits}. \quad (3.18)$$

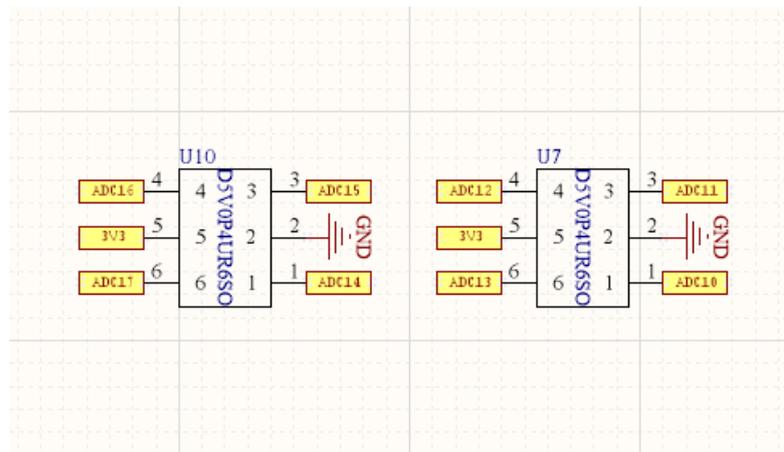
Dada a razão do transformador, o fundo de escala de tensão na entrada pode ser determinado como,

$$Res_{V_{entrada}} = \frac{127V \cdot 2 \cdot \sqrt{2}}{Fe_{AD}} = \frac{359,2V_{pp}}{2432bits} = 147,7 mV. \quad (3.19)$$

sendo $Res_{V_{entrada}}$ o fundo de escala da tensão de entrada, ou seja o menor valor que o protótipo é capaz de ler para o sinal de tensão, é de $147,7 mV$.

Para ambas as entradas foi implementado um circuito de proteção contra sobre-tensão para surtos transitórios (*Texas Instruments*, modelo D5V0P4UR6SO). Este CI é um diodo supressor de transientes de alta performance que protege até quatro canais de entrada. Sua corrente de proteção máxima para surtos é de 45 A para potências de até 180 W. Como esse CI está conectado diretamente com a alimentação do conversor, em caso de surtos transitório, o diodo supressor atua de maneira que o transitório é absorvido pela fonte de alimentação. O esquemático com a representação do componente utilizado é apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Circuito de Proteção para Transientes.



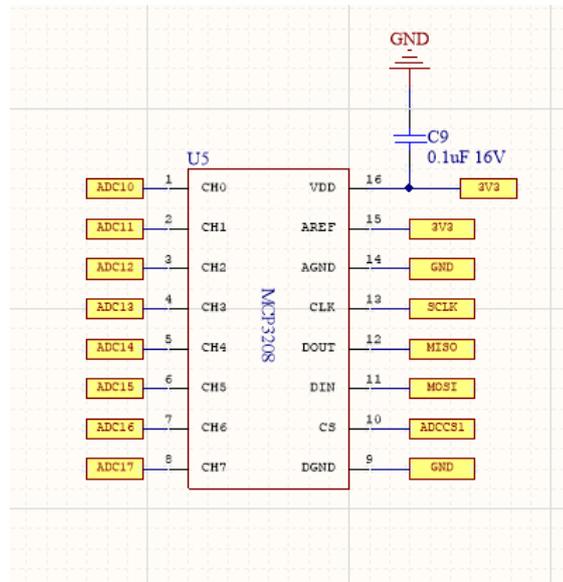
Fonte: Elaborada pela Autora.

Como já mencionado, o conversor MCP3208 é capaz de realizar leituras diferenciais de tensão. Nessa configuração, seria necessário utilizar dois canais de entrada para cada sensor, reduzindo assim o número de canais disponíveis pela metade. Pensando na possibilidade de se utilizar um número maior de sensores, optou-se por desenvolver um circuito com entradas simples (*single ended*).

Neste protótipo, foram utilizados dois conversores MCP3208, um destinado para a conversão dos sinais de corrente e outro para os sinais de tensão. Como o conversor não gera uma interrupção após o término de cada conversão (*data Ready*), utilizou-se o sinal de *enable* de cada conversor (*chip Select*) para definir o instante em que o conversor deveria iniciar a aquisição dos sinais. Os conversores foram ajustados para operar de modo alternado, ou seja, enquanto um conversor realizava a aquisição dos dados, o outro permanecia inativo.

A Figura 15 mostra o esquema de ligação do conversor MCP3208. É possível observar o capacitor de filtragem para eliminar possíveis transientes da alimentação do conversor.

Figura 15 – Circuito de Conexão do MCP3208.

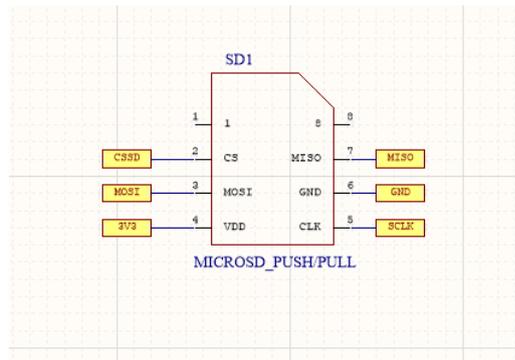


Fonte: Elaborada pela Autora.

Ao final da aquisição dos sinais de corrente e tensão, o ESP grava um arquivo .txt em um cartão de memória com as janelas amostradas, registrando o dia e horário da aquisição realizada.

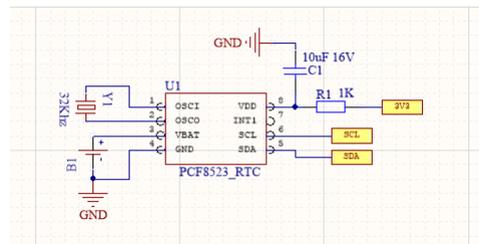
A gravação é realizada em um cartão do tipo SD, em formato FAT32 através do módulo cartão SD *card*. Para garantir uma maior confiabilidade nos horários registrados nas amostras, um relógio digital foi utilizado (NXP *Semiconductors*, modelo PCF8523). O PCF8523 é um dispositivo CMOS que possui relógio em tempo real e calendário, otimizado para operar com baixo consumo de energia. Os dados do CI são transferidos através do barramento I2C com uma taxa máxima de transferência de dados de 1000 *kbit/s*. O PCF8523 também possui um circuito de alternância e *backup* que detecta falha no sistema de alimentação, passando a utilizar uma bateria. A Figura 16 mostra o circuito do cartão de memória e a Figura 17 mostra o circuito do Relógio.

Figura 16 – Circuito do Cartão de Memória.



Fonte: Elaborada pela Autora.

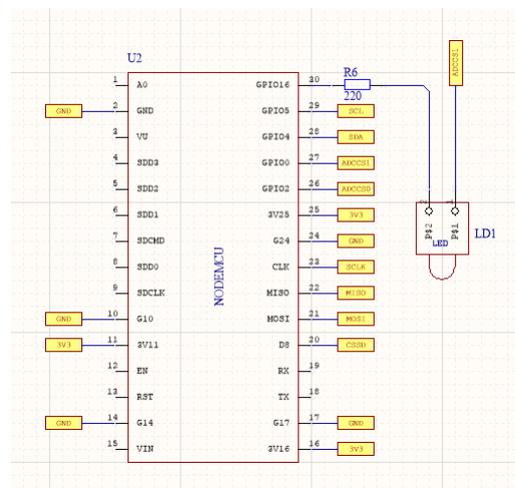
Figura 17 – Circuito de Conexão do Relógio.



Fonte: Elaborada pela Autora.

Por fim a Figura 18 mostra as conexões do circuito com o módulo *NodeMCU ESP-12E*.

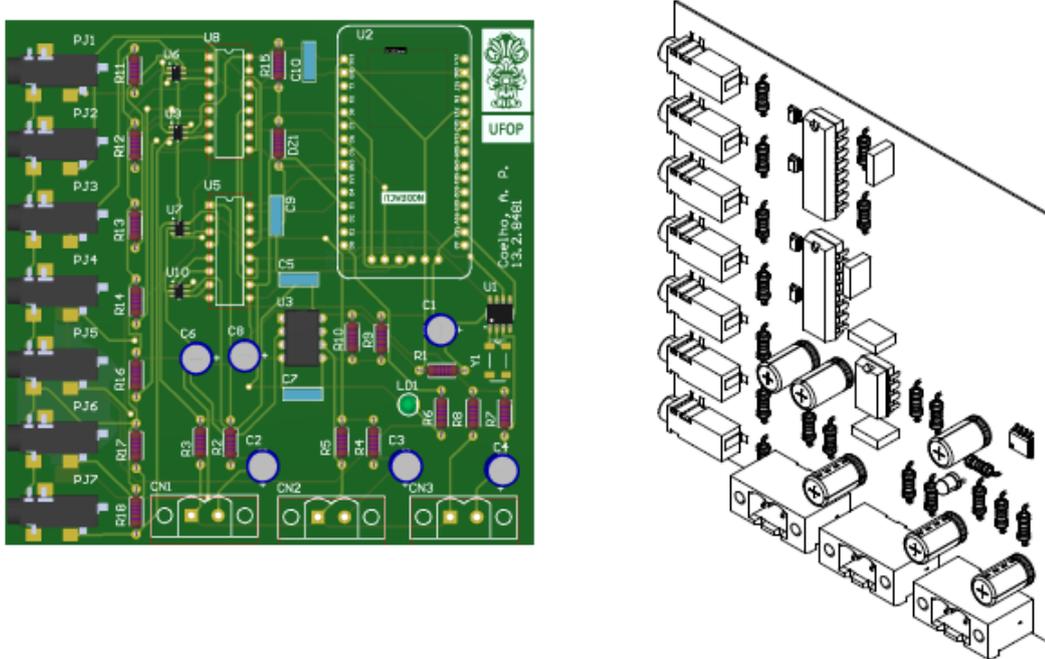
Figura 18 – Circuito ESP.



Fonte: Elaborada pela Autora.

A Figura 19 apresenta a vista superior e uma representação tridimensional da placa de circuito impresso (PCI) desenvolvida.

Figura 19 – Placa de Circuito Impresso.

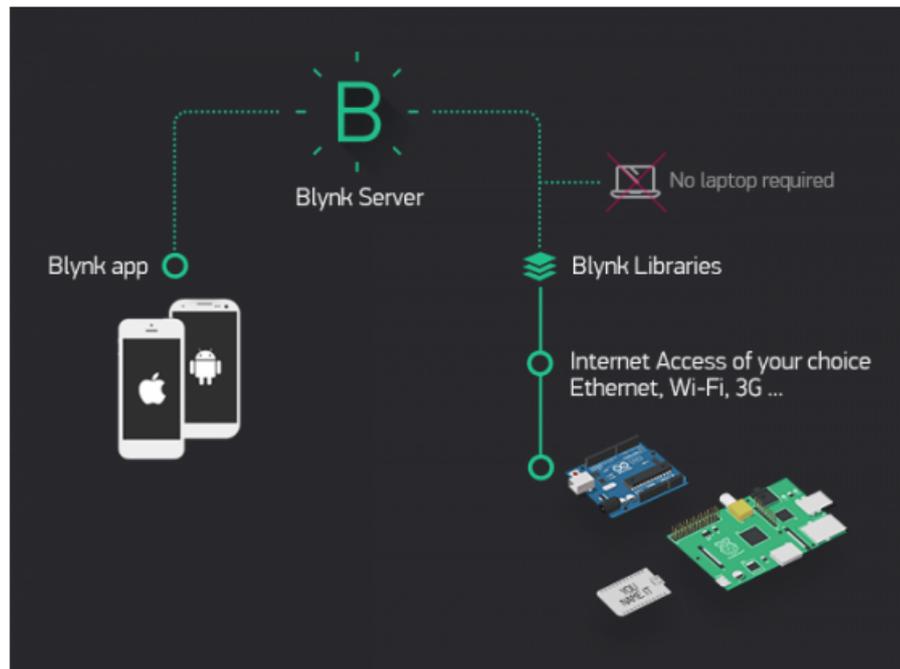


Fonte: Elaborada pela Autora.

3.6 Sistema Supervisório

O sistema supervisório desenvolvido para a comunicação com o microcontrolador ESP8266 foi baseado na aplicação *Blynk*, que é um serviço personalizável que permite construir interfaces capazes de controlar e monitorar um *hardware* remotamente de forma rápida e intuitiva através das plataformas *Android* e *iOS*.

Sua arquitetura é definida em três partes: aplicativo, servidor e bibliotecas. O aplicativo permite ao usuário configurar aplicações que interagem com o *hardware*. O servidor realiza toda comunicação entre o aplicativo e o *hardware* através da *cloud Blynk*, que é nuvem para armazenamento de dados desta aplicação. Além disso os dados armazenados no servidor *Blynk* podem ser acessados externamente através de uma API e protocolos *http*. As bibliotecas possuem funções que podem ser utilizadas para gerenciar toda a conexão do *hardware* com o servidor *Blynk*, tais como requisições de entrada e saída de dados e comandos. A Figura 20 mostra um diagrama com a arquitetura da aplicação (BLYNK, 2020).

Figura 20 – Arquitetura *Blynk*.

Fonte: Retirado de Blynk (2020)

O principais recursos fornecidos por esta aplicação são (BLYNK, 2020):

- Interface de programação de aplicativos (API) e interface do usuário (IU) semelhantes para todos os hardwares e dispositivos suportados;
- Conexão com a nuvem através de *Wi-Fi*, *Bluetooth*, *Ethernet*, *USB (Serial)* e *GSM*;
- Conjunto de *Widgets* fáceis de usar;
- Funcionalidade e configuração de pinos virtuais;
- Históricos de dados monitorados;
- Envio de *e-mails*, *tweets*, notificações *push*;

A Figura 21 mostra a interface desenvolvida de acordo com a proposta apresentada neste trabalho. Essa interface exibe sinais de corrente, tensão, potência ativa, potência reativa, potência aparente, fator de potência e taxa de distorção harmônica total.

Figura 21 – Interface do Supervisório.



Fonte: Elaborada pela Autora.

3.7 Processamento dos Sinais Adquiridos

Os dados obtidos usando o protótipo foram processados no módulo *NodeMCU* ESP-12E. A partir das amostras de tensão e corrente adquiridas, o programa desenvolvido calcula as potências ativa, reativa e aparente; tensão e corrente eficazes; fator de potência; e as primeiras 40 harmônicas da tensão e corrente elétrica.

3.7.1 Aquisição dos sinais

De acordo com os critérios apresentados anteriormente, a frequência mínima de amostragem para cada sinal deve ser de 4,8 kHz. No entanto, optou-se por trabalhar com uma frequência de amostragem de 12 kHz, o que significa que para cada amostra realizada, deve-se adquirir de 2400 a 3000 pontos para que sejam adquiridos entre 12 a 15 ciclos, respectivamente.

A escolha de separar os conversores para cada sinal permitiu que as referências de tensão para as medições também fossem separadas. Assim, flutuações e ruídos presentes na aquisição de um sinal, não influenciariam a aquisição do outro.

3.7.2 Cálculo das Potências e Taxa de Distorção Harmônica

Para determinar as potência ativa, reativa, aparente e fator de potência, os sinais amostrados foram processados como mencionado na seções 2.1.3 e 2.1.4.

Segundo PRODIST (2018), para determinar a taxa de distorção harmônica total, o espectro harmônico deve-se considerar no mínimo até a 40^a ordem harmônica. Considerando este fato, o custo computacional para o cálculo das componentes harmônicas a partir da transformada de Fourier de ambos os sinais é elevado. Considerando as limitações de processamento e memória do módulo *NodeMCU* ESP-12E, optou-se por utilizar o algoritmo de Goertzel, uma vez que as contribuições de frequências inter-harmônica são desprezadas.

O algoritmo de Goertzel é capaz de calcular o conteúdo espectral de uma única frequência sem a necessidade de calcular o espectro todo, diminuindo consideravelmente o volume de cálculos necessários, memória, processamento e custo computacional. O algoritmo de Goertzel foi utilizado para determinar o espectro harmônico das primeiras 40 harmônicas presentes nos sinais de corrente e tensão.

3.7.3 Tratamento dos Dados Adquiridos

Para enviar os dados calculados para a nuvem e exibi-los pelo supervisor, foi criado uma função para realizar a conexão com a nuvem, atribuindo as variáveis monitoradas aos pinos virtuais da aplicação *Blynk*.

Para gravar as amostras realizadas no cartão de memória, foi criado uma função que verifica a comunicação com o cartão e inicia o modo de escrita. Os dados são gravados em um arquivo .txt e para cada janela amostra, são informados ano, mês, dia, hora, minuto e segundo. Além disso estes dados são gravados em formato de um vetor compatível com a sintaxe do *software MatLab*.

3.8 Procedimento Experimental

Diante do cenário atual da pandemia, os experimentos para validação do sistema foram executados no Laboratório da Empresa DiElétrons Eletrônica Industrial LTDA, localizada no município de Belo Horizonte. Levando em consideração as limitações de equipamentos e da instalação da mesma, foram definidos dois experimentos para testar e validar o sistema de monitoramento desenvolvido.

No primeiro ensaio, analisou-se a resposta dos sensores para entradas conhecidas como descrito anteriormente. Para isso, utilizou-se um gerador de sinais (Minipa, modelo MFG-4201A) para excitação, e os sinais de saída dos sensores foram adquiridos através de um osciloscópio digital (Keysigth, modelo DSO1052B).

No segundo ensaio, analisou-se o sistema como um todo, em operação para cargas presentes no perfil residencial, como uma furadeira com controle de velocidade. Para avaliar o sistema de aquisição, os sinais foram adquiridos através do sistema proposto e também através de um osciloscópio digital. Os resultados obtidos são apresentados no capítulo 4.

4 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante os experimentos realizados para validação dos sensores e do medidor desenvolvido. A seção 4.1 apresenta o resultado dos testes de resposta em frequência dos sensores e a seção 4.2 apresenta os ensaios de validação do sistema de monitoramento de qualidade de energia elétrica.

4.1 Testes de Resposta em Frequência dos Sensores

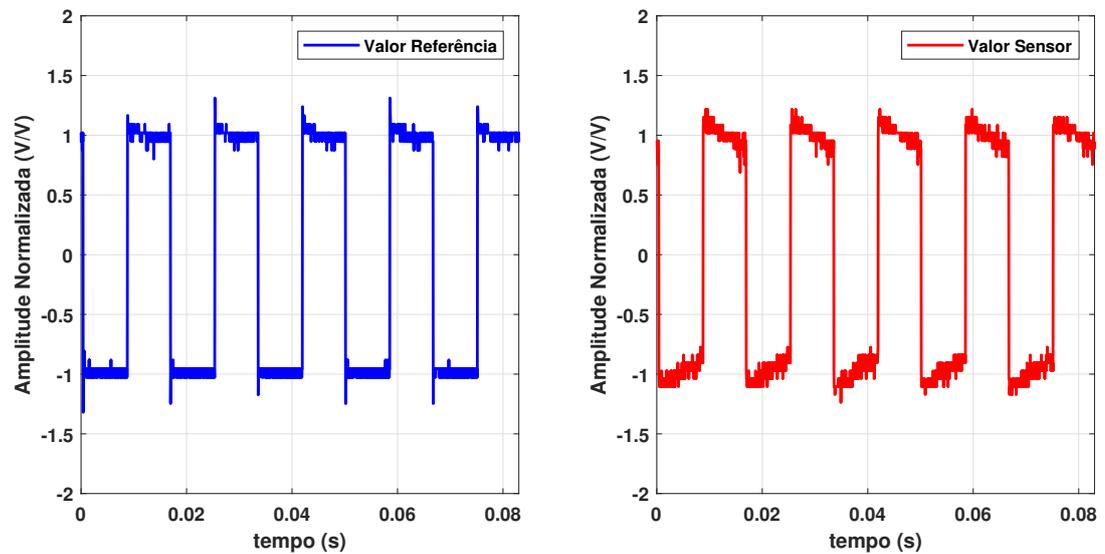
4.1.1 Sensor SCT-013

Utilizando o circuito apresentado na Figura 7, foram realizados quatro ensaios para verificar a resposta em frequência do sensor de corrente. Para isso, uma onda quadrada foi utilizada para controlar o chaveamento do MOSFET. A frequência fundamental da onda quadrada foi ajustada com os seguintes valores: 60 Hz, 180 Hz, 300 Hz e 420 Hz. Além disso, foram utilizadas três faixas de valores de corrente, ajustadas a partir da alteração do valor do resistor R_t . Os valores de R_t utilizados neste ensaio foram 0.1Ω , 10Ω e 100Ω .

Como condição de experimento, todos os teste foram realizados com os mesmos equipamentos, cabos e os mesmos componentes. Os ensaios foram realizados nas seguintes condições:

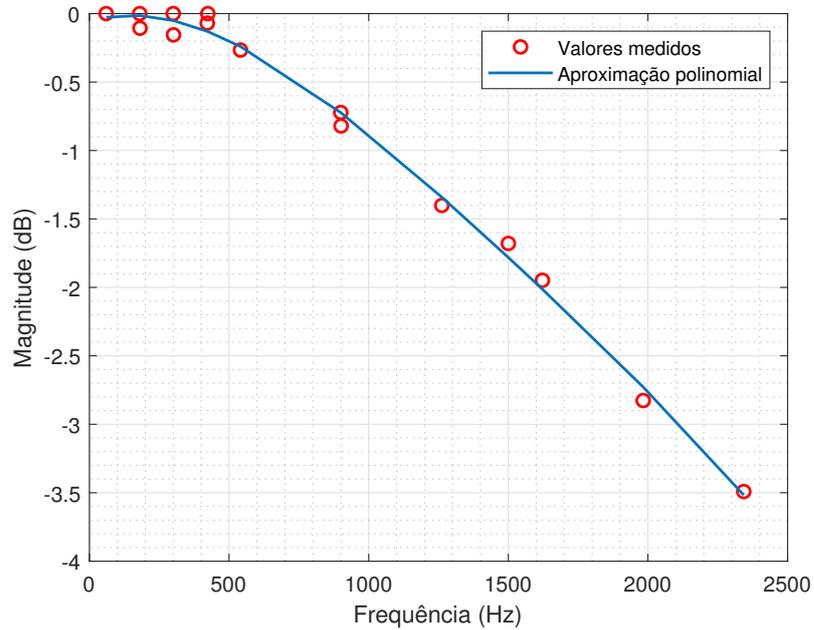
1. Todos os resistores utilizados para R_t são de 5 W com 5% de precisão;
2. Para melhorar o ganho sobre o sinal de corrente, o condutor que conecta R_t à fonte foi enrolado por cinco vezes em torno do sensor;
3. O osciloscópio foi configurado com acoplamento DC e as pontas de prova com ganho X10;
4. O gerador de sinais foi ajustado para um sinal de onda quadrada de 12 V_{pp};
5. A fonte DC teve seu valor ajustado de acordo com o valor de R_t utilizado. As tensões utilizadas foram: 3 V, para $R_t = 0.1 \Omega$; 7 V, para $R_t = 10 \Omega$ e 12 V, para $R_t = 100 \Omega$.

Os sinais adquiridos pelo osciloscópio foram salvos a partir de uma aplicação disponibilizada pelo fabricante e processados por um programa desenvolvido no *software* Matlab *Students* (versão gratuita disponível para estudantes). A Figura 22 mostra o comportamento típico dos sinais de saída do gerador (referência) e do sensor utilizado durante o ensaio. As amplitudes foram normalizadas para simplificar o processo de comparação.

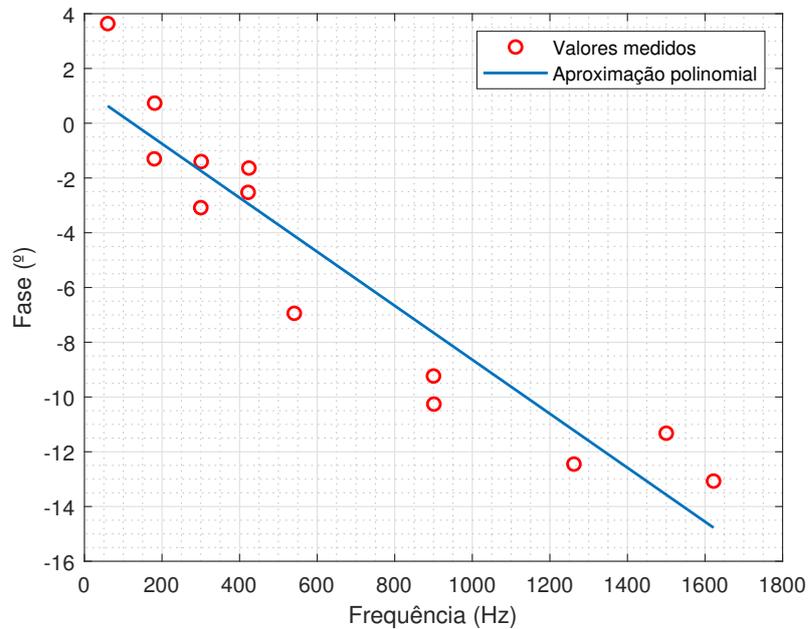
Figura 22 – Ensaio para Carga de $0,1 \Omega$ a Frequência de 60 Hz.

Fonte: Elaborada pela Autora.

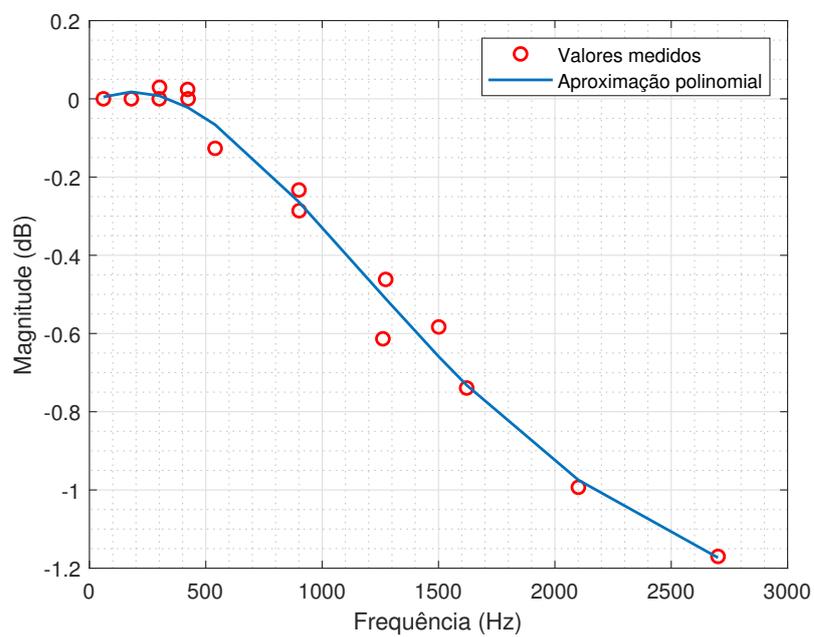
Para análise da resposta em frequência do sensor, os espectros de magnitude e fase dos sinais adquiridos foram representados. Considerando as limitações do teste, e assumindo que a relação sinal/ruído diminui para frequências muito altas, foi levantado a resposta do sensor para a frequência fundamental e para as três primeiras harmônicas ímpares de cada sinal adquirido. As Figuras 23 a 28 mostram os resultados obtidos. As magnitudes apresentadas foram normalizadas em função do valor de pico de cada uma das frequências fundamentais empregadas.

Figura 23 – Espectro de Magnitude para o sensor SCT-013 considerando $Rt = 0,1 \Omega$.

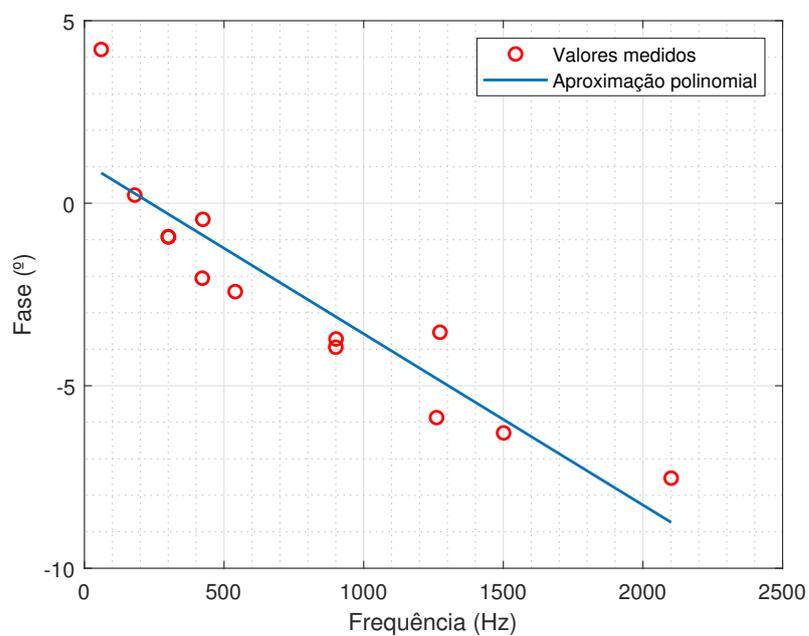
Fonte: Elaborada pela Autora.

Figura 24 – Fase Espectral para o sensor SCT-013 considerando $Rt = 0,1 \Omega$.

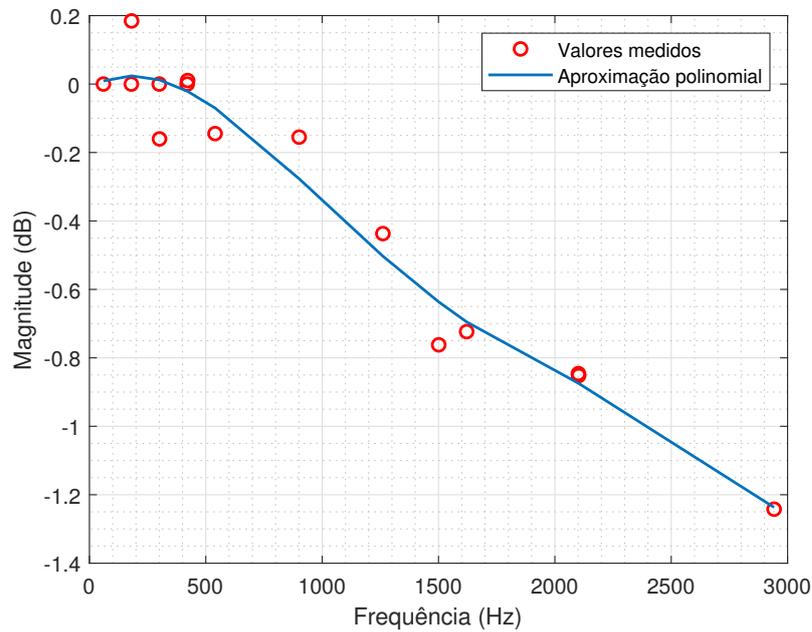
Fonte: Elaborada pela Autora.

Figura 25 – Espectro de Magnitude para o sensor SCT-013 considerando $Rt = 10 \Omega$.

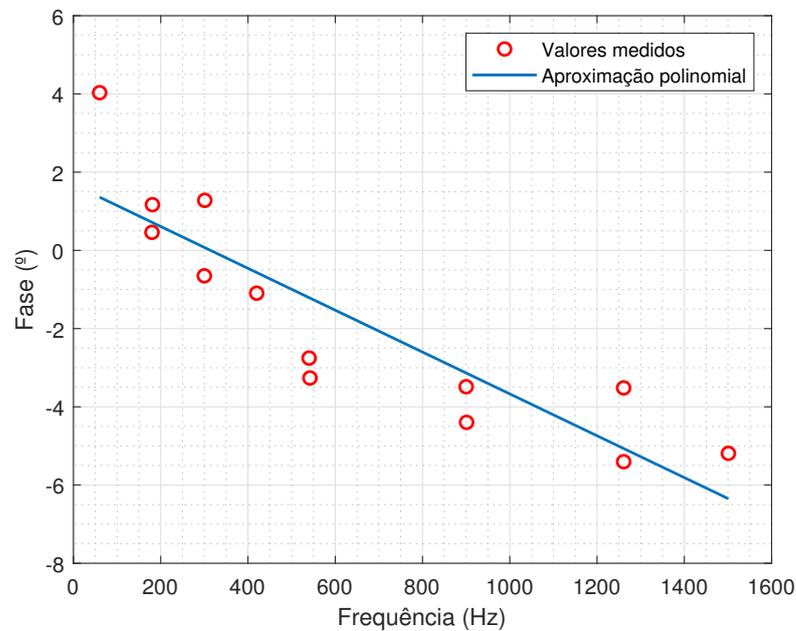
Fonte: Elaborada pela Autora.

Figura 26 – Fase Espectral para o sensor SCT-013 considerando $Rt = 10 \Omega$.

Fonte: Elaborada pela Autora.

Figura 27 – Espectro de Magnitude para o sensor SCT-013 considerando $Rt = 100 \Omega$.

Fonte: Elaborada pela Autora.

Figura 28 – Fase Espectral para o sensor SCT-013 considerando $Rt = 100 \Omega$.

Fonte: Elaborada pela Autora.

Os resultados apresentados mostram que o sensor possui comportamento semelhante ao de filtro passa-baixas, com uma frequência de corte de aproximadamente 2 kHz. Esses

valores estão de acordo com as especificações do fabricante, que garante o funcionamento adequado do sensor até 1 kHz. Em relação à fase espectral, pode-se dizer que o sensor apresentou uma resposta de fase linear dentro da faixa de passagem especificada pelo fabricante.

Os efeitos observados tanto na resposta de magnitude quanto na resposta de fase do sensor mostram que ele não poderia ser utilizado para o projeto de um medidor comercial, que necessariamente deveria atender as recomendações estabelecidas por PRODIST (2018), mas pode ser utilizado para aplicações mais simples, em que apenas o conteúdo das primeiras 16 harmônicas precisa ser analisado.

4.1.2 Transformador

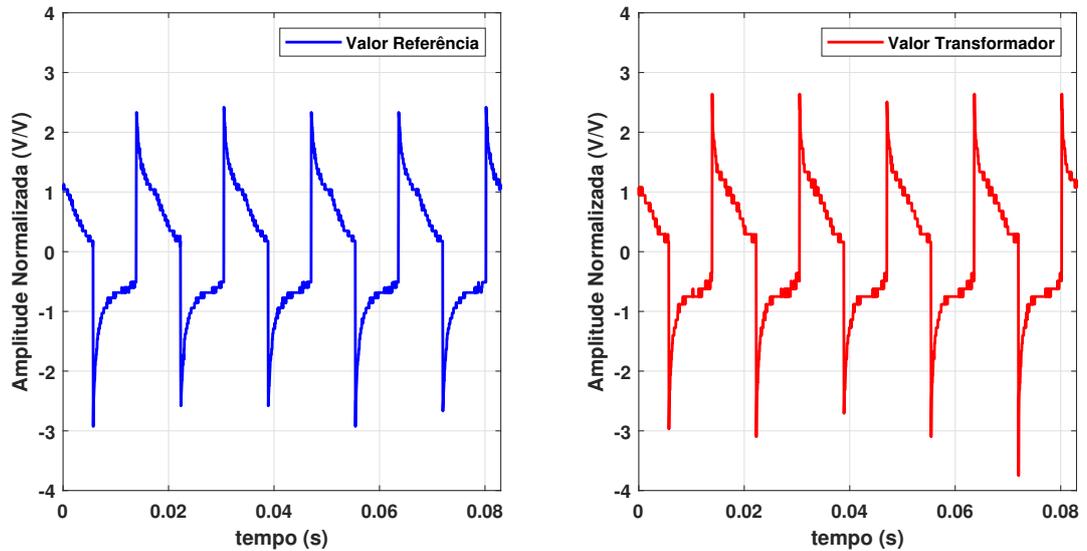
Utilizando o circuito apresentado na Figura 9, foram realizados ensaios para verificar a resposta em frequência do transformador. Para isso, aplicou-se na entrada do secundário do transformador (9 V) um sinal de onda quadrada, cuja frequência fundamental foi ajustada com os mesmos valores utilizados no ensaio do sensor de corrente. Posteriormente, utilizando um osciloscópio digital, foram adquiridos os sinais de saída no primário do transformador (127 V e 220 V). Como descrito anteriormente, esse procedimento foi adotado pois não havia uma fonte de tensão senoidal com tensões nominais de 127 V e 220 V com frequência ajustável a disposição no laboratório, mas havia pontas de prova com atenuação de 10X, que poderiam ser utilizadas para medir a tensão de saída do primário do transformador utilizado.

Como condição experimental, todos os teste foram realizados com os mesmos equipamentos, cabos e componente, e os ensaios foram realizados nas seguintes condições:

1. O osciloscópio foi configurado com acoplamento AC e as pontas de prova com ganho X10;
2. O gerador de sinais foi ajustado para um sinal de onda quadrada de 5,44 Vpp;

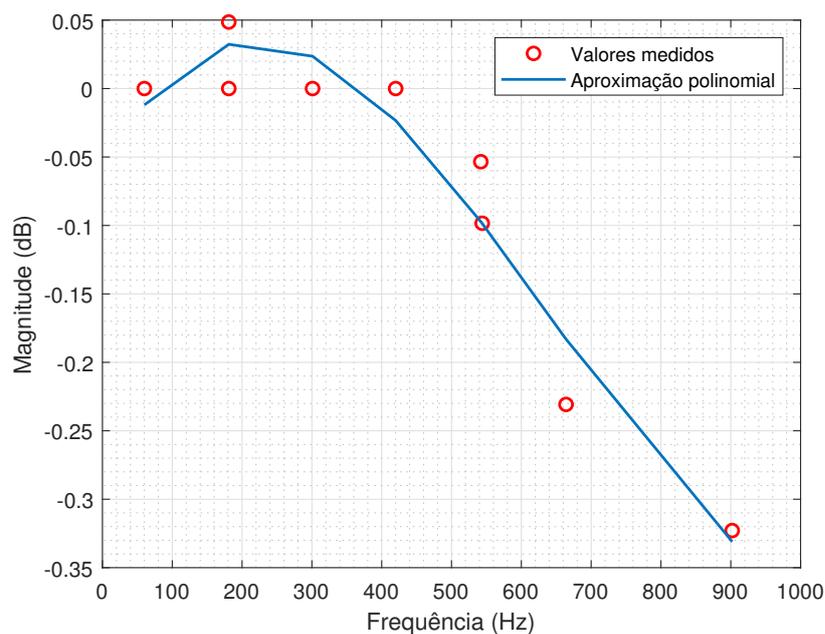
De maneira análoga ao sensor SCT-01, o transformador foi testado com o objetivo de avaliar sua resposta de magnitude e fase para frequências superiores ao valor indicado pelo fabricante. Os sinais adquiridos foram salvos e processador em Matlab. A Figura 29 apresenta uma forma de onda com as características típicas apresentadas pelo transformador e pelo sinal de referência para uma frequência de 60 Hz. As formas de onda foram normalizadas para facilitar o processo de comparação.

Figura 29 – Ensaio com Transformador a Frequência de 60 Hz 127 V.



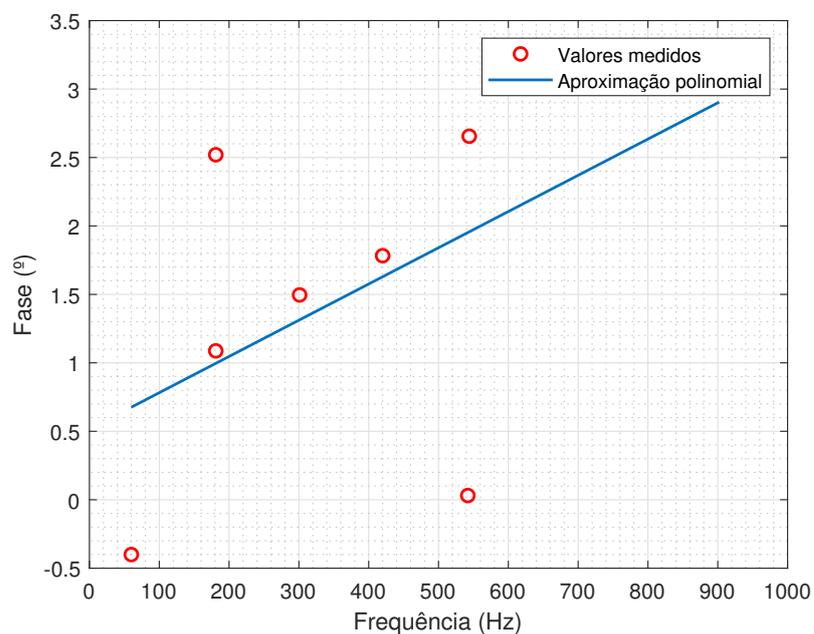
Fonte: Elaborada pela Autora.

Assim como no teste realizado para o sensor SCT-013 foram analisadas as respostas de magnitude e fase para o transformador, considerando as resposta do sensor para as frequência fundamentais empregadas. As Figuras 30 a 33 mostram o espectro de magnitude e fase dos sinais adquiridos. A magnitude foi normalizada em função do valor de pico de cada uma das frequências fundamentais empregadas.

Figura 30 – Espectro de Magnitude para o transformador, considerando $V = 127 V$.

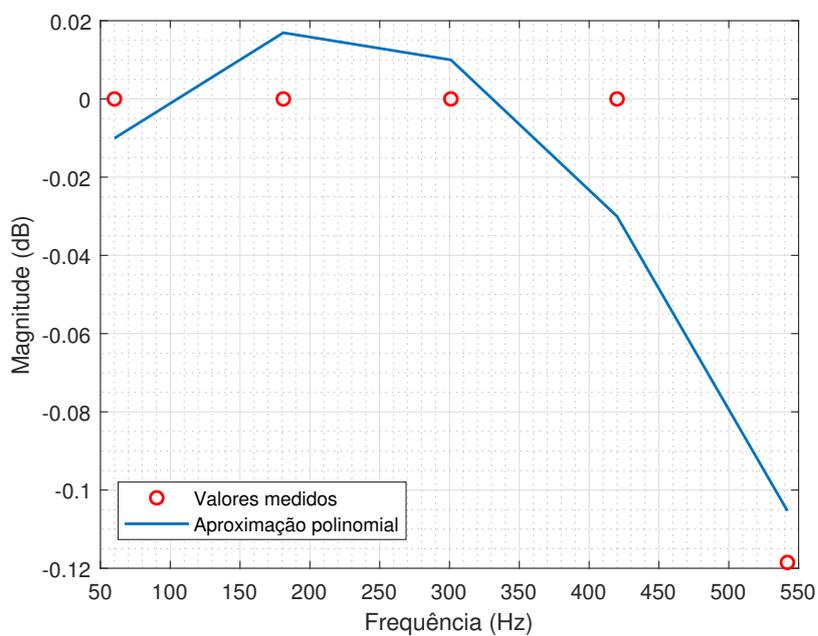
Fonte: Elaborada pela Autora.

Figura 31 – Fase Espectral para o transformador, considerando $V = 127 V$.

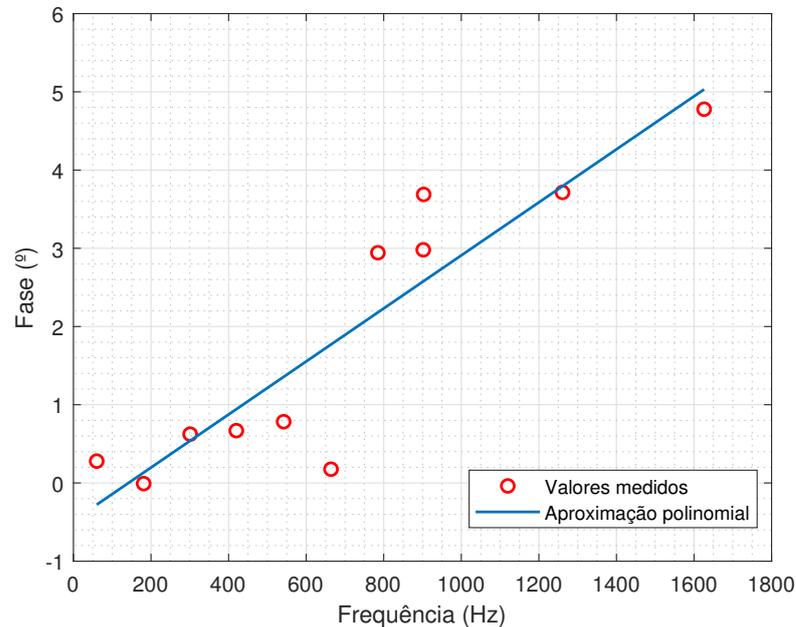


Fonte: Elaborada pela Autora.

Figura 32 – Espectro de Magnitude para o transformador, considerando $V = 220 V$.



Fonte: Elaborada pela Autora.

Figura 33 – Fase Espectral para o transformador, considerando $V = 220\text{ V}$.

Fonte: Elaborada pela Autora.

Ao analisar os resultados obtidos, nota-se que a resposta de magnitude e fase apresenta uma menor variação para valores de frequência de até 540 Hz. Acima dessa frequência, observa-se um aumento da variação desses valores que não foi provocado pelo sinal de tensão aplicado no transformador. Os resultados mostram que o dispositivo não pode ser utilizado para o projeto de um medidor comercial, que deverá ser homologado de acordo com as especificações definidas por PRODIST (2018). Entretanto, o transformador pode ser utilizado para realizar medições em sistemas mais simples, onde se deseja analisar apenas as primeiras 9 harmônicas.

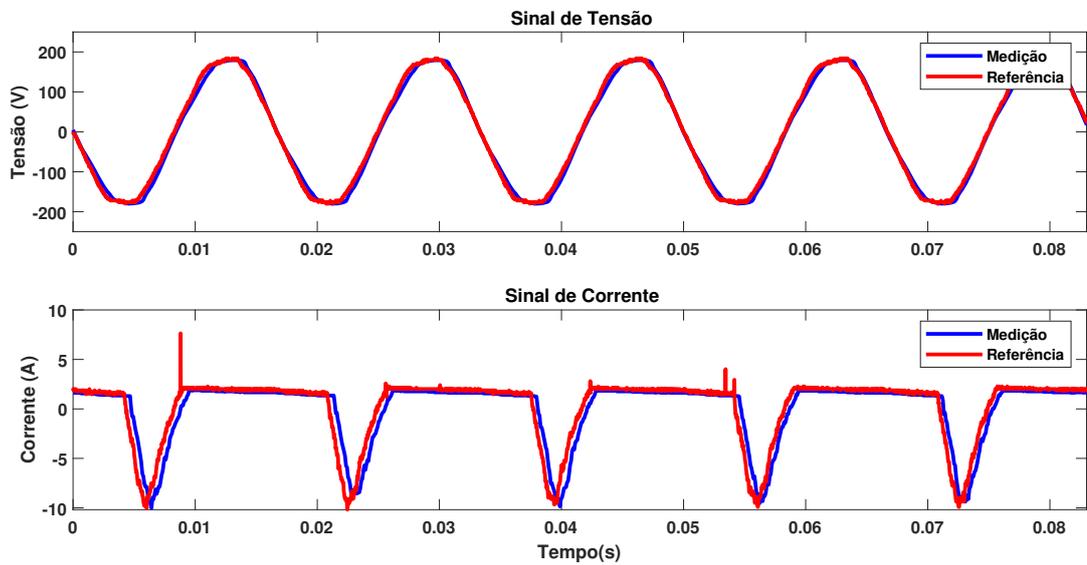
4.2 Validação do Sistema

A fim de analisar a resposta do sistema durante o monitoramento de cargas de perfil residencial, foram realizados ensaios com uma furadeira que possui controle de velocidade, em modos de operação distintos. Nos ensaios, foram realizadas comparações entre os resultados obtidos a partir da análise dos sinais adquiridos pelo sistema e pelo osciloscópio. Como condição de experimento, todos os teste foram realizados com os mesmos equipamentos.

Através de um programa desenvolvido no *software* Matlab *Students*, foram realizados vários testes, mas para discussão dos resultados será apresentado apenas um dos ensaios. Para os demais testes, os resultados obtidos foram semelhantes, com modificações apenas no espectro de magnitude e fase dos sinais analisados.

No ensaio apresentado, utilizou-se como carga do sistema uma furadeira manual com controle de velocidade (Bosch, modelo GSB 13 RE). A Figura 34 apresenta os sinais de tensão e corrente adquiridos ao longo do ensaio.

Figura 34 – Tensão e Corrente - Ensaio com a Furadeira.

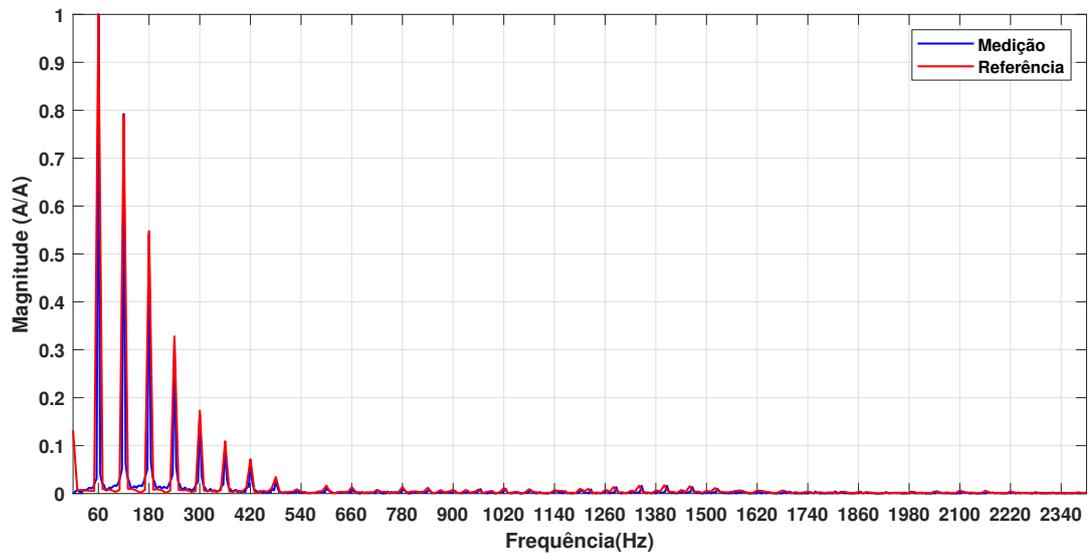


Fonte: Elaborada pela Autora.

Para o sinal de corrente, fica evidente um pequeno atraso de fase entre a referência e o sinal medido pelo sistema. Esse atraso pode ter sido provocado por alguma falha experimental.

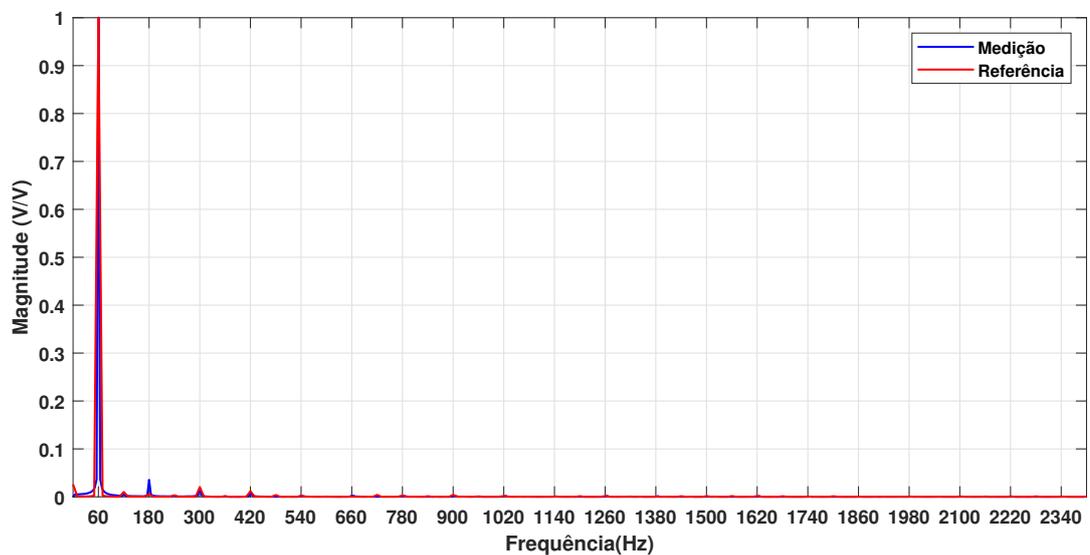
Os espectros de magnitude para os sinais de tensão e corrente referentes ao ensaio com a furadeira são apresentados nas Figuras 35, 36.

Figura 35 – Espectro de Magnitude para o Sinal de Corrente.



Fonte: Elaborada pela Autora.

Figura 36 – Espectro de Magnitude para o Sinal de Tensão.



Fonte: Elaborada pela Autora.

Os resultados obtidos a partir das análises espectral mostram que o sensor de corrente detecta componentes harmônicas acima de 1 kHz, mas devido a sua não linearidade e atraso de fase nessa faixa de operação, essas informações não podem ser consideradas.

O mesmo comportamento pode ser verificado a partir da análise dos espectros de magnitude dos sinais de tensão, que apresentam harmônicas de frequências superiores a

540 Hz que não podem ser consideradas nas análises devido as limitações do transformador utilizado.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos durante a análise dos sinais adquirido pelo osciloscópio (Referência) e pelo medidor (armazenados no cartão SD). Nos dois casos, os cálculos foram realizados no Matlab.

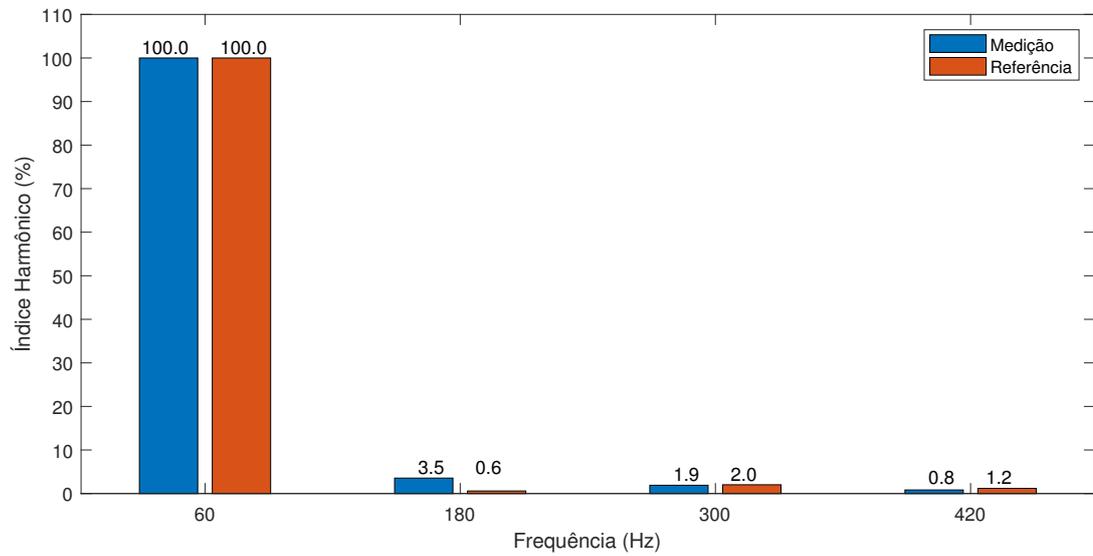
Tabela 2 – Análise comparativa entre os resultados obtidos a partir da análise dos sinais adquiridos pelo osciloscópio e pelo medidor.

	Referência	Medidor
Tensão rms	131,05 V	135,34 V
Corrente rms	7,70 A	7,45 A
Fator de Potência	0,57	0,57
Potência Ativa	579,6 W	576,7 W
Potência Reativa	825,84 Var	826,96 Var
Potência Aparente	1008,2 VA	1008,93 VA
$DHT_i\%$	104	103,2
$DHT_V\%$	2,8	4,2

Fonte: Elaborada pela Autora.

Observando os resultados do ensaio, fica perceptível uma discrepância maior obtida para o sinal de tensão entre a referência e o medidor. Tal fato pode ser explicado pela equação (2.1), pois para determinar o valor eficaz do sinal de tensão são considerados as contribuições das amplitudes dos sinais harmônicos presentes no sistema. A Figura 37 apresenta um histograma com a magnitude normalizada para os sinais de tensão da furadeira, considerando frequências de até 420 Hz. Como é possível verificar, o sinal adquirido pelo osciloscópio não apresentava a 3ª harmônica, e isso provavelmente se deve a algum problema experimental. Portanto a diferença obtida mostra-se coerente com esta o resultado obtido.

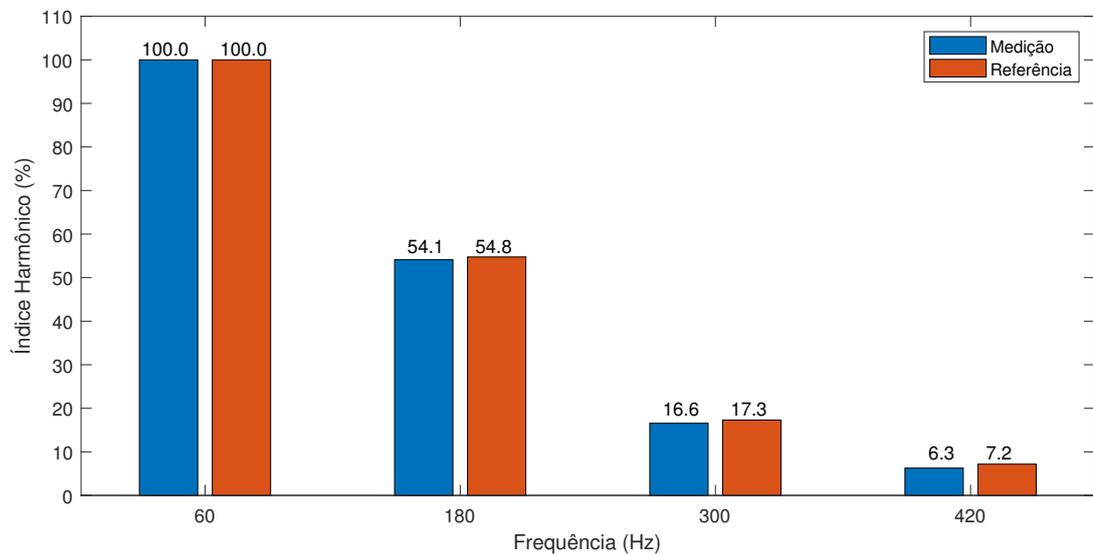
Figura 37 – Harmônicas Ímpares de Corrente - Ensaio com a Furadeira.



Fonte: Elaborada pela Autora.

A Figura 38 apresenta um histograma com a magnitude normalizada para os sinais de corrente da furadeira, considerando frequências até 420 Hz.

Figura 38 – Harmônicas Ímpares de Corrente - Ensaio com a Furadeira.



Fonte: Elaborada pela Autora.

Nota-se que os resultados apresentados na Figura 38 são semelhantes, comprovando que o algoritmo de Goertzel implementado no sistema embarcado está realizando os cálculos de maneira correta.

Os resultados obtidos indicam que o sistema embarcado desenvolvido funciona corretamente, mas está limitado pelos sensores de tensão e corrente escolhidos para a construção do sistema.

Durante os ensaios, tanto o sistema de armazenamento de dados em cartão SD quanto o sistema de comunicação *Wi-Fi* funcionaram corretamente. A vantagem de se utilizar a comunicação sem fio é que pode-se recuperar os dados medidos sem a necessidade de se manipular o cartão de memória, tornando o processo mais simples.

O relógio digital utilizado mostrou-se uma ferramenta fundamental para esse tipo de aplicação, pois através de suas informações foi possível organizar os arquivos criados e adicionar *tags* para delimitar data e hora de cada aquisição.

A opção por se utilizar o algoritmo de Goertzel para cálculos de magnitude e fase foi importante, pois permitiu que um microcontrolador de baixo custo pudesse ser utilizado para controlar o sistema de aquisição e processamento dos sinais coletados pelo medidor.

Pode-se dizer que apesar de não ser uma ferramenta indispensável, a utilização de um sistema supervisor simplifica a tarefa de monitoramento em tempo real. Além disso, o fato de o medidor possuir uma comunicação sem fio permite que o dispositivo possa ser instalado em locais de difícil acesso e monitorado a distância através de um celular com sistema Android.

Finalmente, A Tabela 3 traz um comparativo do medidor desenvolvido com os principais analisadores de qualidade de energia elétrica disponíveis no mercado.

Tabela 3 – Comparativo das Características dos Analisadores.

	FLUKE 435 Série II	PQUBE 3	Kit DMI T5T	Protótipo
Equipamento:				
Trifásico	sim	sim	sim	não
Faixa de medição de tensão	1 até 1000V	0 até 900 V	1V até 440V	0 até 127V
Faixa de medição de corrente	0,5A até 6000A	1A até 6000A	1A até 200A	0 até 30 A
Acurácia	5%	0,2%	1%	não determinado
Taxa de amostragem	500 amostras por ciclo	512 amostras por ciclo	15 mil amostras por segundo	2800 amostras por ciclo
Conversor analógico	16 bits	16 bits	Não fornecido pelo fabricante	12 bits
Capacidade de identificar harmônicos h	até a 50ª ordem	até a 50ª ordem	até a 31ª ordem	9ª ordem
Calcula a distorção harmônica total de tensão e corrente	sim	sim	sim	sim
Outros indicadores de qualidade da energia	Afundamentos, flutuações de tensão e desequilíbrios de tensão	Sobretensões, afundamentos, interrupções, variações de frequência, impulsos de alta frequências	Flutuações de tensão	não
Cartão de Memória	sim	não informado pelo fabricante	sim	sim
Comunicação Ethernet	sim	sim	sim	sim
Fonte	(FLUKE, 2018)	(PSL, 2018)	(ISSO, 2018)	Autora

Fonte: Elaborada pela Autora.

Apesar do analisador desenvolvido não atender aos requisitos recomendados pelo procedimento PRODIST (2018) para análises monofásica, o protótipo reúne um conjunto de características desejáveis com um custo mais acessível.

5 Considerações Finais

Neste trabalho foi desenvolvido um medidor de qualidade de energia elétrica monofásico. O protótipo é capaz de monitorar tensões e correntes em tempo real, além de monitorar potência ativa, reativa e aparente, fator de potência e taxa de distorção harmônica total para corrente e tensão.

Os resultados obtidos indicam que os sensores escolhidos não podem ser utilizados para o desenvolvimento de um medidor comercial, que deveria ser capaz de monitorar as 40 primeiras harmônicas. Esses sensores apresentam resposta em frequência limitada e provocam alterações na magnitude e fase para frequências superiores a 540 Hz (transformador) e 1 kHz (sensor de corrente) de modo que seria possível medir corretamente apenas as primeiras 9 harmônicas (limitação do transformador).

É importante ressaltar que o sistema de aquisição proposto pode ser utilizado em conjunto com sensores de melhor qualidade. Dessa forma, seria possível utilizar o sistema embarcado desenvolvido, desde que os sensores de tensão e corrente fossem substituídos por dispositivos com uma resposta em frequência em conformidade com as exigências das definidas por IEEE-519 (2014) e PRODIST (2018).

O microcontrolador adotado mostrou-se capaz de processar os sinais adquiridos em tempo real. Além disso, o fato de apresentar um módulo de comunicação *Wi-Fi* integrado simplificou o processo de comunicação do medidor com o sistema *Android*.

A aplicação *Blynk*, adotada para o desenvolvimento do sistema supervisorio, apresenta os resultados de maneira objetiva e pode ser programada de forma simples. Entretanto, trata-se de uma aplicação comercial, que tem uma quantidade limitada de recursos gratuitos.

Finalmente, foi possível observar que o equipamento desenvolvido apresenta características limitadas em relação aos Analisadores de Qualidade de energia presentes no mercado, mas apresenta baixo custo, pode ser melhorado através da substituição dos sensores escolhidos por sensores de melhor qualidade e é customizável, de forma a atender necessidades específicas de uma dada aplicação.

5.1 Propostas para trabalhos futuros

Como sugestão de continuidade:

1. Validar o sistema desenvolvido em laboratórios adequados, caracterizando incertezas, precisão e exatidão do protótipo.
2. Alterar os sensores utilizados, tornando possível monitorar outras faixas de frequências.

3. Desenvolver uma interface configurável a partir do supervisor, para que o sistema possa operar com os sensores de sua escolha, sem a necessidade de recalibração do sistema.
4. Expandir o protótipo para monitorar sistemas trifásicos a partir da placa desenvolvida, fazendo ajustes apenas no *software*.

Referências

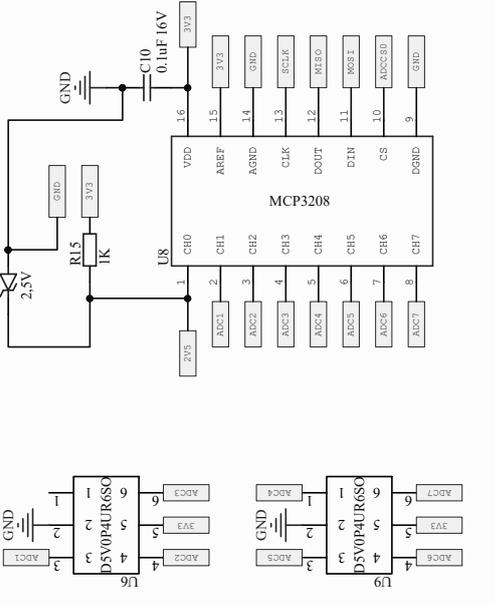
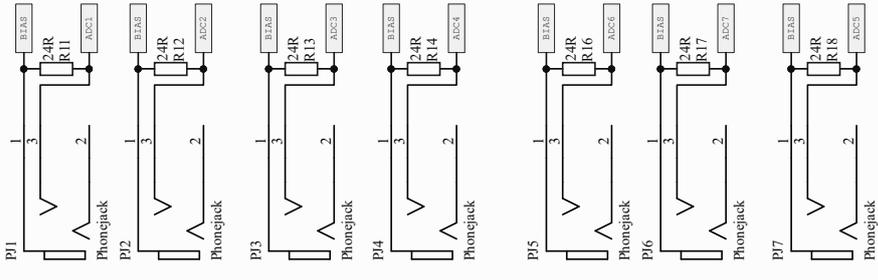
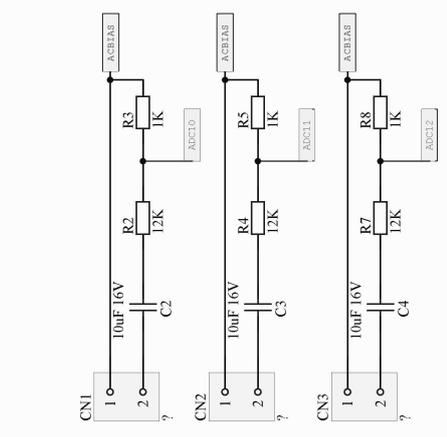
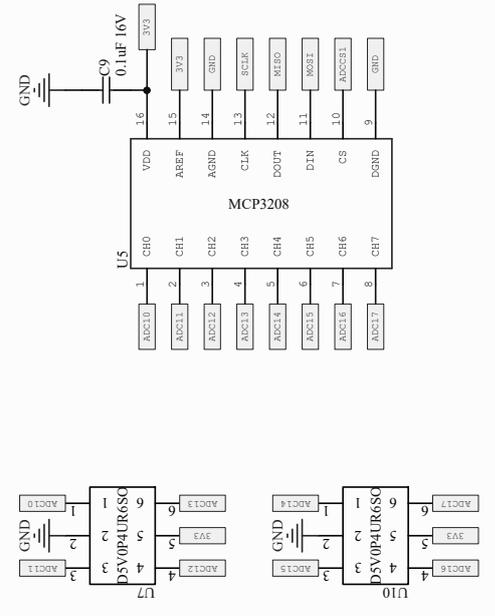
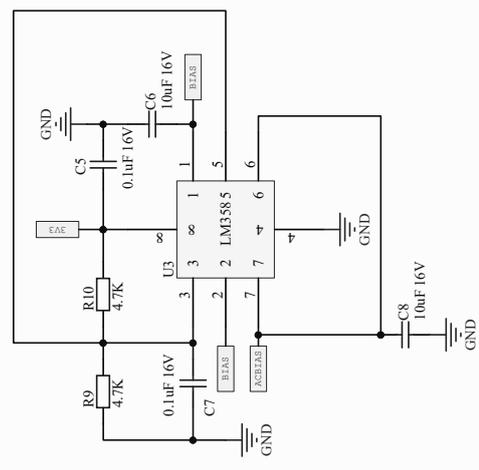
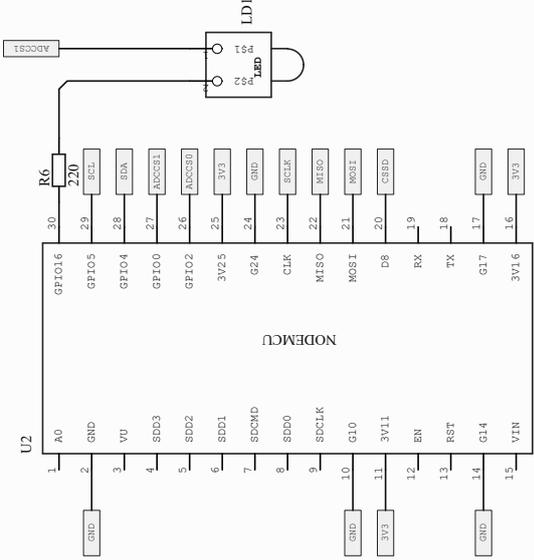
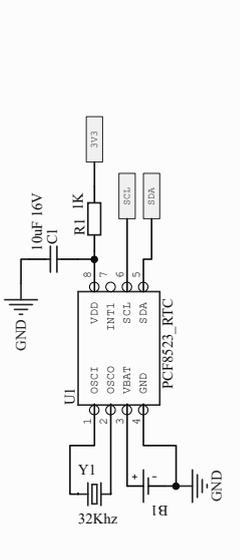
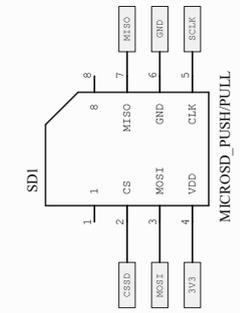
- AGUIRRE, L. A. *Fundamentos de Instrumentação*. 1ª. ed. São Paulo: PEARSON, 2013. 1-354 p. 1, 2, 13
- ANEEL. Energia no brasil e no mundo. In: *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. Brasília: [s.n.], 2008. p. 236. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap2.pdf>. 1
- ANEEL. Revisão da regulamentação sobre a qualidade do produto no sistema de distribuição de energia elétrica. In: . Brasília: [s.n.], 2011. p. 236. 16, 17
- ARENAS, L. A. d. O. *Medidor Inteligente de Energia Elétrica Embarcado em FPGA*. 143 p. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, Ilha Solteira, 2019. 3, 7, 14
- BACARU, R. M. *Medidor de Energia Inteligente para Discriminação de Consumo por Aparelho Através de Assinatura de Carga*. 114 p. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, Campinas, 2014. 3
- BACK, J. A. *Desenvolvimento de um sistema embarcado voltado ao gerenciamento de energia elétrica em processos industriais*. 141 p. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL, Santa Cruz do Sul, 2012. 2, 7
- BLYNK. *How Blynk Works*. 2020. Last accessed 14 set. 2020. Disponível em: <<https://docs.blynk.cc/>>. 33, 34
- BOLLEN, M. H. *Understanding Power Quality Problems*. 1ª. ed. Gothenburg: Wiley, 2000. 543 p. 6, 7
- DECKMANN S. M; POMILIO, J. A. Distorção harmônica: causas, efeitos, soluções e normas. In: *Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica*. [S.l.]: UNICAMP, 2013. v. 5, p. 49. 9
- DUARTE, L. F. C. *Sistema não Invasivo de Monitoramento de Consumo de Energia Elétrica Baseado em Conjuntos Nebulosos*. 103 p. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, CAMPINAS, 2015. 3
- ESPRESSIF. *Datasheet Espressif Smart Connectivity Platform: ESP8266*. China: [s.n.], 2013. 23 p. Last accessed 11 set. 2020. Disponível em: <<https://www.electroschematics.com/wp-content/uploads/2015/02/esp8266-datasheet.pdf>>. 23, 24
- ESTEVEES. *Datasheet Ficha Técnica de Produto Transformador*. 2015. 2 p. Last accessed 20 set. 2020. Disponível em: <<http://www.eletronicaesteves.com.br/pdf/trafo/300ma9vst.pdf>>. 22
- FILHO, J. M. *Instalações Elétricas Industriais*. 5ª. ed. Rio de Janeiro: LCT, 2002. 9
- FLUKE. *Analizador de Qualidade de Energia Fluke 435 série II*. 2018. Last accessed 10 jun. 2020. Disponível em: <<http://www.fluke.com/fluke/brpt/ferramentas-de-qualidade-de-energia/logging-power-meters/fluke-435-series-ii.htm?pid=73939>>. 4, 51

- HIGUTI, R. T. *Notas de Aula Processamento Digital Análise Espectral Usando a DFT*. 1999. 14 p. Unesp. 13
- HIGUTI, R. T. *Notas de Aula Processamento Digital de Sinais Série e Transformada Discreta de Fourier*. 1999. 21 p. Unesp. 11, 12
- IEEE-519. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems IEEE Power and Energy Society*. New York, 2014. Único, 17 p. 6, 9, 10, 13, 53
- INMETRO. *Guia para a expressão de incerteza de medição*. Rio de Janeiro, 2008. 141 p. 17
- INMETRO. *Vocabulário Internacional de Metrologia*. Rio de Janeiro, 2012. 95 p. 17
- ISSO. *Kit DMI T5T - 200A*. 2018. Last accessed 19 ago. 2020. Disponível em: <http://issotecnologia.com/produtos/87/kit_dmi_t5t_200a>. 4, 51
- LEAO R. P. S.; SAMPAIO, R. F. A. F. L. M. *Harmônicos em sistemas elétricos*. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. 354 p. 9, 10
- Microchip Technology Inc. *Datasheet 2.7V 4-Channel/8-Channel 12-Bit A/D Converters with SPI Serial Interface*. EUA: [s.n.], 2008. 40 p. Last accessed 07 set. 2020. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21298e.pdf>>. 25
- NILSSON JAMES W.; RIEDEL, S. A. *Circuitos Elétricos*. 8ª. ed. São Paulo: Pearson, 2009. 592 p. 9
- ONS. *Previsões de carga para a 2ª Revisão Quadrimestral da Carga 2020 – 2024*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2020. 2 p. Last accessed 07 ago. 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/revisoes-quadrimestrais-da-carga>>. 1
- OPPENHEIM ALAN V.; SCHAFER, R. W. *Processamento em Tempo Discreto de Sinais*. 3ª. ed. São Paulo: PEARSON, 2013. 657 p. 10, 12, 13, 14, 15, 16
- PRODIST. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica*. Revisão 10. Brasília, 2018. 88 p. 4, 7, 8, 9, 16, 19, 20, 25, 36, 43, 46, 52, 53
- PSL. *No TitlePQube 3*. 2018. Last accessed 23 jun. 2020. Disponível em: <<https://www.powerstandards.com/product/pqube-3/highlights/>>. 4, 51
- STIMA, E. “Novo normal” pós Covid-19 acelerará mudanças no consumo de energia elétrica? 2020. Last accessed 30 ago. 2020. Disponível em: <<https://stimaenergia.com.br/index.php/novo-normal-poscovid-acelarara-consumo-energia-eletrica/>>. 1
- TECHNOLOGY, H. *ESP8266 NodeMCU WiFi Devkit v1.2*. 2020. 22 p. Last accessed 23 agos. 2020. Disponível em: <http://www.handsontec.com/pdf_learn/esp8266-V10.pdf>. 24
- UFU. *Relatório Técnico 3/8: Definição dos procedimentos de medição - Distorções harmônicas, Desequilíbrios de Tensão, Flutuações de Tensão e Variações de Tensão de Curta Duração*. Uberlândia: FAU (Fundação de Apoio Universitário), 2014. 101 p. 10, 17

XAVIER, M. V. E. *Sistema de Monitoramento de Alto Desempenho da Qualidade da Energia Elétrica*. 133 p. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte, 2016. 3, 4, 6, 7

YHDC. *Datasheet Split-Core Current Transformer*. China: [s.n.], 2015. 1 p. Last accessed 15 set. 2020. Disponível em: <https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/Datasheet_SCT013.pdf>. 20

A Apêndice A - Circuito Desenvolvido





TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Projeto de um sistema para medição de consumo e análise da qualidade da energia elétrica para sistemas monofásicos” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 28 de outubro de 2020.

Anatércia Pinto Coelho