

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

JOSUÉ PEIXOTO DA SILVA MODESTO

MEDIDOR DE QUALIDADE DE ENERGIA BASEADO EM INTERFACE *LABVIEW*

Leopoldina

2026

JOSUÉ PEIXOTO DA SILVA MODESTO

MEDIDOR DE QUALIDADE DE ENERGIA BASEADO EM INTERFACE *LABVIEW*

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Leopoldina, como parte do requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Laércio Simas Mattos
Coorientador: Prof. Dr. Deilton Gonçalves
Gomes

Leopoldina

2026

Modesto, Josué Peixoto da Silva.
M691m Medidor de qualidade de energia baseado em interface *labview*. / Josué Peixoto da Silva Modesto. – 2026.
94 f. : il., gráfs.
Orientador: Laércio Simas Mattos.
Coorientador: Deilton Gonçalves Gomes.
Bibliografia: f.88-90.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, *Campus* Leopoldina, apresentada a curso de Engenharia de Controle e Automação. Departamento de Eletroeletrônica, 2026.
1. Energia elétrica. 2. Qualidade. 3. Medidas elétricas. 4. Equipamentos de medidas elétricas. 5. Interface homem-computador. I. Mattos, Laércio Simas. II. Gomes, Deilton Gonçalves. III. Título.
CDU: 621.311

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Luzia Adriana Damasceno,
CRB 6º - 2305 / CEFET-MG *campus* Leopoldina.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO - LP



FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC N° 8/2026 - CECALP (11.51.20)

N° do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO

Leopoldina-MG, 18 de junho de 2026.

JOSUÉ PEIXOTO DA SILVA MODESTO

MEDIDOR DE QUALIDADE DE ENERGIA BASEADO EM INTERFACE LABVIEW

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Leopoldina, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em 19 de junho de 2026.

Banca Examinadora:

Prof. D. Sc. Laércio Simas Mattos (CEFET-MG) - Presidente
Prof. D. Sc. Deilton Gonçalves Gomes (CEFET-MG)
Prof. M. Eng. Ricardo Henrique Rosembach (CEFET-MG)
Prof. D. Eng. Raphael Paulo Braga Poubel (CEFET-MG)

**Leopoldina
2026**

(Assinado digitalmente em 30/06/2026 18:55)

DEILTON GONCALVES GOMES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEE (11.56.08)
Matrícula: ###799#4

(Assinado digitalmente em 30/06/2026 15:53)

LAERCIO SIMAS MATTOS
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEELP (11.61.04)
Matrícula: ###729#3

(Assinado digitalmente em 22/06/2026 07:52)

RAPHAEL PAULO BRAGA POUBEL
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEE (11.56.08)
Matrícula: ###934#7

(Assinado digitalmente em 26/06/2026 14:51)

RICARDO HENRIQUE ROSEMBACH
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEELP (11.61.04)
Matrícula: ###753#3

Processo Associado: 23062.031370/2026-15

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **8**, ano: **2026**, tipo:
FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC, data de emissão: **18/06/2026** e o código de verificação: **612f920468**

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por me conceder graça, saúde e forças para ter condição de concluir essa grande etapa. A minha esposa Karoline e meus filhos Asaph e Sophia por serem minha grande inspiração diária. Aos meus pais Jurandir e Elenilda, que sempre me incentivaram e apoiaram em toda caminhada. Aos meus irmãos e a todos os meus familiares pela torcida e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS, por me conceder saúde, força e iluminado meu caminho durante toda essa jornada, me proporcionando a benção de concretizar esse sonho, me capacitando a cada dia, tornando possível vencer cada etapa e obstáculos que estiveram durante a caminhada.

Agradeço a minha esposa Karoline pelo carinho, paciência, companheirismo e principalmente por todo amor proporcionado em todos os momentos, na qual sempre me apoiou, incentivou e me ajudou em cada instante. Aos meus filhos Sophia e Asaph por serem minha inspiração diária. A todos os meus familiares, que contribuíram para a realização deste sonho.

Aos meus pais Jurandir da Silva Modesto e Elenilda Peixoto da Silva Modesto por todo apoio incondicional, incentivo, suporte e dedicação oferecidos em todos os dias de minha vida. Ao meu irmão Lucas, pela parceria, companheirismo e amizade, por me apoiar e vivenciar comigo todos os momentos difíceis desta jornada. E a minha irmã Eyshila, que sempre foi uma apoiadora e incentivadora, que sempre ficou na torcida para que pudesse vencer cada passo, sempre disposta a me ajudar no que fosse preciso.

Agradeço a todos os professores do curso de Engenharia de Controle e Automação, por todo apoio, conhecimento fornecido e incentivo diário. Em especial, sou muitíssimo grato aos meus orientadores Laércio Simas Mattos e Deilton Gonçalves Gomes pela orientação, por todo apoio, prontidão, incentivo diário e todo suporte necessário para realização deste trabalho.

Agradeço a todos amigos que fiz na graduação, por todos anos de estudos vividos nessa jornada.

“Sabemos que todas as coisas cooperam para o bem daqueles que amam a Deus, daqueles que são chamados segundo o seu propósito.”

Romanos 8:28.

RESUMO

A energia elétrica se tornou, ao longo dos anos, um dos recursos importantes para o desenvolvimento da sociedade moderna. Com a demanda crescente por energia elétrica, em meio ao avanço tecnológico, torna-se essencial garantir a qualidade e a confiabilidade do fornecimento desse recurso. Nesse contexto, faz-se necessário realizar medições das grandezas envolvidas de forma eficiente e precisa, visando avaliar o desempenho dos sistemas elétricos diante das demandas atuais. A fim de possibilitar tal avaliação em sistemas monofásicos, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um medidor de qualidade de energia baseado em interface *LabView*, capaz de realizar medições dos principais parâmetros relacionados ao conceito qualidade energia elétrica; sendo eles: tensão, corrente, potências, fator de potência e taxa de distorção harmônica. Para concretização desse projeto, foram definidas etapas de construção e desenvolvimento, de forma a estruturar cada processo de execução, definidos por: criação de circuitos de condicionamento de sinais, projeto da placa de circuito impresso, integração e comunicação com a placa de aquisição de sinais e o desenvolvimento da lógica de cálculos em ambiente *LabView*. Após a conclusão de tais etapas, foram realizados testes com o sistema de medição definido, avaliando os resultados obtidos em cada medição e comparando-as com os instrumentos em bancada, bem como com o analisador de qualidade de energia comercial adotado como referência. De maneira geral, os resultados alcançados proporcionaram a validação do funcionamento do protótipo desenvolvido.

Palavras-chave: Qualidade de energia, medidor, analisador, interface *LabView*.

ABSTRACT

Over the years, electricity has become one of the most important resources for the development of modern society. With the growing demand for electricity, amid technological advances, it has become essential to ensure the quality and reliability of the supply of this resource. In this context, it is necessary to measure the relevant parameters efficiently and accurately in order to evaluate the performance of electrical systems in light of current demands. To enable such an evaluation in single-phase systems, this work presents the development of a power quality meter based on a LabView interface, capable of measuring the main parameters related to the concept of power quality, namely: voltage, current, power, power factor, and harmonic distortion ratio. To carry out this project, construction and development stages were defined to structure each execution process, comprising: the creation of signal conditioning circuits, the design of the printed circuit board, integration and communication with the signal acquisition board, and the development of the calculation logic in the LabView environment. Once these steps were completed, tests were conducted using the defined measurement system, evaluating the results obtained in each measurement and comparing them with bench-top instruments, as well as with the commercial power quality analyzer used as a reference. Overall, the results obtained validated the operation of the developed prototype.

Keywords: Power quality, meter, analyzer, LabVIEW interface.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO - LP



TERMO DE RESPONSABILIDADE Nº 138/2026 - CECALP (11.51.20)

Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO

Leopoldina-MG, 18 de junho de 2026.

Eu, **JOSUÉ PEIXOTO DA SILVA MODESTO**, matrícula **201423510330**, discente do Curso de Engenharia de Controle e Automação, declaro para os devidos fins, que o presente Trabalho de Conclusão de Curso, de título **MEDIDOR DE QUALIDADE DE ENERGIA BASEADO EM INTERFACE LABVIEW**, é de minha autoria e que estou ciente dos:

- Artigos 297 a 299 do Código Penal;
- Decreto-Lei n.º 2.848 de 7 de dezembro de 1940;
- Lei n.º 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, sobre os Direitos Autorais;
- Regulamento Disciplinar Discente do CEFET-MG;
- E que plágio consiste na reprodução de obra alheia e submissão dela como trabalho próprio ou na inclusão, em trabalho próprio, de ideias, textos, tabelas ou ilustrações (quadros, figuras, gráficos, fotografias, retratos, lâminas, desenhos, organogramas, fluxogramas, plantas, mapas e outros) transcritos de obras de terceiros sem a devida e correta citação da referência.

Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração, isentando o (a) professor(a) **D. Sc. Laércio Simas Mattos** (orientador), os membros da banca examinadora e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Leopoldina, de qualquer responsabilidade.

(Assinado digitalmente em 21/06/2026 18:11)

JOSUÉ PEIXOTO DA SILVA MODESTO

DISCENTE

Matrícula: 2014#####0

Processo Associado: 23062.031370/2026-15

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **138**, ano: **2026**, tipo: **TERMO DE RESPONSABILIDADE**, data de emissão: **18/06/2026** e o código de verificação: **a7db69f7e7**

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Distúrbios associados à qualidade de energia.	22
Figura 2.2 – Decomposição da forma de onda distorcida.	27
Figura 2.3 – Sinal no domínio do tempo e respectivo espectro harmônico.	28
Figura 2.4 – Exemplo de aplicação do resistor shunt.	33
Figura 2.5 – Topologia de um transformador de corrente.	34
Figura 2.6 – Simbologia de um transdutor de efeito Hall.	35
Figura 2.7 – Representação da bobina de Rogowski.	35
Figura 2.8 – Simbologia do LEM LA 55-p.	36
Figura 2.9 – Topologia de um TP.	38
Figura 2.10 – Topologia do transdutor LEM LV 25-p.	39
Figura 2.11 – Divisor de tensão com dois resistores.	40
Figura 2.12 – Algumas topologias de amplificadores operacionais.	41
Figura 2.13 – Configurações de filtros de primeira ordem.	42
Figura 2.14 – Representação da amostragem do sinal contínuo.	43
Figura 2.15 – Aspecto físico da Placa NI ELVIS II.	45
Figura 2.16 – Página principal do Labview.	46
Figura 2.17 – Multímetro FLUKE 179.	48
Figura 2.18 – Wattímetros MINIPA ET-4080 e ET-4091.	49
Figura 2.19 – Analisador de energia FLUKE 434.	50
Figura 3.1 – Diagrama do projeto proposto.	54
Figura 3.2 – Estágio inicial do circuito de medição de tensão.	55
Figura 3.3 – Estágio inicial do circuito de medição de corrente.	56
Figura 3.4 – Circuito completo de medição de tensão.	57
Figura 3.5 – Circuito completo de medição de corrente.	58
Figura 3.6 – Esquemático da Projeto da PCI.	59
Figura 3.7 – PCI desenvolvida.	60
Figura 3.8 – Configuração da aquisição no LabView.	62
Figura 3.9 – Fluxograma da lógica implementada.	63
Figura 3.10 – Início da programação no LabView.	64
Figura 3.11 – Ensaio utilizando uma carga RL.	65

Figura 3.12 – Protótipo desenvolvido.....	66
Figura 3.13 – Transformador utilizado no projeto.	67
Figura 4.1 – Relação de ganho do circuito de medição de corrente.	69
Figura 4.2 – Análise da resposta em frequência do circuito de medição de corrente.	70
Figura 4.3 – Relação de ganho do circuito de medição de tensão.....	71
Figura 4.4 – Análise da resposta em frequência do circuito de medição de tensão.	72
Figura 4.5 – Sinal de tensão aqusitado pela NI ELVIS II.....	73
Figura 4.6 – Sinal simulado no LabView.	74
Figura 4.7 – Teste de configuração do Bloco DAQ no LabView.	75
Figura 4.8 – Circuito simulado de uma carga RL.....	75
Figura 4.9 – Forma de onda de tensão de entrada e corrente do ventilador.	77
Figura 4.10 – Gráfico da potência instantânea e valores obtidos.	78
Figura 4.11 – Espectro em frequência dos sinais de tensão e corrente.	78
Figura 4.12 – I: Medições dos parâmetros com o analisador FLUKE 434.	79
Figura 4.13 – II: Medições dos parâmetros com o analisador FLUKE 434.....	80
Figura 4.14 – Formas de onda obtidas pelo osciloscópio.....	84
Figura 4.15 – Formas de onda obtidas pelo software Matlab.....	85
Figura A.1 – Diagrama de blocos (Parte I).....	91
Figura A.2 – Diagrama de blocos (Parte II).	92
Figura A.3 – Diagrama de blocos (Parte III).....	92
Figura A.4 – Diagrama de blocos (Parte VI).....	93
Figura A.5 – Blocos utilizados na implementação do programa.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Limites estabelecidos de distorção harmônica de corrente e tensão.....	23
Tabela 2.2 – Principais parâmetros do LEM LA 55-p.	37
Tabela 3.1 – Lista de componentes utilizados na PCI.....	61
Tabela 4.1 – Carga RL: Resultados obtidos pelos instrumentos utilizados.	76
Tabela 4.2 – Protótipo: Resultados obtidos pelos instrumentos utilizados.	81
Tabela 4.3 – Análise da THD de tensão e corrente.	82
Tabela 4.4 – Análise das harmônicas de tensão.	82
Tabela 4.5 – Análise das harmônicas de corrente.	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Corrente Alternada, do inglês, <i>Alternating Current</i> .
ADC	Conversor Analógico-Digital, do inglês, <i>Analog-to-Digital Converter</i> .
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAT	Categoria de Medição, classificação de segurança definida pela IEC 61010 para instrumentos de medição elétrica
CC	Corrente Contínua
DAQ	Sistema de Aquisição de Dados, do inglês, <i>Data Acquisition</i> .
DC	Corrente Contínua, do inglês, <i>Direct Current</i> .
DPF	Fator de Potência de Deslocamento, do inglês, <i>Displacement Power Factor</i> .
FFT	Transformada Rápida de Fourier, do inglês, <i>Fast Fourier Transform</i> .
FPGA	Arranjo de Portas Programáveis em Campo, do inglês, <i>Field Programmable Gate Array</i> .
FP	Fator de Potência
GND	Terra ou Referência de Potencial Elétrico, do inglês, <i>Ground</i> .
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional, do inglês, <i>International Electrotechnical Commission</i> .
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, do inglês, <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> .
LED	Diodo Emissor de Luz, do inglês, <i>Light Emitting Diode</i> .
PCI	Placa de Circuito Impresso
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RMS	Valor Eficaz, do inglês, <i>Root Mean Square</i> .
TC	Transformador de Corrente
TDD	Distorção Total de Demanda, do inglês, <i>Total Demand Distortion</i> .

THD	Distorção Harmônica Total, do inglês, <i>Total Harmonic Distortion</i> .
THD-i	Distorção Harmônica Total da Corrente
THD-v	Distorção Harmônica Total da Tensão
TP	Transformador de Potencial
TRIAC	Tríodo para Corrente Alternada, do inglês, <i>Triode for Alternating Current</i> .
USB	Barramento Serial Universal, do inglês, <i>Universal Serial Bus</i> .

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Corrente elétrica (ou unidade ampère, conforme o contexto)
C	Capacitor (ou capacitância, conforme o contexto)
F	Faraday (unidade de capacitância)
Hz	Hertz (unidade de frequência)
mH	Milihenry (unidade de indutância)
mA	Miliampère (unidade de corrente elétrica equivalente a 10^{-3} A)
P	Potência ativa
π	Constante matemática aproximadamente igual a 3,1416
Q	Potência reativa
R	Resistência elétrica
S	Potência aparente
V	Tensão elétrica
VA	Volt-ampère (unidade de potência aparente)
W	Watt (unidade de potência ativa)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Motivação do Estudo	19
1.2 Objetivo	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos	19
1.3 Estrutura do Trabalho	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1 Qualidade de Energia.....	21
2.2 Recomendações e Procedimentos.....	22
2.3 Grandezas Físicas Utilizadas	23
2.3.1 Valor eficaz (RMS)	24
2.3.2 Séries de Fourier na análise harmônica	25
2.3.3 Valor eficaz de sinais não senoidais	28
2.3.4 Indicadores da Distorção Harmônica	29
2.3.4.1 Distorção Harmônica Total	29
2.3.4.2 Distorção Total de Demanda	30
2.3.5 Potências elétricas e Fator de potência	30
2.4 Instrumentação e Processamento das Grandezas Elétricas.....	32
2.4.1 Tipos de Medição de Corrente.....	32
2.4.1.1 Resistores Shunts.....	33
2.4.1.2 Transformadores de corrente indutivos (TC)	33
2.4.1.3 Transdutores de efeito Hall.....	34
2.4.1.4 Bobina de Rogowski.....	35
2.4.1.5 Transdutor de corrente LEM LA 55-p.....	36
2.4.2 Tipos de Medição de Tensão	37
2.4.2.1 Transformador de Potencial (TP)	37
2.4.2.2 Transdutor de Tensão baseado no efeito Hall	38
2.4.2.3 Divisor de Tensão	39

2.4.3 Condicionamento de Sinais	40
2.4.3.1 Amplificadores Operacionais	40
2.4.3.2 Filtros analógicos.....	41
2.4.3.3 Teorema de amostragem e aliasing	42
2.4.4 Placa de aquisição NI ELVIS II	44
2.4.5 Software LabView	45
2.5 Revisão de alguns medidores comerciais	47
2.5.1 Multímetro FLUKE 179	47
2.5.2 Wattímetros MINIPA ET-4080 e ET-4091	48
2.5.3 Analisador de energia da FLUKE 434	49
2.6 Estado da Arte	51
3 METODOLOGIA.....	54
3.1 Medição de Tensão	54
3.2 Medição de corrente	55
3.3 Circuito de condicionamento de sinais.....	56
3.4 Projeto e confecção da PCI.....	59
3.5 Aquisição e processamento dos sinais.....	61
3.6 Ensaio do Sistema de Medição	64
3.7 Protótipo desenvolvido	65
4 RESULTADOS	68
4.1 Análise e validação por simulação dos circuitos da PCI.....	68
4.1.1 Circuito de medição de corrente	68
4.1.2 Circuito de medição de tensão.....	70
4.2 Avaliação da Placa de aquisição NI ELVIS II	72
4.3 Testes preliminares no software LabView	73
4.4 Avaliação preliminar do sistema de medição	75
4.5 Medidor de qualidade de energia desenvolvido	76
5 Conclusões e Trabalhos Futuros	86
5.1 Conclusões.....	86
5.2 Trabalhos Futuros	87
REFERÊNCIAS	88
APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO GRÁFICA DESENVOLVIDA NO LABVIEW	91

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica tem aumentado significativamente ao longo dos anos. Com o crescimento populacional e a evolução das tecnologias, mediante a variedade de equipamentos eletrônicos modernos inseridos nos sistemas elétricos, tornou-se essencial a confiabilidade e a eficiência do setor elétrico. De fato, a energia elétrica tem sido um pilar fundamental para o desenvolvimento da sociedade, garantindo o funcionamento adequado dos setores industriais, comerciais e residenciais (Fondato, Figueira e Florian, 2025), (Khan e Wyrwa, 2024).

Nesse cenário, considera-se importante não somente o fornecimento da energia elétrica, mas também a qualidade na qual ela é entregue, uma vez que a ocorrência de distúrbios na rede elétrica pode comprometer o funcionamento e desempenho de equipamentos, acarretando perdas econômicas e prejudicando a continuidade de serviços. Desse modo, a qualidade da energia elétrica destaca-se como um fator determinante, a fim de proporcionar condições adequadas de operação e segurança aos sistemas consumidores (Fondato, Figueira e Florian, 2025), (ANEEL, 2021).

Diante desse contexto, em termos gerais, a qualidade da energia elétrica está relacionada ao desempenho do sistema elétrico em fornecer a energia, dentro dos padrões normativos de tensão, formas de onda e frequência; regulamentados e fiscalizados por órgãos competentes. Diferentemente de um sistema elétrico ideal, observa-se na realidade, registros de distúrbios, variações de tensão, interrupções e a presença de componentes harmônicas que, conseqüentemente, interferem o comportamento e desempenho dos equipamentos ligados ao sistema elétrico (ANEEL, 2021), (IEEE, 2019).

Dessa forma, a medição das grandezas elétricas envolvidas constitui uma etapa importante e indispensável para o processo de monitoramento e avaliação da qualidade de energia elétrica (Sousa *et al.*, 2023), (Sepasi, Talichet e Pramanik, 2023).

Medidores comerciais costumam ser caros, então, desenvolver soluções para análise de qualidade de energia torna-se importante. Neste contexto esse trabalho visa implementar um medidor de energia com ferramentas e componentes comuns no dia a dia laboratorial, podendo, também, ser utilizado no meio corporativo. Para tal utilização, o medidor proposto precisa ser

validado e, para isso, será comparado com equipamentos que possuem grande aceitação no mercado e qualidade comprovada por utilizadores ao longo dos anos. A seguir serão apresentadas as motivações e objetivos do presente trabalho. (Rodrigues, Janeiro e Ramos, 2020).

1.1 Motivação do Estudo

Na perspectiva dos sistemas elétricos modernos, a presença de distúrbios da qualidade energia elétrica pode ser associada tanto ao fornecimento quanto às cargas conectadas à rede. Segundo Kaur e Bath (2025), a crescente utilização de equipamentos eletrônicos modernos, intensificam a ocorrência de harmônicos na rede elétrica evidenciando a importância e a necessidade de estudos que permitam compreender esses fenômenos, tanto de forma teórica quanto em análise prática dos efeitos causados.

1.2 Objetivo

Nessa seção será descrito o objetivo geral que detalha a proposta deste trabalho e, em seguida, serão expostos os objetivos específicos que foram definidos a fim desenvolver e concretizar o mesmo.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um protótipo de medidor/analizador, de qualidade de energia elétrica utilizando a interface *Labview*, voltado ao monitoramento de sistemas monofásicos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral foram traçados alguns objetivos específicos:

- a) Projetar e confeccionar uma placa circuitos impresso para condicionamento de

sinais;

- b) Realizar testes individuais nos circuitos desenvolvidos e testes de integração;
- c) Realizar testes de aquisição de sinais com a placa NI Elvis II;
- d) Desenvolver uma aplicação em *LabView* para aquisição, monitoramento e tratamento de sinais;
- e) Realizar ensaios com os instrumentos de medição.
- f) Realizar testes com o protótipo desenvolvido a fim de validar resultados obtidos comparando medições e cálculos.

1.3 Estrutura do Trabalho

A estrutura do trabalho foi organizada em 5 capítulos, os quais são descritos a seguir:

- a) Capítulo 1: refere-se à introdução, na qual é apresentado a ideia geral do trabalho, juntamente com a motivação do estudo e objetivos para o desenvolvimento do mesmo.
- b) Capítulo 2: expõe a revisão bibliográfica, abordando os fundamentos teóricos que servem de embasamento para proposta desse trabalho.
- c) Capítulo 3: descreve a metodologia utilizada tal como todo desenvolvimento do protótipo medidor de qualidade de energia.
- d) Capítulo 4: apresenta os resultados obtidos através de simulações e testes realizados para a validação do projeto proposto.
- e) Capítulo 5: expõe a conclusão do trabalho, na qual são feitas as sugestões para trabalhos futuros e por fim as considerações finais do protótipo desenvolvido.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo é apresentado um breve resumo referente à qualidade da energia elétrica, incluindo sua definição, recomendações e procedimentos adotados para o desenvolvimento de equipamentos que monitoram a qualidade da energia elétrica. Também são apresentadas grandezas físicas, termos, conceitos e sensores utilizados na instrumentação para o desenvolvimento de equipamentos para medição de energia elétrica. São apresentados, também, alguns exemplos comerciais de aparelhos para avaliação da qualidade da energia elétrica.

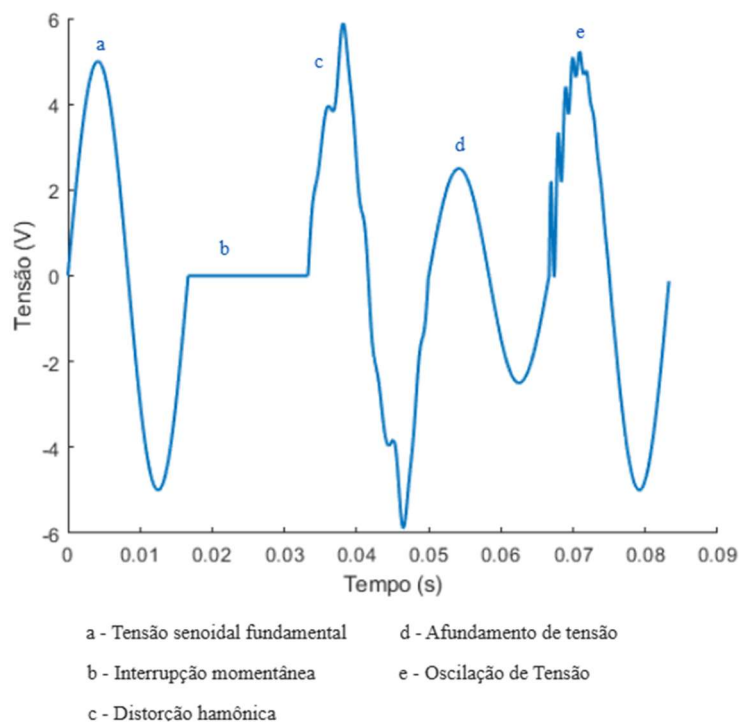
2.1 Qualidade de Energia

Conforme abordagem de Dugan (2012), a qualidade de energia elétrica (QEE) é dada por um conjunto de características requeridas e atendidas de modo que, chegue ao consumidor, uma energia elétrica de qualidade, possuindo o sinal com amplitudes e frequência constantes de forma de onda senoidal, garantindo que os equipamentos, instalações e sistemas elétricos operem satisfatoriamente.

Em Condições reais de operação, o sistema elétrico está sujeito à ocorrência de distúrbios que comprometem a qualidade do fornecimento de energia, disponibilizado pelas concessionárias do setor elétrico. Nisso, um ponto de muita atenção, é a forma de onda da tensão, sendo assim um dos principais parâmetros de análise, na qual permite identificar as alterações ocorridas no sinal Dugan (2012), (IEEE, 2019).

A Figura 2.1 ilustra as características de alguns distúrbios causadores de deformações no sinal senoidal da tensão fornecida, tal como a descrição de cada fenômeno.

Figura 2.1 – Distúrbios associados à qualidade de energia.



Fonte: do autor.

É importante salientar que, assim como as concessionárias de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, os consumidores também são responsáveis pela qualidade da energia. Uma vez que determinados tipos de carga podem gerar comportamentos indesejáveis ao sistema elétrico, ao ponto de obterem forma de corrente distorcidas, ocasionando a distorção na forma de onda da tensão fornecida, consequentemente, comprometendo a qualidade de energia do sistema elétrico como um todo (Rocha, 2016).

Nesse contexto, as concessionárias de fornecimento e distribuição de energia elétrica, com validação dos órgãos reguladores, possuem o direito em determinar certos limites e parâmetros aos consumidores, em relação aos harmônicos, tais como outras perturbações provocadas por suas cargas.

2.2 Recomendações e Procedimentos

Mediante a existência de perturbações no sistema elétrico, para garantir a alta qualidade da energia no setor, os órgãos reguladores responsáveis, tal como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no Brasil, definiram normas com parâmetros e limites a serem

seguidos, de modo que seja fornecida tensão com formas de onda mais senoidal possível, sem que haja alterações intoleráveis na sua amplitude e frequência, tal como nos sistemas consumidores, que estão sendo alimentados pelo sistema elétrico (Leão, Sampaio e Antunes, 2014).

A ANEEL possui a responsabilidade de definir os critérios de qualidade na distribuição da energia elétrica e fiscalizar se estes estão, de fato, sendo respeitados pelas concessionárias que distribui energia elétrica. Em 2008, a ANEEL criou o PRODIST, que no seu módulo 8, trata exclusivamente da qualidade de energia elétrica, que em síntese, estabelece a definição da metodologia e caracterização dos fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos às variações de tensão de curta e longa duração fator de potência, variações de frequências, e as perturbações associadas à forma de onda de tensão, assim como os harmônicos. (ANEEL, 2021).

De forma complementar à abordagem dos termos voltados a qualidade energia, tem-se a norma internacional *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE-519/2014), na qual estabelece critérios referentes as distorções harmônicas de corrente e tensão nos sistemas elétricos, avaliando o ponto comum entre a rede elétrica e o consumidor, a fim de monitorar o impacto das cargas na qualidade da energia fornecida. Em síntese, considerando o sistema com ponto comum $\leq 1\text{kV}$ (quilovolt), a Tabela 2.1 apresenta alguns dos parâmetros que a norma avalia. (IEEE, 2014).

Tabela 2.1 – Limites estabelecidos de distorção harmônica de corrente e tensão.

Parâmetros	Limite IEEE 519 2014
Distorção Total de Tensão (THD-V)	$\leq 8\%$
Distorção Total de Demanda - corrente (TDD)	5% a 20%

Fonte: de (IEEE, 2014).

Sendo que os limites da TDD dependem diretamente da relação entre a corrente de curto-circuito no ponto comum (I_{sc}) e a corrente de demanda máxima carga (IL).

2.3 Grandezas Físicas Utilizadas

O desempenho de um sistema elétrico pode ser avaliado e quantizado por meio das

grandezas elétricas envolvidas, sendo elas tensão, corrente, potência, fator de potência e os parâmetros citados na seção anterior, como a taxa de distorção harmônica. Uma vez que essas grandezas são medidas, torna-se possível avaliar o nível de qualidade do sistema, bem como observar o comportamento das cargas conectadas ao mesmo. Nessa seção são expostas as formas de representação e tratamento de tais grandezas elétricas.

2.3.1 Valor eficaz (RMS)

Conforme definido por Alexander e Sadiku (2017), o valor eficaz, também mencionado como *Root Mean Square* (RMS), trata-se do valor de uma grandeza elétrica contínua equivalente, utilizada para representar a capacidade de uma tensão ou corrente periódica produzir a mesma potência média que uma tensão ou corrente contínua, aplicada a uma carga resistiva. Conceito esse, importante para análise de sistemas em corrente alternada, pois uma vez que as grandezas elétricas variam no tempo, o valor médio simples nem sempre representa a energia real transferida para o sistema.

Em termos quantitativos, como é visto na equação (2.1), o valor eficaz é equivalente a raiz quadrada da média ao longo de determinado período, do quadrado dos valores instantâneos do sinal.

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2.1)$$

Sendo X_{rms} o valor eficaz de um sinal da função $x(t)$.

No caso de um sinal senoidal puro, o valor eficaz seria o valor máximo dividido por raiz quadrada de 2. Como mostra as equações (2.2) e (2.3) em termos de sinal de tensão e corrente (Alexander e Sadiku, 2017).

$$V_{rms} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (2.2)$$

$$I_{rms} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

Em que, V_p refere-se ao valor de tensão de pico, e I_p corresponde ao valor de corrente

de pico.

Entretanto, quando os sinais envolvidos apresentam formas de onda não senoidais, para uma melhor análise, torna-se necessário utilizar ferramentas mais abrangentes, como as séries de Fourier.

2.3.2 Séries de Fourier na análise harmônica

Os harmônicos provocados na rede elétrica podem ser descritos e representados matematicamente pela análise de Fourier, desenvolvida em 1822 pelo francês matemático Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). A análise de Fourier descreve a forma de onda do sinal em estudo no domínio do tempo e a converte em componentes distintas, representando-as no domínio da frequência (Leão, Sampaio e Antunes, 2014).

Segundo Dugan (2012), as componentes descritas por Fourier, também ditas Séries de Fourier, referem-se a uma forma de onda periódica, definida pelo somatório de ondas senoidais puras, cuja frequência individual dessas é um múltiplo inteiro da frequência fundamental, da forma de onda do sinal original. Cada componente de múltiplo inteiro da frequência fundamental, sinal original, é definido com o nome de harmônico, no qual o primeiro harmônico é representado pela frequência fundamental.

Em síntese, a Série de Fourier é capaz de representar toda função periódica não senoidal através de uma soma de expressões composta por: uma expressão senoidal em frequência fundamental, expressões senoidais cujas frequências são múltiplas inteiras da fundamental e uma eventual componente de sinal contínuo (CC). Em (2.4) é descrito a função de um determinado sinal no domínio do tempo e as séries de Fourier genéricas (Alexander e Sadiku, 2017).

$$f(t) = \frac{1}{2} \cdot a_0 \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cdot \cos(h \cdot \omega \cdot t) + b_h \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot t)] \quad (2.4)$$

Tem-se que os termos a_0 , a_h e b_h são obtidos a partir das seguintes expressões:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.5)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega t) dt, \quad h = 1, 2, 3 \dots \quad (2.6)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega t) dt, \quad h = 1, 2, 3 \dots \quad (2.7)$$

Considerando que tais termos são definidos da seguinte forma:

a_0 refere-se a componente CC do sinal;

T corresponde ao período fundamental do sinal;

$f(t)$ representa função do sinal periódico em análise;

ω é o valor da frequência angular da componente fundamental do sinal $f(t)$;

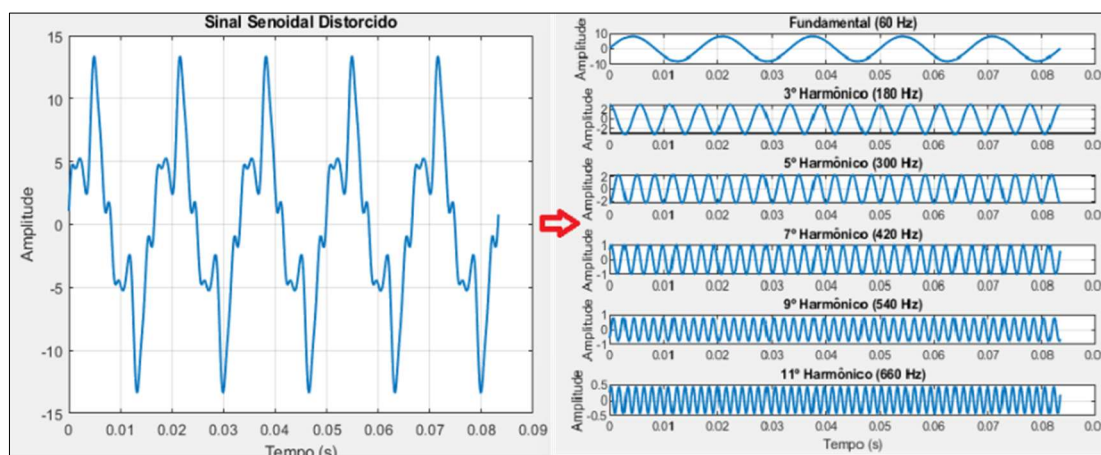
h é um valor inteiro que representa a ordem da componente harmônica;

a_h refere-se a amplitude da parte em cosseno da componente harmônica;

b_h representa a amplitude da parte em seno da componente harmônica.

Na Figura 2.2 observa-se um exemplo de uma forma de onda distorcida e a distinção de suas componentes harmônicas, representando a decomposição do sinal, definida pela análise de Fourier. O primeiro harmônico é representado por ($h= 1$, 60 Hz), sendo “h” o múltiplo da frequência fundamental. Em seguida, tem-se o terceiro harmônico ($h=3$, 180 Hz), o quinto harmônico, sendo ($h=5$, 300 Hz) e os demais seguindo o mesmo modo.

Figura 2.2 – Decomposição da forma de onda distorcida.

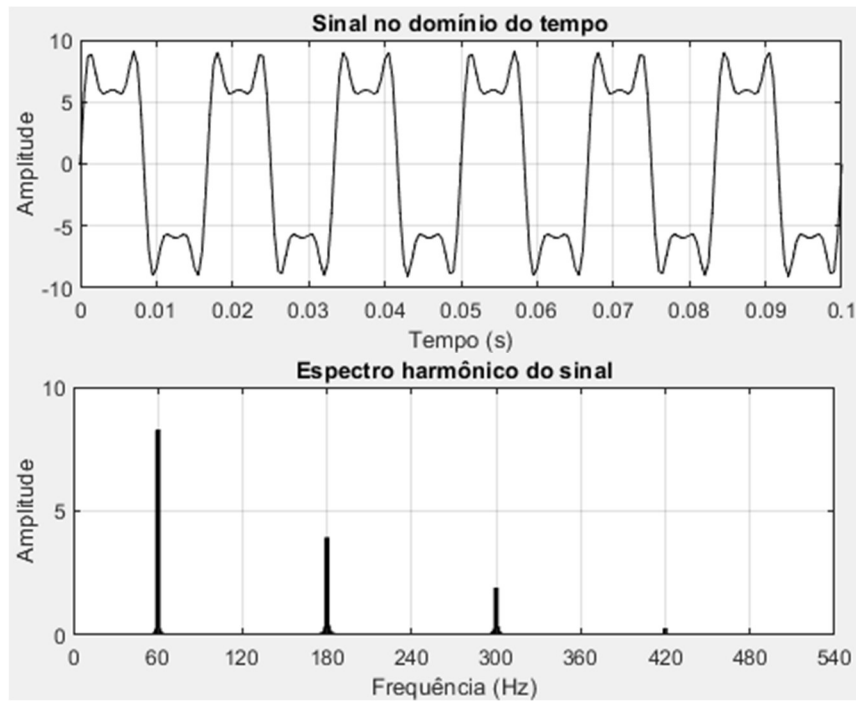


Fonte: do autor.

A decomposição das componentes harmônicas de um determinado sinal, também podem ser representadas e compreendidas através do gráfico da amplitude de cada componente em função de sua respectiva frequência, resultando no espectro harmônico do sinal analisado (Alexander e Sadiku, 2017).

O algoritmo utilizado para calcular e representar o espectro harmônico é chamado de transformada rápida de Fourier, em inglês, *Fast Fourier Transform* (FFT), que consiste em transformar as equações distintas dos sistemas elétricos no domínio do tempo para equações no domínio da frequência e, no gráfico, é possível ver a decomposição da amplitude e frequência respectiva de cada harmônico (Leão, Sampaio e Antunes, 2014). A Figura 2.3 mostra o espectro harmônico de um sinal não senoidal, onde possui harmônicos ímpares, de 3ª, 5ª e 7ª ordem, sendo em 60 Hz a amplitude da fundamental.

Figura 2.3 – Sinal no domínio do tempo e respectivo espectro harmônico.



Fonte: do autor.

2.3.3 Valor eficaz de sinais não senoidais

Considerando a presença de componentes harmônicas em sinais não senoidais, o valor eficaz total correspondente passa a depender do valor individual de cada componente presente no sinal.

Em análise aos sinais distorcidos de tensão e corrente, seus valores RMS são calculados sendo a raiz quadrada do somatório dos valores RMS ao quadrado de cada componente individual presente no sinal, conforme mostra as equações (2.8) e (2.9). Onde V_h e I_h correspondem respectivamente aos valores de tensão e corrente de pico de cada componente harmônica de ordem h (Dugan, 2012).

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{m\acute{a}x}} \left(\frac{V_h}{\sqrt{2}} \right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_{h_{m\acute{a}x}}^2} \quad (2.8)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{m\acute{a}x}} \left(\frac{I_h}{\sqrt{2}}\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_{h_{m\acute{a}x}}^2} \quad (2.9)$$

2.3.4 Indicadores da Distorção Harmônica

Com objetivo de isolar e mitigar os problemas relacionados a qualidade de energia, envolvendo distorções harmônicas, os órgãos regulamentadores definiram normas com critérios e limites a serem obedecidos em função da ocorrência de harmônicos no sistema, sendo estes, estabelecidos em função dos indicadores de controle, que permitem analisar e quantificar os distúrbios presentes nos sinais elétricos. Dentre os indicadores existentes, destacam-se como principais, a distorção harmônica total, em inglês, *Total Harmonic Distortion* (THD) e a distorção total de demanda, *Total Demand Distortion* (TDD) (Dugan, 2012) , (Arranz-Gimon *et al.*, 2021).

2.3.4.1 Distorção Harmônica Total

Considerado como indicador importante em análises de qualidade de energia, a distorção harmônica total é definida sendo a razão entre a raiz quadrada média do conteúdo harmônico e o valor eficaz da componente fundamental do sinal elétrico em estudo, expressando como uma percentagem da fundamental. As equações (2.10) e (2.11) descrevem a THD referente ao sinal de tensão e corrente respectivamente (Dugan, 2012).

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}} V_h^2}}{V_1} \quad (2.10)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}} I_h^2}}{I_1} \quad (2.11)$$

Sendo:

h - ordem da componente harmônica (número inteiro);

V_h - valor eficaz da componente harmônica de tensão de ordem h ;

V_1 - valor eficaz da componente fundamental de tensão;

I_h - valor eficaz da componente harmônica de corrente de ordem h ;

I_1 - valor eficaz da componente fundamental de corrente;

2.3.4.2 Distorção Total de Demanda

De acordo com a norma IEEE 519-2014, a distorção total de demanda, diferentemente da THD, corresponde à relação entre todo conteúdo harmônico presente no sinal de corrente em função da corrente máxima de demanda do sistema elétrico, como é visto na equação (2.12). Indicador este, importante para analisar e quantificar as distorções harmônicas do ponto de visto geral, proporcionando uma visão mais ampla do nível distorção presente no sistema elétrico. Dessa forma, sendo muito útil em situações em que há alto índice de cargas não lineares inseridas no sistema (Arranz-Gimon *et al.*, 2021).

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_L} \quad (2.12)$$

Onde I_h corresponde ao valor eficaz da componente harmônica de corrente de ordem h , e I_L refere-se ao valor eficaz da corrente máxima de demanda do sistema elétrico na frequência fundamental.

2.3.5 Potências elétricas e Fator de potência

Em termos de qualidade de energia, a análise e estudo de potências torna-se fundamental para avaliação do comportamento do sistema elétrico.

Inicialmente, a potência instantânea $p(t)$ é dada pelo produto entre a tensão $v(t)$ e corrente $i(t)$ em função do tempo, como segue a equação (2.13). Logo, a potência ativa (P), que corresponde a parcela de potência associada a transferência efetiva de energia para o sistema, é obtida a partir da média da potência instantânea ao longo de um período (T), como mostra a equação (2.14).

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.13)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \quad (2.14)$$

Já a potência aparente (S), que consiste na potência total fornecida pela fonte ao sistema elétrico, é definida pelo produto dos valores (True RMS) de tensão e corrente, como visto na equação (2.15) (Alexander e Sadiku, 2017).

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (2.15)$$

Ressalta-se que as definições de potência ativa e aparente, apresentadas pelas equações (2.14) e (2.15), são consideradas tanto para sinais senoidais quanto não senoidais, considerando valores eficazes verdadeiros (Dugan, 2012)

Em complemento ao conceito de potências, tem-se a potência reativa (Q), associada à troca de energia entre elementos reativos do sistema, que em sinais senoidais, pode ser obtida pela relação entre a potência aparente e potência ativa, como descrita na equação (2.16), ou em função somente da potência aparente, como mostra a equação (2.17).

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.16)$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (2.17)$$

Onde φ é a defasagem angular entre a tensão e a corrente.

Ao considerar sistemas com distorções harmônicas, a definição clássica de potência reativa deixa de ser válida, devido não representar de forma íntegra os comportamentos da energia envolvida do sistema, conforme a IEEE 1459- 2010. Nesse caso, a potência reativa é referida à componente fundamental do sinal de corrente I_1 e tensão V_1 , como é visto na equação (2.18).

$$Q = V_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (2.18)$$

Sendo φ_1 a defasagem angular entre a tensão e corrente da fundamental.

Dessa forma, as demais contribuições harmônicas são consideradas separadamente, e definidas como potência de distorção (D), sendo representada pela equação (2.19) (IEEE, 2010).

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_1^2} \quad (2.19)$$

O fator de potência corresponde a grandeza na qual avalia o aproveitamento da potência fornecida ao sistema, considerando sinais não senoidais, o mesmo é calculado através da relação entre o fator de deslocamento da fundamental (DFP) e a THD total da corrente, como mostra a equação (2.20) (Mohan, Undelan e Robbins, 2012).

$$FP = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (2.20)$$

Onde: $\cos(\varphi_1)$ é definido sendo o fator de deslocamento da corrente.

2.4 Instrumentação e Processamento das Grandezas Elétricas

O estudo e a análise das grandezas presentes em sistemas elétricos, como tensão e corrente, são essenciais para aplicações de monitoramento. E para realizar o processamento digital, essas grandezas são convertidas em sinais elétricos por meio de sistemas de medição e aquisição, onde há transdutores, sensores, condicionamento de sinal, conversão analógico-digital e processamento digital (Fraden, 2016). Nessa seção são abordados alguns tipos de equipamentos utilizados na medição de corrente e tensão em sistemas de medição e aquisição de sinais elétricos.

2.4.1 Tipos de Medição de Corrente

Uma das grandezas relevantes nos sistemas elétricos e eletrônicos é a corrente elétrica,

que uma vez conhecida ou convertida pode contribuir na análise de aplicações que envolve processamento e aquisição de sinais. A medição de corrente pode ser realizada baseando-se em diferentes princípios e consequentemente por diferentes tipos de equipamentos.

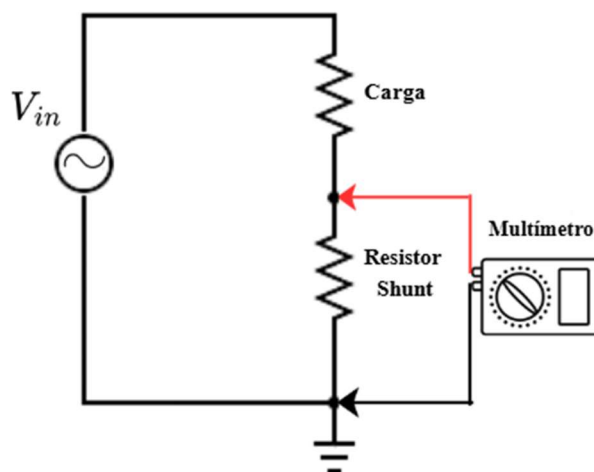
2.4.1.1 Resistores Shunts

Baseado no princípio da Lei de Ohm, a medição de corrente utilizando resistor shunt consiste em um resistor com valor baixo ligado em série com o circuito, de forma que a corrente elétrica que o percorre, provoca uma queda de tensão proporcional, sendo possível determinar seu valor. Considerando sinais alternados senoidais e o comportamento predominantemente resistivo do resistor shunt na frequência de operação, a relação entre a tensão e corrente pode ser expressa em termos dos valores eficazes, conforme a equação (2.21).

$$V_{RMS} = R_{shunt} \cdot I_{RMS} \quad (2.21)$$

Sendo V_{RMS} a tensão eficaz sobre resistor, R_{shunt} o valor ôhmico do resistor shunt e I_{RMS} a corrente eficaz que o percorre, podendo ser corrente contínua ou alternada. Tal método apresenta simples implementação, e, uma vez que o resistor shunt é bem dimensionado, corresponde com uma boa precisão na medição. A Figura 2.4 ilustra um exemplo de aplicação do resistor shunt, V_{in} a tensão de entrada do circuito (Sawhney, 2010).

Figura 2.4 – Exemplo de aplicação do resistor shunt.



Fonte: do autor

2.4.1.2 Transformadores de corrente indutivos (TC)

Segundo (Mamede Filho, 2017). os transformadores são equipamentos eletromagnéticos estáticos, desenvolvidos para transferir energia entre circuitos sem que haja

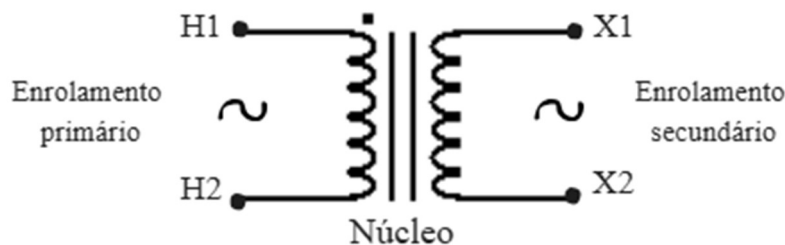
conexão elétrica entre eles, mantendo-se a frequência original e proporcionando a adequação de níveis de tensão e corrente conforme é projetado, determinando-se a relação de transformação, conforme descreve a equação (2.22).

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.22)$$

Pela qual V_p é tensão no primário e V_s a tensão no secundário, N_p número de espiras do primário e N_s número de espiras no secundário.

Dentre os tipos de transformadores, tem-se o transformador de corrente (TC), com o enrolamento primário em série com o circuito, baseia-se no princípio de indução eletromagnética, que ocorre quando uma corrente alternada percorrida no enrolamento primário provoca uma variação de fluxo magnético no núcleo, de forma que induz uma corrente proporcional no enrolamento secundário. Logo, tem-se a redução do nível de corrente a ser tratada (Mamede Filho, 2017). Na Figura 2.5 observa-se uma topologia de TC.

Figura 2.5 – Topologia de um transformador de corrente.



Fonte: do autor

Onde H1 e H2 são os terminais do enrolamento primário e X1 e X2 os terminais do enrolamento secundário.

Embora sejam utilizados em sistemas de medição e proteção, os transformadores de corrente convencionais podem apresentar limitações na medição de componentes harmônicas de alta frequência, devido às suas respostas em frequência, que tendem a atenuar componentes de frequências elevadas. Assim, em sistemas com elevado THD, faz-se necessário avaliar a adequação conforme a aplicação. (Dugan, 2012), (Blackburn e Domin, 2014).

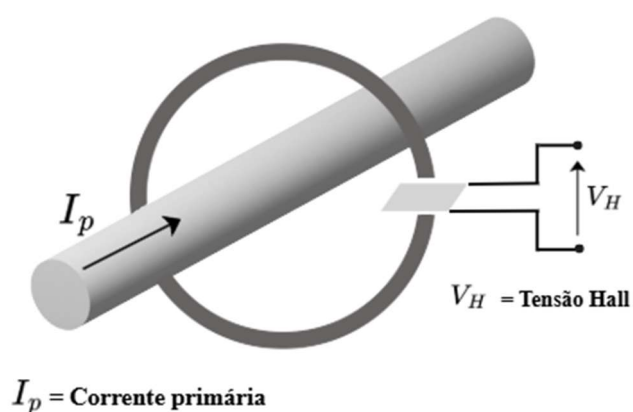
2.4.1.3 Transdutores de efeito Hall

A medição de corrente em sistemas elétricos, especialmente em sistemas eletrônicos, pode ser realizada com o uso de transdutores baseados no efeito Hall, que por característica,

permitem o isolamento entre o circuito de potência e o circuito de medição. Logo, transdutores são definidos como dispositivos capazes de converter uma grandeza física em um sinal elétrico referido, possibilitando sua medição.

Dessa forma, o efeito Hall consiste em um fenômeno físico, no qual, ao passar uma corrente elétrica por um condutor, com a presença de um campo magnético perpendicular, é gerada uma diferença de potencial transversal, no que resulta em um sinal de saída proporcional à corrente medida (Fraden, 2016). A Figura 2.6 mostra uma simbologia de transdutor de efeito Hall.

Figura 2.6 – Simbologia de um transdutor de efeito Hall.

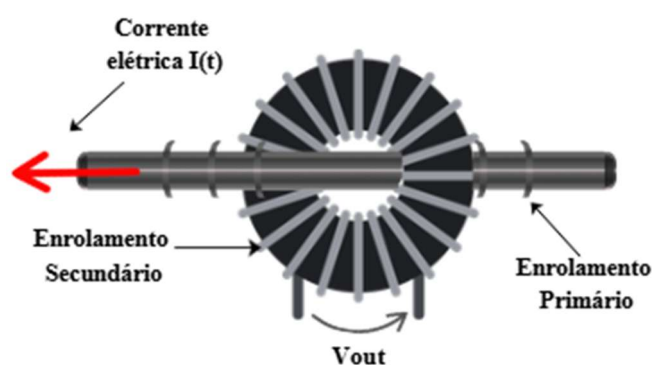


Fonte: do autor.

2.4.1.4 Bobina de Rogowski

Uma outra forma de medir a corrente elétrica é através do uso da bobina de Rogowski; considerada um transdutor de corrente, é constituída por um condutor não ferromagnético em formato helicoidal, sendo o enrolamento secundário, como ilustra a Figura 2.7.

Figura 2.7 – Representação da bobina de Rogowski.



Fonte: do autor

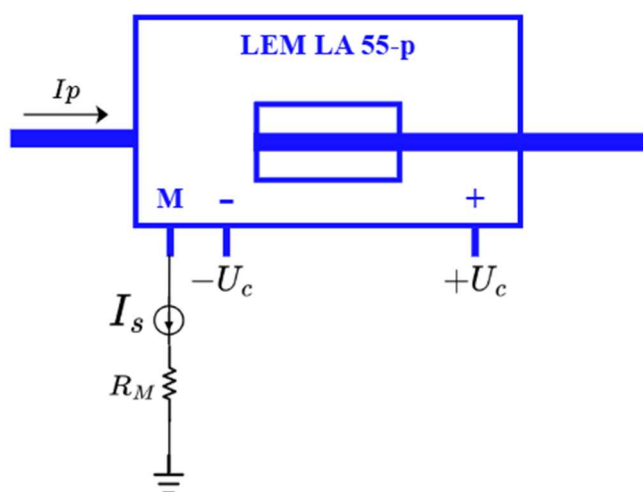
Onde V_{out} é a tensão de saída.

Assim como os TC's, seu princípio de funcionamento baseia-se na indução eletromagnética, em que, ao circular uma corrente alternada no enrolamento primário, uma tensão é induzida no secundário, provocada pela variação da corrente ao longo do tempo. Sendo assim é necessário um estágio de integração para se obter o valor referido da corrente (Fraden, 2016).

2.4.1.5 Transdutor de corrente LEM LA 55-p

Em relação as formas e tipos de medição de corrente, tem-se o LEM LA 55-p, um transdutor de efeito hall de circuito fechado capaz de medir sinais eletroeletrônicos de corrente contínua, alternada e pulsada. Dentre as características desse sensor destaca-se a alta precisão, excelente linearidade, ótimo tempo de resposta, imunidade à possíveis interferências externas e mínima variação de temperatura. A Figura 2.8 apresenta a simbologia do LEM LA 55-p, (LEM, 2023).

Figura 2.8 – Simbologia do LEM LA 55-p.



Fonte: do autor.

Onde:

I_p : Corresponde a corrente RMS no primário;

I_s : Corresponde a corrente RMS no secundário;

M: Terminal de saída;

R_M : Refere-se resistência de medição, onde a tensão sobre R_M é a tensão de leitura;

$\pm U_C$: Terminais de alimentação.

Antes de se utilizar o LEM LA 55-p é necessário atentar-se à algumas informações importantes, tal como a tensão de alimentação e níveis de medição com mostra a Tabela 2.2 Informações, essas, que são disponibilizadas no Datasheet do componente.

Tabela 2.2 – Principais parâmetros do LEM LA 55-p.

Parâmetros	LEM LA 55-p
Tensão de alimentação	$\pm 12\text{ V}$ ou $\pm 15\text{V (DC)}$
Resistência de medição	10Ω a 100Ω ($\pm 12\text{V}$); 50Ω a 160Ω ($\pm 15\text{V}$);
Corrente nominal (RMS) primária	50A
Corrente nominal (RMS) secundária	50mA
Relação de conversão	1:1000

Fonte: (LEM, 2023).

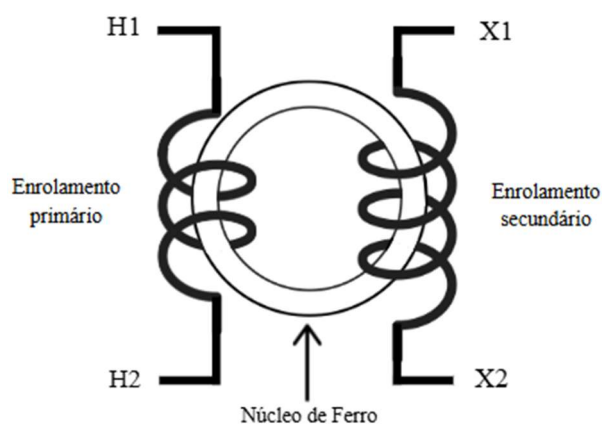
2.4.2 Tipos de Medição de Tensão

A medição de sinais de tensão em sistemas elétricos pode ser realizada de diferentes formas, utilizando por exemplo sensores próprios pra esse fim, mediante a faixa de trabalho e características requeridas pelo processo de aquisição. Nessa seção são abordados alguns dos principais medidores de tensão que podem ser aplicados à sistemas elétricos

2.4.2.1 Transformador de Potencial (TP)

Considerados equipamentos importantes em sistemas elétricos de potência, os transformadores de potencial são conectados em paralelo com a carga, como observado na Figura 2.9, capazes de reduzir níveis de tensão consideráveis, proporcionando isolamento elétrica, garantindo proteção e favorecendo as medições realizadas na tensão secundária.

Figura 2.9 – Topologia de um TP.



Fonte: do autor.

Semelhante ao TC, H1 e H2 são os terminais do enrolamento primário e, X1 e X2 os terminais do enrolamento secundário.

Também baseado na indução eletromagnética, é constituído por um enrolamento no primário com poucas muitas espiras e com poucas espiras no secundário, de modo a gerar uma tensão proporcional com precisão, cujo a relação de transformação também pode ser compreendida pela equação (2.22).

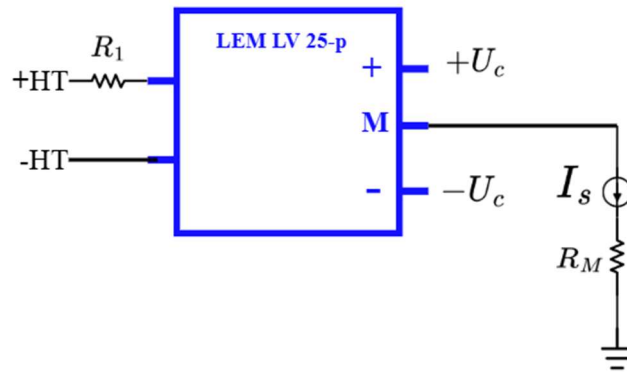
Ressalta-se que os transformadores convencionais utilizam o mesmo princípio de indução eletromagnética, com enrolamentos no primário e secundário com objetivo de reduzir ou elevar tensão de entrada.

2.4.2.2 Transdutor de Tensão baseado no efeito Hall

Diferentemente do transdutor de corrente por efeito Hall, esse dispositivo realiza a medição da diferença de potencial entre dois pontos de interesse, e a bobina de alto valor resistivo contida internamente, faz com que a mínima corrente presente induza um campo magnético, que ao provocar o desvio dos elétrons gera na saída uma tensão Hall. A tensão de saída normalmente é tratada por circuito auxiliar a fim de condicionar o sinal a um nível desejado (Fraden, 2016). Esse tipo de transdutor pode ser aplicado em medições de tensão contínua e alternada.

Como um exemplo de tal tipo de transdutor a Figura 2.10 apresenta a topologia do LEM LV 25-p.

Figura 2.10 – Topologia do transdutor LEM LV 25-p.



Fonte: do autor.

Sendo:

R_1 : Resistor primário externo, que serve para limitar a corrente de entrada em 10mA.

$\pm HT$: Terminais de medição.

$\pm U_c$: Terminais de alimentação.

I_s : Corresponde a corrente RMS no secundário;

M: Terminal de saída;

R_M : Refere-se resistência de medição, onde a tensão sobre R_M é a tensão de leitura;

2.4.2.3 Divisor de Tensão

Outra forma conhecida de realizar medição de tensão, é utilizando a associação de resistores em série, onde a tensão aplicada na entrada é distribuída proporcionalmente a cada resistores contidos no circuito, como é descrito na equação (2.23).

$$V_n = V_{in} \frac{R_n}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} \quad (2.23)$$

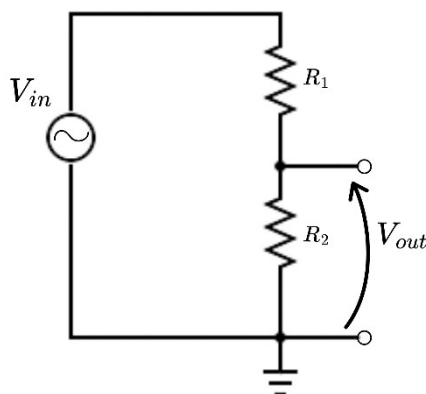
Sendo V_{in} a tensão de entrada do circuito e V_n a tensão lida no n-ésimo resistor.

Considerando a associação de dois resistores, como mostra a Figura 2.11, e com base na equação (2.23), tem-se a equação (2.24) correspondente.

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.24)$$

Onde V_{out} é a tensão de saída. (Alexander e Sadiku, 2017).

Figura 2.11 – Divisor de tensão com dois resistores.



Fonte: do autor.

2.4.3 Condicionamento de Sinais

Nas variadas aplicações de aquisição de sinais, utilizam-se determinados dispositivos para leitura dos mesmos, tais como transdutores e sensores. Logo, tem-se a necessidade de condicionar os sinais que são medidos, de modo que estejam adequados ao dispositivo de aquisição.

Em síntese, os circuitos condicionadores proporcionam o tratamento dos sinais, podendo atribuir a eles atenuação, amplificação, filtragem, inversão de fase, e retificação; dependendo da aplicação do conversor analógico-digital que é utilizado em questão. (Morris e Langari, 2015).

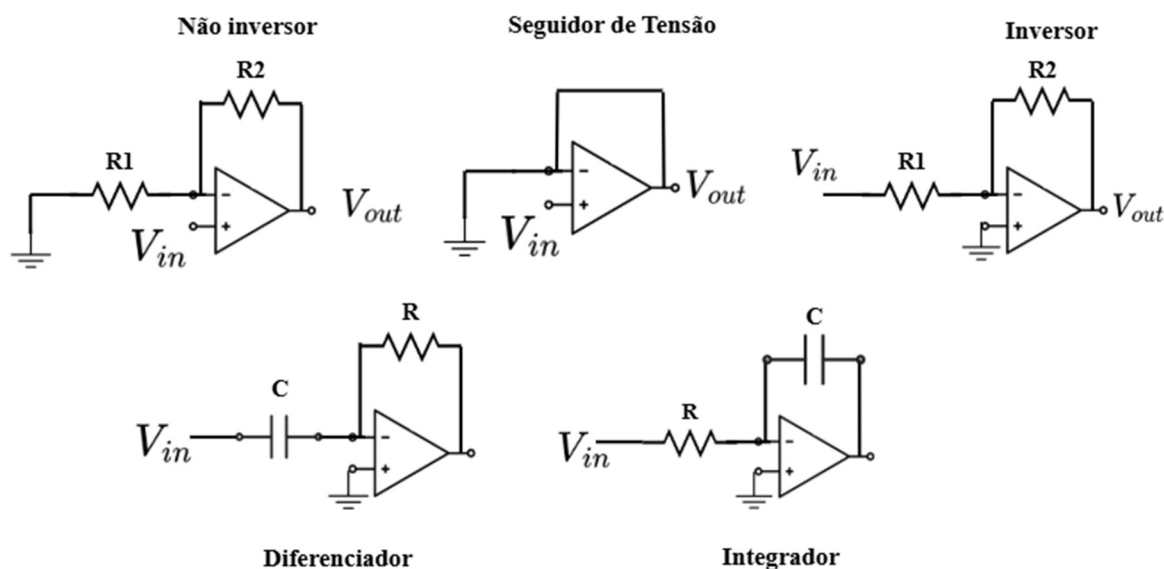
2.4.3.1 Amplificadores Operacionais

Em circuitos de condicionamento de sinais é comum o uso de amplificadores operacionais, definidos como circuitos eletrônicos integrados, capazes de aumentar a amplitude do sinal praticamente sem alterar o formato de origem. Para esse fim, utiliza-se em sua configuração, a realimentação negativa e outros componentes, tal como os resistores, definindo, assim o ganho que será aplicado.

Dentre as topologias de amplificadores existentes, destacam-se as seguintes configurações: inversora, não inversora, seguidor de tensão (buffer), integrador e diferenciador,

como ilustra a Figura 2.12 (Sedra e Smith, 2015).

Figura 2.12 – Algumas topologias de amplificadores operacionais.



Fonte: do autor

Considerando a configuração não inversora o ganho (A) é definido pela equação (2.25).

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \quad (2.25)$$

Sendo $R1$ e $R2$ resistores, V_{out} tensão de saída e V_{in} a tensão de entrada.

Ressalta-se que o sinal amplificado pode requerer condicionamento em relação a frequência, o que torna útil o uso de filtros analógicos.

2.4.3.2 Filtros analógicos

No contexto de sistemas eletroeletrônicos no qual envolve processamento e condicionamento de sinais, quando necessita-se trabalhar com o sinal em determinada faixa de frequência, são utilizados filtros analógicos, permitindo a resposta em frequência do sinal como desejado.

Em síntese, teoricamente existem diferentes tipos de filtros analógicos, sendo os mais comuns o filtro passa-baixa, o passa-alta e o passa-faixa. A característica que os distingue é a frequência de corte (f_c), na qual define a região de passagem e atenuação em que cada filtro opera. Nota-se que, a ordem cujo filtro se enquadra está relacionada ao número de componentes que armazena energia no circuito.

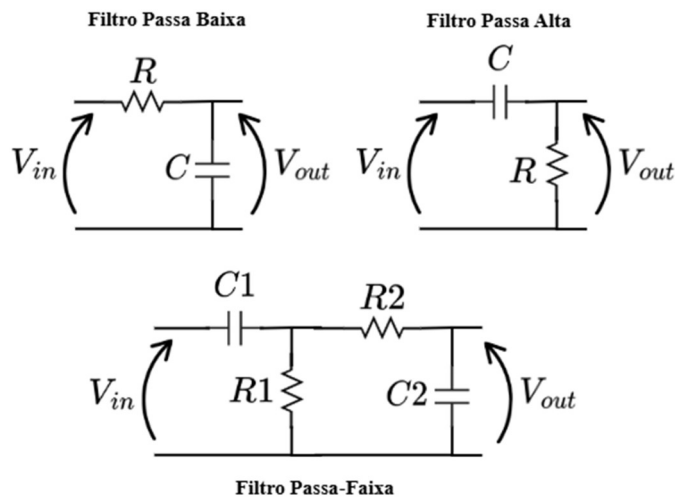
Considerando filtros de primeira ordem com resistor e capacitor, a frequência de corte (f_c), é representada pela equação (2.26)

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.26)$$

Sendo R o valor do resistor e C o valor do capacitor do filtro.

A Figura 2.13 mostra os tipos de filtros anteriormente citados em característica de primeira ordem.

Figura 2.13 – Configurações de filtros de primeira ordem.



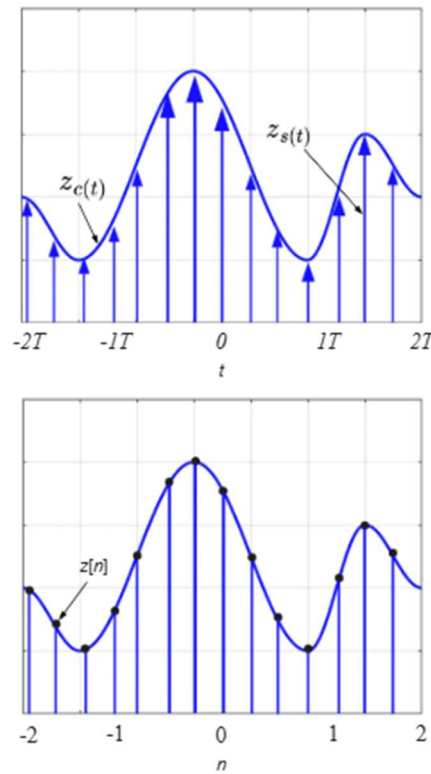
Fonte: do autor.

Referindo-se ao caso da topologia do filtro passa-faixa, é considerado o cálculo da frequência de corte para $R1$ e $C1$ e outra f_c para $R2$ e $C2$ (Sedra e Smith, 2015).

2.4.3.3 Teorema de amostragem e aliasing

Segundo Sedra e Smith (2015) os sistemas eletrônicos onde ocorrem aquisição de sinais, baseiam-se na amostragem e digitalização dos sinais analógicos, ou seja, na conversão do domínio do tempo contínuo para o domínio discreto, possibilitando assim a análise do sinal discretizado no domínio da frequência. A Figura 2.14 ilustra a aplicação da amostragem do sinal contínuo.

Figura 2.14 – Representação da amostragem do sinal contínuo.



Fonte: do autor.

Onde:

$z_c(t)$: Sinal contínuo no tempo.

$z_s(t)$: Sinal amostrado em impulsos.

T : Período de amostragem.

n : Índice de amostras.

$z[n]$: Valor do sinal amostrado no instante n .

Percebe-se que, para ocorrer a representação fiel do sinal analógico, é necessário considerar o critério de Nyquist, no qual define que a quantidade de amostras por unidade de tempo, ou seja, a taxa de amostragem no sinal, deve ser no mínimo o dobro da maior frequência contida no mesmo, conforme mostra a equação (2.27).

$$f_s \geq 2f_{\max} \quad (2.27)$$

Onde f_s é a frequência de amostragem e $f_{\max}$ é a frequência máxima contida no sinal. Caso esse critério não seja obedecido, pode ocorrer de forma indesejada a sobreposição de

componentes no domínio da frequência, atrapalhando a representação real do sinal analógico; tal cenário é caracterizado como *aliasing*; que de acordo com (Oppenheim e Schaffer, 2010), refere-se à distorção que ocorre no processo de amostragem do sinal.

Dessa maneira, para evitar *aliasing* no processo de aquisição do sinal são utilizados filtros *anti-aliasing*, onde normalmente são usados filtros passa-baixa, antes de amostrar o sinal (Oppenheim e Schaffer, 2010).

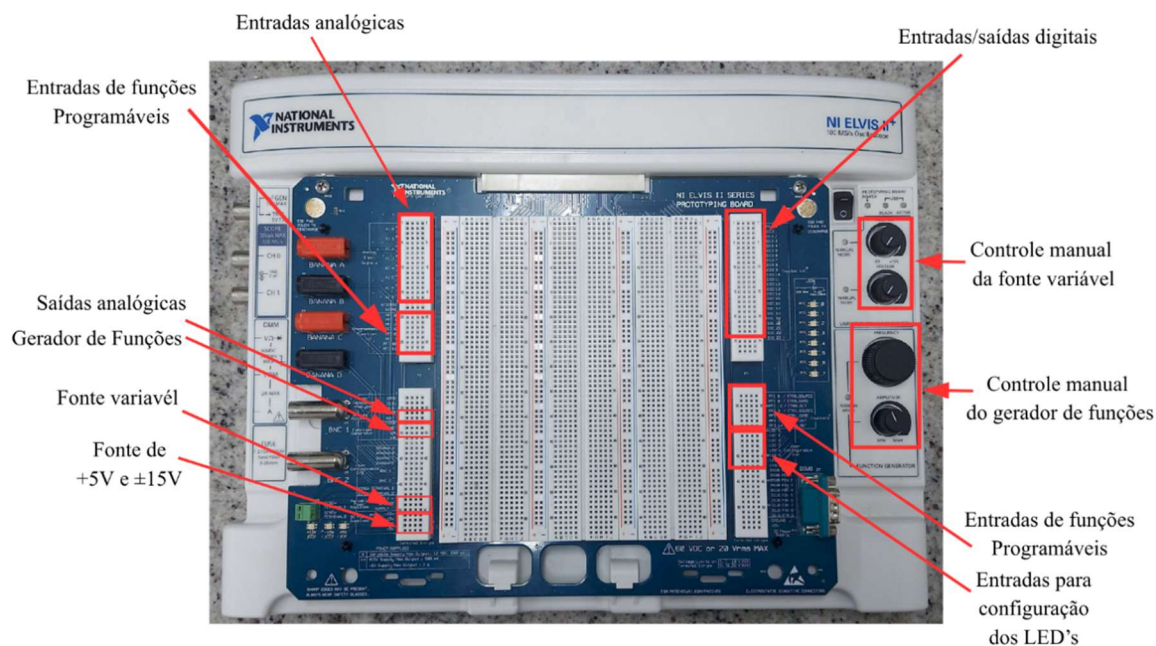
Na prática, o processo de amostragem do sinal, ou melhor, a conversão analógico-digital (ADC) pode ser realizada por microcontroladores bem como por placas de aquisição.

2.4.4 Placa de aquisição NI ELVIS II

Quando considerada a implementação física, a conversão entre sinais analógicos e digitais pode ser realizada por dispositivos dedicados à aquisição de dados, sendo responsáveis pela interface entre o ambiente físico e o computacional.

A placa de aquisição NI ELVIS II (*National Instruments Engineering Laboratory Virtual Instrumentation Suite*) trata-se de um dispositivo desenvolvido para fins de pesquisa, com um formato compacto, como observado na Figura 2.15.

Figura 2.15 – Aspecto físico da Placa NI ELVIS II.



Fonte: do autor.

Composta por alguns instrumentos integrados, possui uma placa de prototipagem, osciloscópio, multímetro digital, fonte de alimentação variável com controle manual, assim como gerador de funções, sendo possível realizar diversos ensaios e aplicações. Além disso a placa conta com:

24 (vinte e quatro) entradas/saídas digitais;

8 (oito) entradas analógicas ($\pm 10V$);

2 (duas) saídas analógicas;

7 (sete) entradas pra LEDs configuráveis.

A comunicação da NI ELVIS II com computador é realizada via interface serial USB possibilitando visualização gráfica dos sinais adquiridos via software NI ELVISmx, ou com outros softwares compatíveis. (National Instruments, 2011).

2.4.5 Software LabView

Nesse contexto, um dos softwares compatíveis com a placa NI ELVIS II é o *LabView*, que também foi desenvolvido pela *National Instruments*. Considerado uma ferramenta

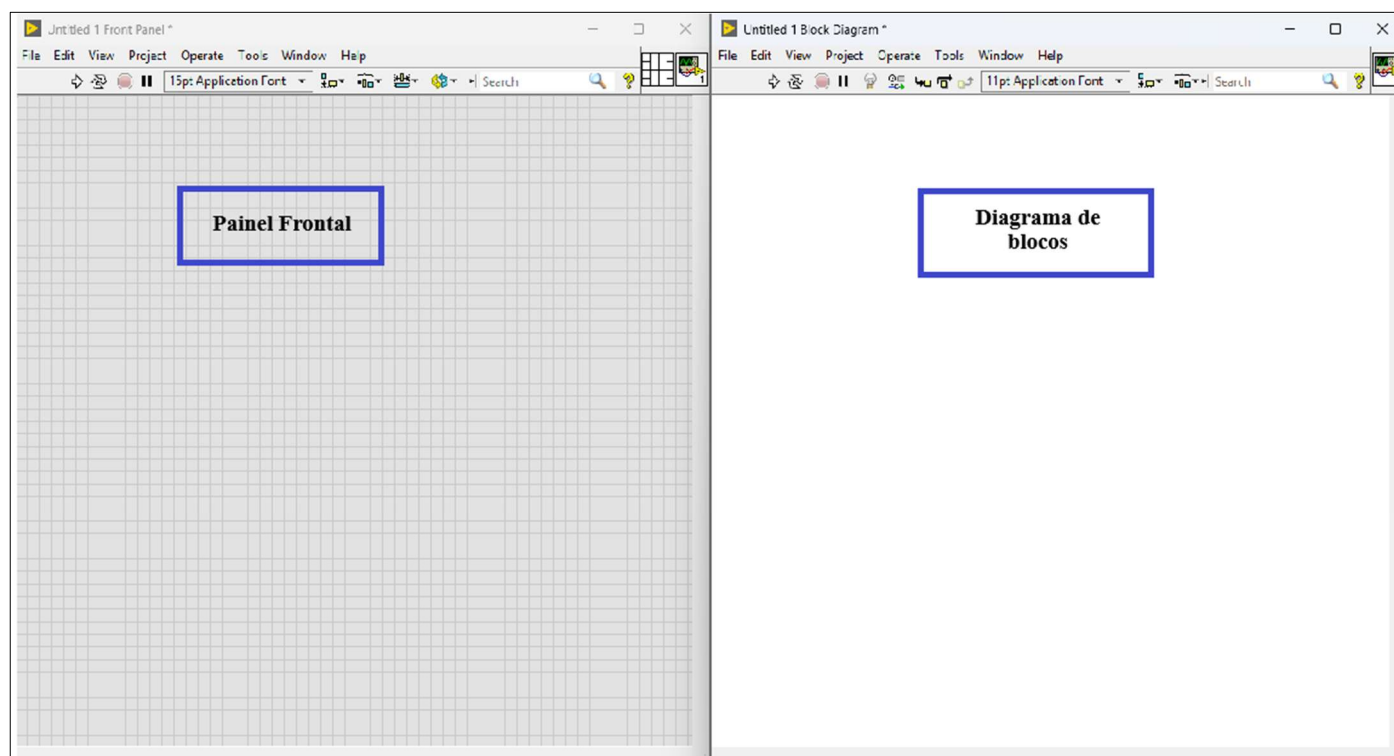
completa e eficaz em aplicações automatizadas de sistemas de aquisição e processamento de sinais, tal como no desenvolvimento de programas, instrumentação e controle de processos, junto a elaboração de testes e medições em tempo real.

O software é baseado em uma linguagem de programação gráfica, onde a lógica é desenvolvida em duas partes, no painel frontal, onde tem-se a interface para usuário e no diagrama de blocos, onde de fato a programação é elaborada. O conjunto de ferramentas e funções contidos em sua base são expostos em blocos, sendo possível desenvolver diversos programas de maneira mais intuitiva e gráfica. Os arquivos dos programas desenvolvidos são denominados VI's (*Virtual Instruments*) e, quando se cria um VI para executar uma função específica e reutilizável, esse é chamado de subVI (National Instruments).

Em relação a comunicação, por meio do software de drive do *LabView*, é possível estabelecer a integração com variados hardwares de terceiros, assegurando a compatibilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes, permitindo uma programação unificada.

A Figura 2.16 mostra a página principal do *LabView*, onde observa-se o painel frontal e o espaço para diagrama de blocos.

Figura 2.16 – Página principal do *Labview*.



Fonte: do autor.

Vale ressaltar que dentre as ferramentas existentes tem-se o bloco *DAQ Assistant*, que estabelece a comunicação com a placa de aquisição e realiza a leitura dos dados, possibilitando a configuração da taxa de amostragem (Hz) e o modo de aquisição (finito ou contínuo) de forma que os dados sejam tratados dentro do programa da maneira desejada. (National Instruments, 2011).

2.5 Revisão de alguns medidores comerciais

A análise de sistemas elétricos está diretamente ligada à medição e o monitoramento de suas grandezas, como corrente, tensão, potência e energia. Com objetivo de obter tais parâmetros, são utilizados diversos instrumentos de medição, que possibilitam avaliar tanto o desempenho quanto a qualidade de energia elétrica.

Nesse contexto, dentre os medidores comerciais mais utilizados destacam-se o multímetro, amperímetro, wattímetro e analisadores de energia; sendo cada um com suas características e finalidades, mediante a análise, controle e monitoramento dos variados tipos sistemas. Assim, torna-se essencial o estudo desses instrumentos, a fim de compreender e avaliar o comportamento das grandezas elétricas ao utilizá-los. (Kirk, Weedon e Kirk, 2019).

Nessa seção são apresentados alguns medidores comerciais normalmente utilizados em ambientes residenciais, acadêmicos e industriais, destacando suas principais características e aplicações.

2.5.1 Multímetro FLUKE 179

Definido como um instrumento de medição de grandezas elétricas multifuncional, o multímetro é capaz de medir tensão, corrente e resistência, sendo largamente utilizado em aplicações de instrumentação e controle de processos industriais. (Kirk, Weedon e Kirk, 2019).

O FLUKE 179 é um multímetro digital profissional da série 170 da FLUKE, proposto para aplicações de manutenção elétrica, eletrônica e análise de sistemas elétricos. Caracterizado pela tecnologia true RMS, esse multímetro consiste em medir com alta precisão sinais distorcidos, realizando medições de tensão até 1000V e corrente até 10A, tanto de sinal contínuo

quanto alternado (AC/DC).

Além de medir resistência, continuidade e frequência, o equipamento conta com a funcionalidade HOLD, MIN/MAX e auto range no que facilita observar e monitorar a variação dos sinais. Em relação a segurança, o equipamento atende às categorias CAT III 1000V e CAT IV 600V conforme a norma IEC 61010, tornando-se hábil pra medições em instalações prediais, residências, industriais e sistemas de distribuição de energia elétrica. A Figura 2.17 mostra o modelo FLUKE 179 (FLUKE CORPORATION, 2019) .

Figura 2.17 – Multímetro FLUKE 179.



Fonte: do autor.

2.5.2 Wattímetros MINIPA ET-4080 e ET-4091

Os wattímetros digitais são instrumentos amplamente utilizados na medição de potência elétrica em variados tipos de sistemas em corrente alternada, tanto monofásicos quanto trifásicos, sendo essenciais em aplicações industriais (Kirk, Weedon e Kirk, 2019).

Dentre os alicates wattímetros comercialmente conhecidos, tem-se o MINIPA ET-4080, visto na Figura 2.18a, definido como um alicate wattímetro digital é acompanhado da tecnologia true RMS que realiza medição confiáveis de tensão, corrente, potência e fator de potência de sinais não senoidais. O instrumento possui a capacidade de medição de corrente alternada até 1000A e tensão até 600V, e medição de frequência de 20Hz à 400Hz.

O diferencial do MINIPA ET-4080 consiste na capacidade de medir harmônicas até a

25ª ordem, além de calcular a THD, que, por meio da técnica e processamento FFT, permite identificar as distorções da forma de onda dos sinais medidos.

O MINIPA ET-4091, visto na Figura 2.18b, consiste em uma versão mais atual em relação ET-4080, apresentando melhor precisão e exatidão nas medições, assim como leitura de frequência em uma faixa maior, 5Hz a 500Hz, e possui comunicação USB integrada, permitindo coletar os dados para geração de relatórios técnicos. Entretanto o ET-4080 acompanha a função de medir harmônicas individuais o que não ocorre no ET-4091. Nota-se que ambos possuem a classificação CAT III 600V, categoria de segurança que permite utilização em atividades elétricas prediais e industriais. (MINIPA DO BRASIL, 2024) (MINIPA DO BRASIL, 2016).

Figura 2.18 – Wattímetros MINIPA ET-4080 e ET-4091.



Fonte: do autor.

2.5.3 Analisador de energia da FLUKE 434

Compreendido como sendo um analisador de energia elétrica trifásico, o FLUKE 434 é

um equipamento portátil desenvolvido para diagnósticos avançados em sistemas elétricos. Caracterizado por ser um equipamento completo, utilizando-se as garras de corrente e tensão, o analisador realiza medição de vários parâmetros essenciais para avaliação da qualidade de energia, com tensão, corrente, potências, fator de potência e energia, assim como desequilíbrio de fases, harmônicas e taxa de distorção harmônica.

Além de também contar com a tecnologia true RMS, O FLUKE 434, como mostra a Figura 2.19, conta com um diferencial, sendo capaz de realizar medição completa de potência em sinais distorcidos por harmônicas, baseado na norma IEEE 1459, utilizando o algoritmo da técnica FFT, na qual separa a componente fundamental das demais harmônicas contidas nos sinais medidos, calculando de forma individual a tensão e corrente fundamental.

Figura 2.19 – Analisador de energia FLUKE 434.



Fonte: do autor.

Os parâmetros são medidos em tempo real, e com sua interface intuitiva, são exibidos de forma prática e objetiva com gráficos detalhados de eventos, garantindo avaliação rápida do comportamento do sistema no qual é aplicado. Com a entrada USB é possível realizar a transferência dos dados via software FLUKE.

Em termos de segurança, o FLUKE atende às categorias de segurança CAT III 1000V e CAT IV 600V conforme a norma IEC 61010, caracterizando-se como adequado para medições em painéis industriais e sistemas de distribuição energia elétrica. (FLUKE CORPORATION).

2.6 Estado da Arte

A seguir serão apresentados alguns trabalhos científicos realizados com o intuito de medição e análise de qualidade de energética.

No trabalho realizado por Marcelino, Costa e Moraes (2016) é apresentado um protótipo desenvolvido para a medição de energia em ambiente comerciais. Para o protótipo foram utilizados o Arduino, sensores de tensão e corrente. Foi desenvolvido também pelos autores um software capaz de analisar as grandezas desejadas. Foram realizados testes experimentais onde os resultados das medições obtidas com o protótipo apresentaram eficiência na medição de grandezas elétricas com baixo custo e boa confiabilidade.

Os autores Campos, Louzada e Souza (2023) propõem um sistema de medição utilizando o microcontrolador ESP32, no qual é o responsável pela obtenção dos dados, processamento, envio dos dados e pelo sistema de supervisão. As grandezas elétricas foram enviadas para o ESP32 o qual calcula os indicadores de Qualidade de Energia Eletrica (QEE) e envia-os para o sistema supervisorio *Home Assistant*, que armazena tais indicadores em uma base de dados e apresenta graficamente o monitoramento da tensão, corrente e indicadores de QEE. Os resultados de análises experimentais, considerando sistemas senoidais puros e não puros, foram apresentados no trabalho mostrando conformidade nos índices em relação as normas de qualidade de energia.

Coelho (2020), utilizando o microcontrolador ESP8266, desenvolveu um sistema de medição de consumo e análise da qualidade de energia em sistemas monofásicos, no qual realiza as medições de forma não invasiva, sendo os parâmetros medidos: corrente, tensão, potência ativa, potência aparente, potência reativa, fator de potência e taxa de distorção harmônica total de corrente e tensão. O sistema desenvolvido por ele é capaz de armazenar os dados em nuvem, neste caso foi usado o servidor *Blynk*, podendo ser exibidos em aplicação para Android e iOS. Os resultados encontrados nas medições foram satisfatórios, através de validações comprovou-se que o algoritmo de Goertzel implementado realizou corretamente os cálculos.

O trabalho elaborado por Borges (2020), expõe o desenvolvimento de um analisador de qualidade de energia elétrica de baixa tensão em ambientes não industriais, cujo microcontrolador utilizado foi o LPC1768 da NXP. O protótipo realiza a medição de tensão e

corrente e sua implementação é focada na análise dos níveis de harmônicas no sinal da rede e do fator de potência. Por meio de um hardware embarcado possibilitou a exportação dos dados adquiridos via USB. Na conclusão do projeto o analisador desenvolvido cumpriu à todas as funcionalidades esperadas.

Em um estudo desenvolvido por Pereira (2022), propôs um analisador de qualidade de energia baseado no circuito integrado medidor de energia ATM90E36, que é capaz de medir, de forma completa, parâmetros importantes em sistemas de energia trifásicos e monofásicos. Os parâmetros medidos são potência ativa, reativa, aparente, distorções harmônicas e ângulo de fase. Integrado ao ESP8266 e a arquitetura *Web*, o ATM90E36 foi capaz de obter e analisar os dados das medições quando requisitado remotamente. De forma satisfatória, os resultados alcançados, corresponderam ao esperado, validando o projeto.

A implementação proposta por Arenas (2019), utilizou a arquitetura *Field-Programmable Gate Array* (FPGA) para desenvolver um medidor de qualidade de energia elétrica inteligente, capaz de realizar o processamento em tempo real dos parâmetros elétricos correspondentes a sistemas em condições senoidais, não senoidais, balanceados e não balanceados. Para validação do projeto, foram realizados alguns testes, considerado um sistema trifásico, onde as medições foram realizadas em um conjunto de cargas em bancada, com mais de uma configuração. Os resultados alcançados consolidaram positivamente o projeto proposto, concretizando-se uma ferramenta eficaz.

De forma semelhante ao Arenas (2019), os autores Mallala, Tajuddin e Thanikanti (2024), também utilizaram o FPGA para desenvolver um analisador de qualidade energia, sendo capaz medir tensões, sobretensões, afundamentos, potências e análise harmônica. Para analisar os dados, foi usado o *software Keysight VEE Pro* no computador. Após ser submetido a testes, o projeto apresentou resultados positivos ao serem comparados com o analisador da FLUKE 1736.

Com foco em aplicações industriais, Viciano et al. (2023) desenvolveram um sistema inteligente de medição de energia elétrica trifásica utilizando o microcontrolador ESP32, com integração a uma arquitetura de “Internet das Coisas” (IoT) para monitoramento remoto. O medidor proposto realiza a aquisição e tratamento de tensão, corrente, potências e os parâmetros referentes à qualidade de energia, como as harmônicas e THD. Após a aplicação de testes em laboratório e em usina fotovoltaica, obteve-se resultados coerentes, validando-se o sistema.

Os autores Kumar et al. (2021) propuseram um medidor de energia inteligente integrado a um *smart meter IoT*, onde as medições de tensão e corrente são realizadas utilizando transformadores TC e TP. Por meio da arquitetura do microcontrolador ATMEGA328-P embarcado, realiza-se a aquisição dos sinais, executa-se os cálculos dos parâmetros RMS, potências e análise das harmônicas utilizando algoritmos FFT. Em análise aos resultados obtidos, realizou-se a comparação, com os medidores comerciais FLUKE 434 II, FLUKE 317 e o MECO 5760, em que o erro percebido foi inferior a 2%.

De maneira similar Andrade (2023), utilizando um microcontrolador PIC18F4520 para coleta e tratamento dos dados, desenvolveu uma plataforma para medição de consumo de energia elétrica. As medições de corrente e tensão das cargas foram feitas com uso de um sensor de efeito Hall e transformador abaixador respectivamente. São calculados os valores de tensão e corrente eficazes tal como fator de potência. Os dados são monitorados por uma aplicação *Web* com uso de um ESP-01. Os resultados encontrados foram analisados em comparação a um multímetro, um osciloscópio e aos cálculos teóricos, os erros relativos ficaram em torno de 5%.

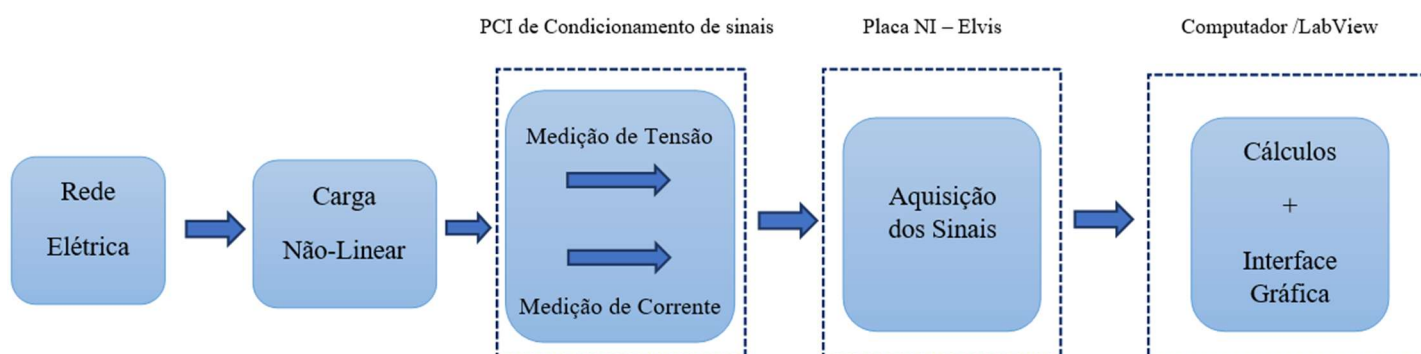
Em um estudo, os autores Zainal et al (2022) desenvolveram um analisador de qualidade de energia virtual no software *LabView*. Utilizou-se o medidor de energia da FLUKE 435 II para medir os valores de tensão e corrente das cargas e, os dados coletados do mesmo, foram tratados no software, onde são feitos os cálculos e extraídos os resultados, sendo eles: valores eficazes de tensão e corrente, potências ativa, reativa e aparente, fator de potência, frequência, espectro de frequência e distorção harmônica. Mediante os resultados encontrados, conclui-se que o software *LabView* pode ser usado de forma confiável para análise de dados referentes a qualidade de energia elétrica.

Após esse estudo do estado da arte, comprovou-se a importância da topologia estudada neste trabalho de conclusão de curso, pois vários autores trabalham em seus protótipos criando soluções eficientes para o monitoramento de QEE sem a dependência de equipamentos comerciais caros e, por muitas vezes, inacessíveis em laboratórios.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será descrito todo desenvolvimento e metodologia adotados na construção do projeto, cujo mesmo define-se por um medidor de qualidade de energia aplicado em sistema elétrico monofásico (fase-neutro). O primeiro tópico apresenta os métodos de medição de tensão e corrente utilizados. Em seguida serão expostos os circuitos de condicionamento de sinais definidos, sendo posteriormente apresentada a placa de circuito impresso desenvolvida, a configuração da placa de aquisição de dados, a lógica implementada no *LabView*, os testes do sistema de medição e por fim, o ensaio com o protótipo desenvolvido. A Figura 3.1 mostra o diagrama de blocos do projeto, descrevendo as etapas do processo de desenvolvimento do mesmo.

Figura 3.1 – Diagrama do projeto proposto.



Fonte: do autor.

3.1 Medição de Tensão

Inicialmente, foi utilizado um transformador de potencial bivolt 220V-120V/12V, com relação de transformação 10:1, a fim de reduzir a tensão e garantir isolamento elétrico entre a rede e o circuito de medição. Além dessas funções principais, o transformador também atua como um filtro, o que implica em maior atenuação para componentes de alta frequência. Entretanto, para as harmônicas de interesse consideradas neste estudo, essa atenuação é

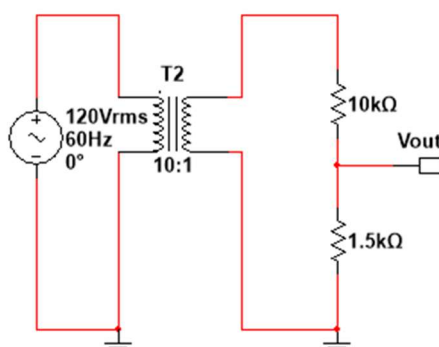
pequena, não comprometendo análise do sinal.

Posteriormente, o sinal (12V) fornecido no secundário do transformador foi aplicado a um divisor de tensão, de modo a adequar o sinal lido para um valor compatível com a faixa de operação da placa NI Elvis II.

O divisor de tensão foi dimensionado utilizando os resistores de $R1=10k\Omega$ e $R2=1,5k\Omega$, e aplicando-os na equação (2.24), obteve-se aproximadamente 1,56V RMS na saída (V_{out}), assegurando que o sinal chegue adequadamente ao processo de aquisição. A escolha dos valores dos resistores foi realizada com objetivo de garantir o baixo carregamento sobre o secundário do transformador, minimizando interferências na forma de onda do sinal.

Na simulação, foi adotado um modelo ideal para o transformador, como aproximação do sistema real, visando simplificar a análise do comportamento do circuito e da relação de transformação. A Figura 3.2 mostra o estágio inicial da medição de tensão.

Figura 3.2 – Estágio inicial do circuito de medição de tensão.



Fonte: do autor.

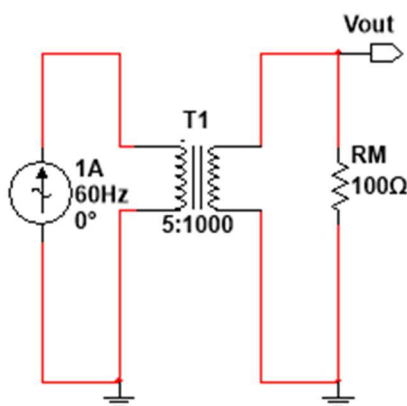
3.2 Medição de corrente

Para a medição de corrente, foi utilizado o transdutor de corrente por efeito Hall LEM LA 55-p, com a relação de transformação 1:1000. Optou-se por este transdutor, devido sua boa precisão, linearidade e por garantir o isolamento elétrico entre a rede elétrica e o circuito de aquisição.

O LEM LA 55-p foi configurado com 5 voltas (espiras) no seu enrolamento primário, a fim de aumentar sua sensibilidade ao sinal medido. Com isso, a corrente medida é multiplicada

pelo número de voltas, dessa forma tem-se no enrolamento secundário uma corrente 5 vezes maior, permitindo assim uma melhor resolução na medição. A Figura 3.3 apresenta o estágio inicial do circuito de medição de corrente.

Figura 3.3 – Estágio inicial do circuito de medição de corrente.



Fonte: do autor.

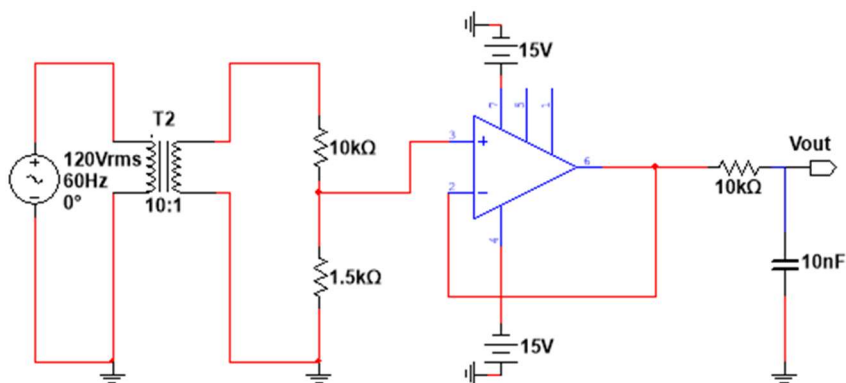
De acordo com as especificações definidas no datasheet do transdutor, foi definido o resistor de medição dentro da faixa aceitável, $R_M = 100\Omega$. Dessa forma, a corrente no secundário do transdutor, ao passar pelo R_M obtém-se uma tensão de leitura (V_{out}), ou seja, um sinal de tensão proporcional à corrente medida, em condições adequadas para o próximo estágio.

3.3 Circuito de condicionamento de sinais

Em sequência às medições de tensão e corrente, tem-se os próximos estágios, que possibilitam os ajustes necessários de modo que o sinal esteja em condições de ser digitalizado na etapa posterior.

Dessa maneira, no circuito de medição de tensão, após o divisor resistivo foi inserido um amplificador operacional na topologia seguidor, e posteriormente um filtro passa-baixa. A Figura 3.4 ilustra o circuito completo de medição de tensão.

Figura 3.4 – Circuito completo de medição de tensão.



Fonte: do autor.

A utilização do amplificador operacional como seguidor de tensão, no caso com ganho unitário, permite o isolamento do divisor de tensão, evitando variações na tensão medida devido ao efeito de carga do estágio seguinte.

Após o seguidor de tensão foi implementado um filtro passa-baixa RC de primeira ordem, com intuito de atenuar componentes de alta frequência associados a ruídos e interferências, preservando simultaneamente a componente fundamental (60Hz) do sinal medido e suas primeiras harmônicas de interesse (3^a, 5^a, 7^a, 9^a e 11^a). Além de atuar como filtro *anti-aliasing* antes do sinal ser digitalizado. Nesse contexto, a frequência de corte definida foi $f_c = 1,5\text{kHz}$ e, adotando-se o valor do capacitor $C = 10\text{nF}$, o resistor foi calculado conforme a equação (2.26):

$$R = \frac{1}{2\pi(10 \times 10^{-9}) \cdot f_c} \quad (2.26)$$

Obteve-se um valor de resistência de $R = 10,61\text{k}\Omega$. Em seguida, adotou-se o valor comercial mais próximo, $R = 10\text{k}\Omega$. Assim, a frequência de corte passou a ser aproximadamente $f_c = 1,59\text{kHz}$, valor próximo ao especificado inicialmente (1,5kHz).

Considerando os demais estágios do processo de condicionamento do sinal de corrente, após o resistor de medição, adotou-se um filtro passa-baixa com a mesma configuração aplicada no circuito de medição de tensão, com objetivo de preservar as primeiras harmônicas do sinal e atenuar já na entrada as componentes de alta frequência contidas no mesmo, e ruídos associados à medição e ao próprio transdutor. Dessa forma, a filtragem reduz a ocorrência de ruídos em estágios posteriores, impedindo que sejam amplificados.

No próximo estágio foi implementado um amplificador operacional na configuração não inversora, adicionando um ganho ao sinal, a fim de ajustar amplitude do mesmo e melhorar a resolução em relação ao processo de digitalização. Nisso, definindo-se o ganho =2, e adotando $R_1=3,3k\Omega$, obteve-se R_2 com base na equação (2.25):

$$R_2 = (2 - 1) \times (3,3 \times 10^3)$$

$$R_2 = 3,3k\Omega$$

Definido o segundo resistor, partiu-se para último estágio do circuito de condicionamento de corrente, onde foi inserido um filtro passa-alta seguido de um amplificador seguidor.

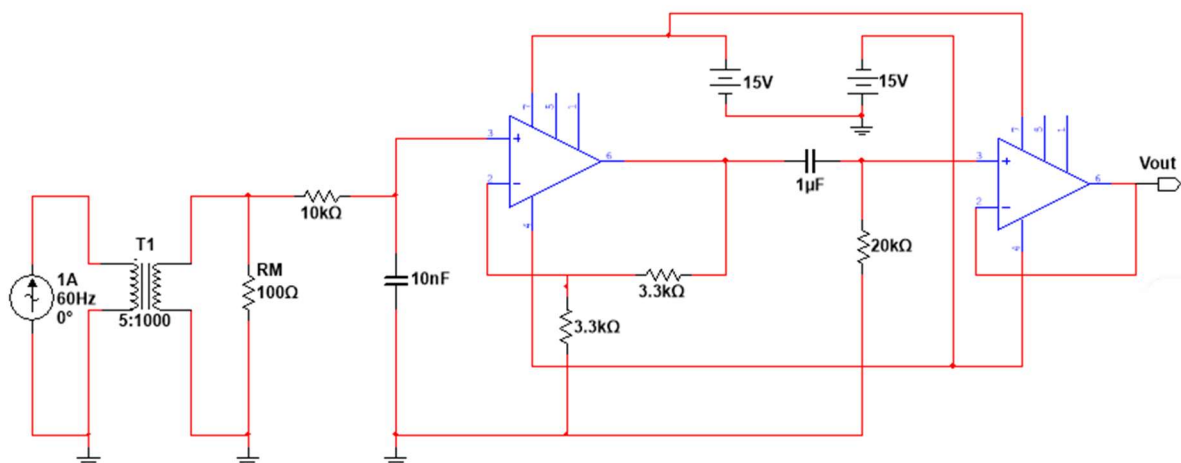
Para o filtro, foi definido a frequência de corte em $f_c = 8Hz$, e considerando um valor de $C=1\mu F$ foi obtido o valor de R aplicando-se a equação (2.26).

$$R = \frac{1}{2\pi(1,0 \times 10^{-6}) \cdot f_c}$$

Resultando em aproximadamente $R=20k\Omega$. Esse estágio possibilita a remoção de componentes contínuas contidas no sinal (offset DC) associadas ao transdutor e ao processo de medição, reduzindo possíveis variações no sinal.

Posteriormente ao filtro, utilizou-se um seguidor de tensão com objetivo de isolar o estágio de filtragem da etapa de digitalização do sinal, tal como garantir que o filtro não sofra interferência. Dessa maneira, a Figura 3.5 apresenta o circuito completo de medição de corrente.

Figura 3.5 – Circuito completo de medição de corrente.



Fonte: do autor.

Com a configuração adotada de cinco espiras no primário do transdutor de corrente e

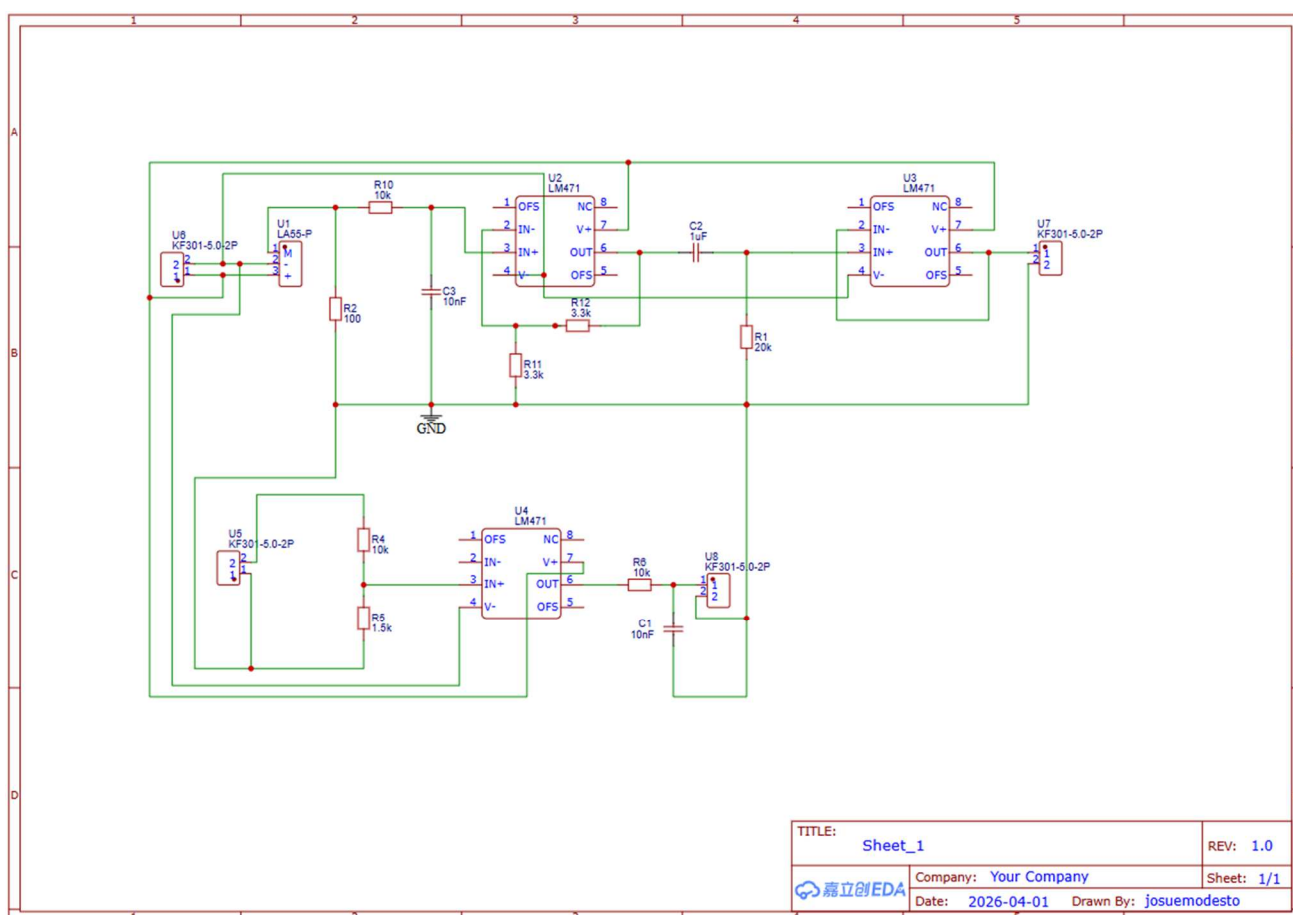
ganho de amplificação igual a 2 no estágio de condicionamento, foi estabelecida a escala de conversão do sistema de medição de corrente, resultando em uma relação aproximada de 1V/A RMS na saída do circuito.

Após a definição dos circuitos de condicionamento de sinais, realizou-se testes preliminares em simulação no software *Multisim*, para verificação do funcionamento dos mesmos. Em seguida foi realizada a confecção da placa de circuito impresso (PCI) do projeto.

3.4 Projeto e confecção da PCI

Com os circuitos de condicionamento definidos e testados, iniciou-se o projeto e confecção da placa de circuito impresso. Utilizou-se o software online *EasyEDA* pra desenvolvimento da PCI, no qual inicialmente foi inserido o esquemático dos circuitos realizando as devidas ligações dos componentes, conforme ilustra a Figura 3.6.

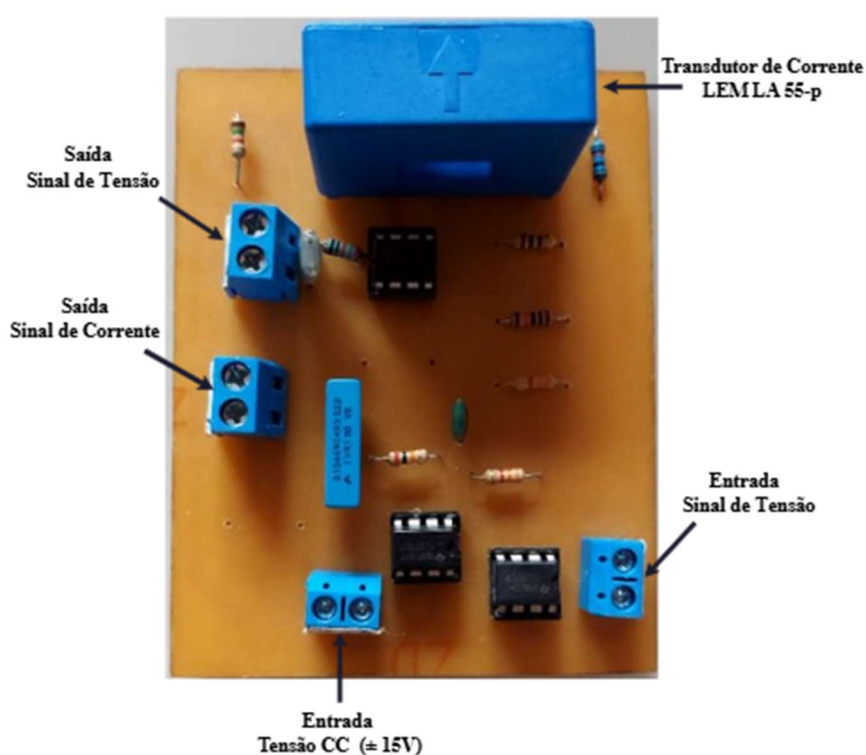
Figura 3.6 – Esquemático da Projeto da PCI.



A partir do esquemático elétrico ajustado no software, foi gerado a *layout* da PCI assim como o roteamento das trilhas e posicionamento dos componentes, posteriormente foi impresso em papel apropriado e transferido para a placa de cobre. Em seguida a placa foi imersa em uma solução química (cloreto férrico), onde o material excedente de cobre foi removido, permanecendo somente as trilhas dos circuitos.

Na etapa seguinte, realizou-se a furação da placa e soldado os componentes conforme o projeto. A Figura 3.7 mostra a versão final da placa confeccionada e utilizada no trabalho.

Figura 3.7 – PCI desenvolvida.



Fonte: do autor.

A Tabela 3.1 mostra os componentes utilizados para confecção da PCI do projeto.

Tabela 3.1 – Lista de componentes utilizados na PCI.

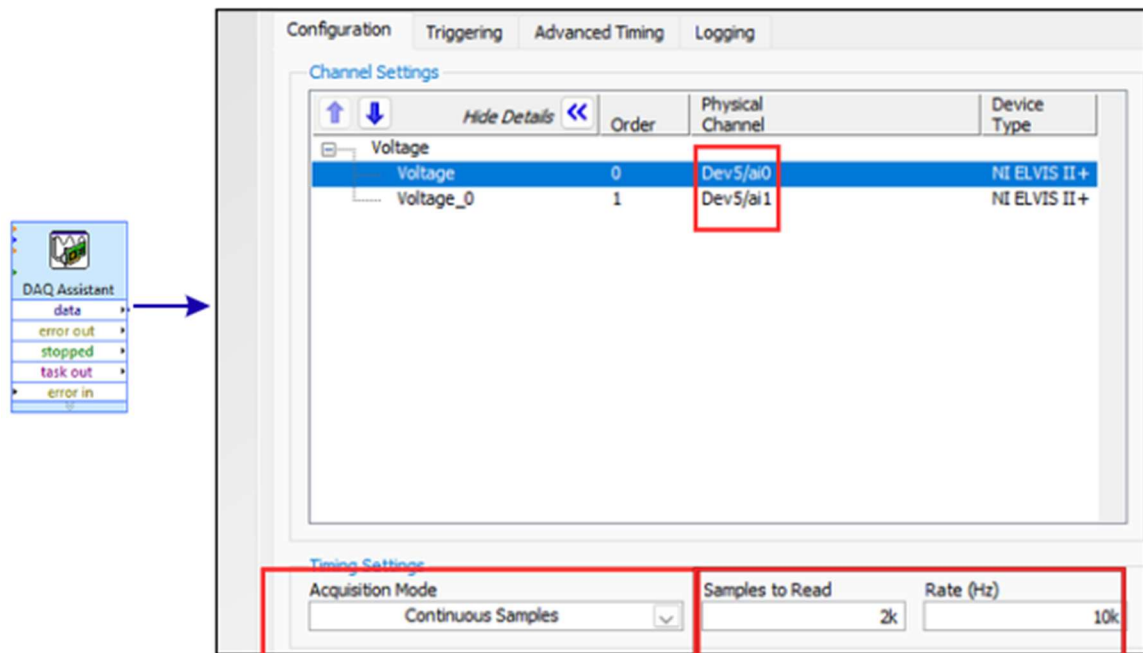
Lista de componentes utilizados na PCI	
4 - Bornes Kre, 5mm, 2T	1 – Resistor de 1,5k Ω
3 - Amplificadores Operacionais L071CP	1 – Resistor de 100 Ω
3 - Resistores de 10k Ω	1 – Capacitor de 1 μ F
2 - Resistores de 3,3k Ω	1 – Capacitor de 10nF
1 – Resistor de 20k Ω	1 – LEM LA 55-p

Fonte: do autor.

Finalizada a confecção da PCI, foram realizados testes de continuidade e verificação das tensões de alimentação, sinais dos amplificadores e demais componentes, com objetivo de garantir o funcionamento correto dos circuitos e da PCI como um todo, antes de realizar a integração da mesma à etapa posterior, definida como aquisição dos sinais.

3.5 Aquisição e processamento dos sinais

A etapa definida após o condicionamento dos sinais medidos de tensão e corrente, consiste na aquisição e conversão de tais sinais analógicos para sinais digitais, possibilitando que sejam tratados em ambiente computacional. Para isso, utilizou-se a placa de aquisição NI Elvis II integrada ao software *LabView*. Na Figura 3.8 observam-se as configurações de aquisição utilizadas, definidas no bloco *DAQ Assistant* do software.

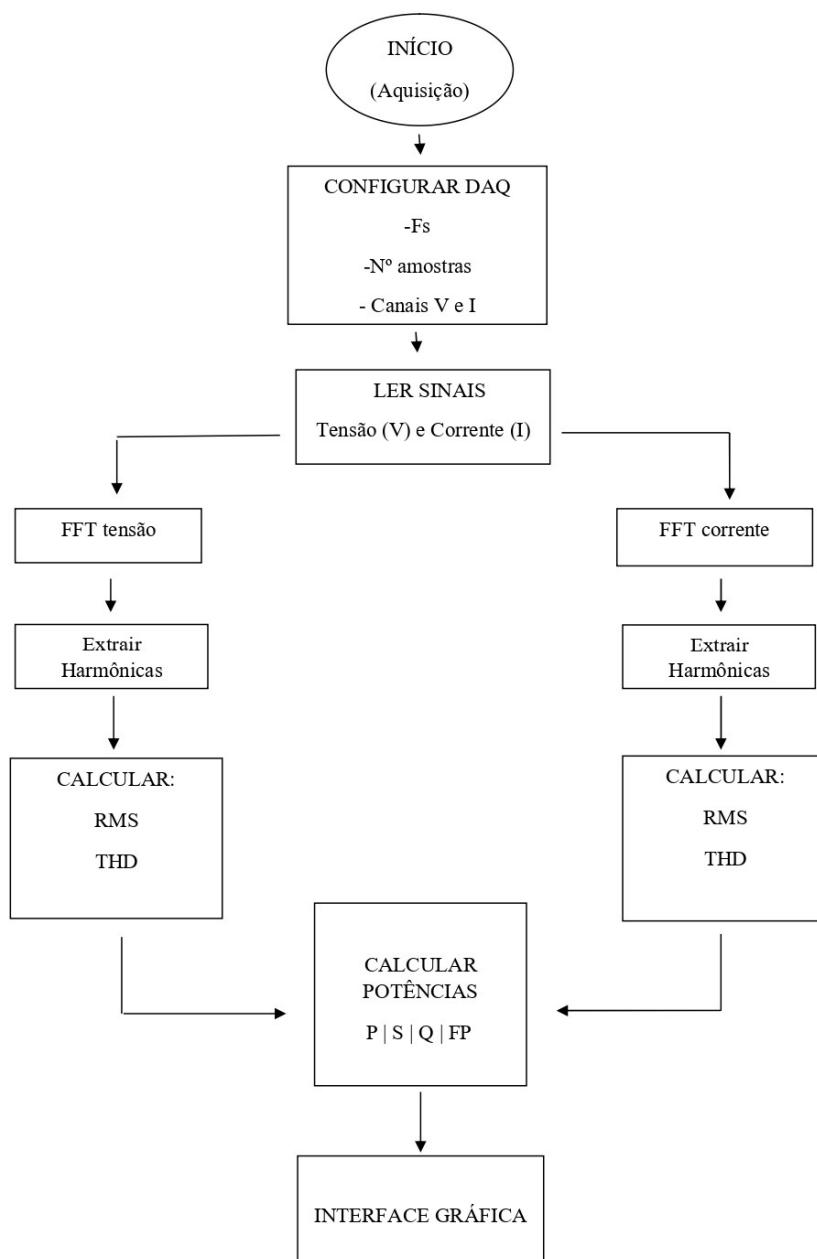
Figura 3.8 – Configuração da aquisição no *LabView*.

Fonte: do autor.

Dessa forma, foram definidos o modo de amostragem contínua (*Continuous Samples*), a leitura de blocos com 2000 amostras (*Samples to Read*), a frequência de amostragem assim como os canais analógicos, (ai0 para sinal de tensão e ai1 para o sinal de corrente). Logo, com base na frequência de corte de $f_c = 1,59\text{kHz}$, dos filtros passa-baixa contidos nos circuitos de condicionamento, adotou-se $f_s = 10\text{kHz}$, obtendo uma taxa de amostragem que atende ao critério de Nyquist e que possibilita digitalização adequada dos sinais.

Com a configuração de aquisição dos sinais definida, possibilitou-se prosseguir o projeto com a etapa de implementação da lógica de processamento dos sinais no *LabView*. Em síntese, após a aquisição e leitura dos sinais pelo bloco *DAQ Assistant*, os mesmos seguem sendo tratados por meio de uma programação de bloco a fim de se obter os parâmetros essenciais pra a análise de qualidade energia. Para melhor compreensão da lógica implementada no software, foi elaborado um fluxograma conforme apresentado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Fluxograma da lógica implementada.



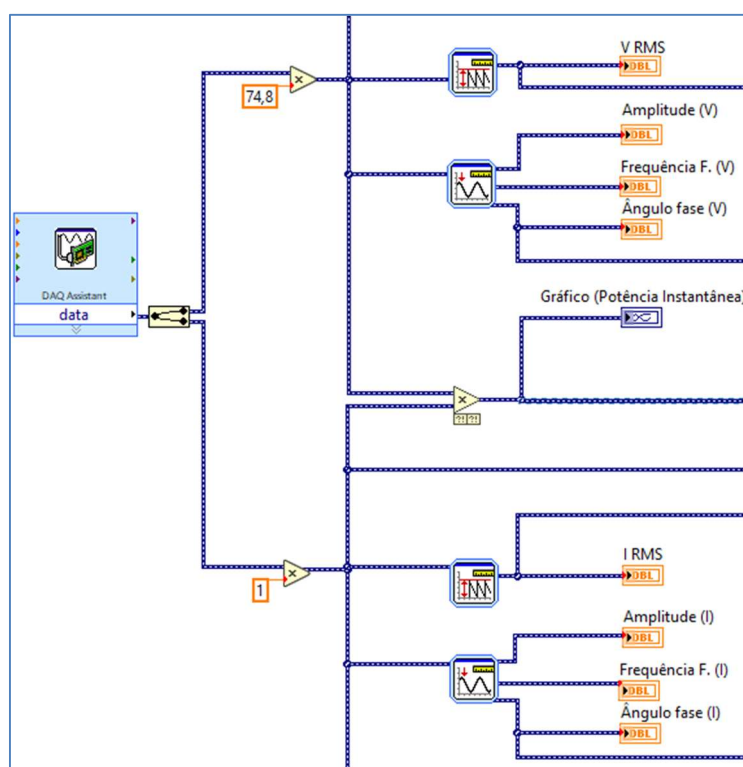
Fonte: do autor.

Conforme detalhado no fluxograma, após as configurações no bloco *DAQ Assistant*, o processo inicia com a leitura dos dados aquisitados de tensão e corrente, em seguida tem-se a etapa de decomposição dos sinais com suas respectivas frequências, utilizando blocos filtros aplicando a FFT, possibilitando identificar as harmônicas presentes. De maneira semelhante obtém-se os valores de amplitude, frequência e ângulo fase de ambos sinais e o valor da THD total. Posteriormente, através de somatórios das componentes harmônicas é possível calcular

os valores de potências, fator de potência conforme as equações expostas na seção 2.3.5. Por fim, através do painel frontal do software, são visualizados os valores obtidos e os gráficos das formas de onda dos sinais medidos, possibilitando melhor análise do comportamento do sistema.

A Figura 3.10 ilustra o início da programação realizada no software *LabView*. Ressalta-se que versão completa do programa é apresentada no Apêndice A desde trabalho.

Figura 3.10 – Início da programação no *LabView*.



Fonte: do autor.

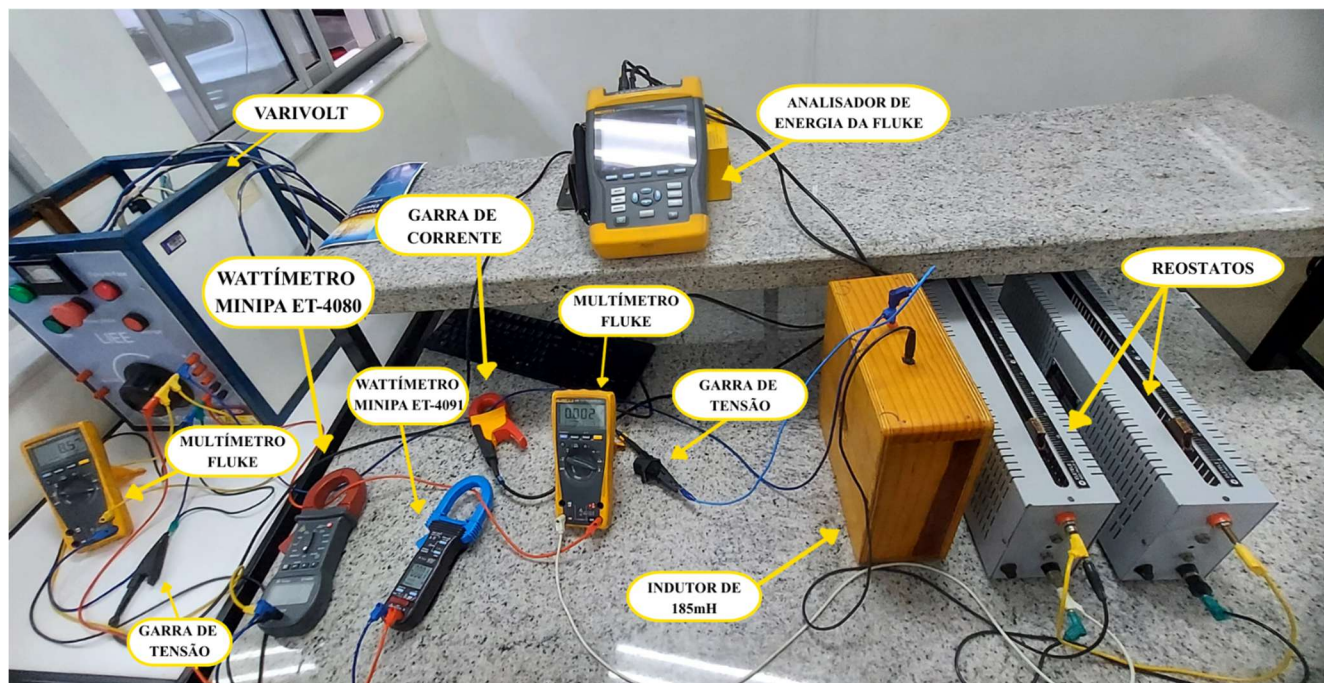
Observa-se na Figura 3.10 a distinção dos sinais de tensão e corrente que seguem para os primeiros blocos, onde são calculados os valores eficazes e extraídas as amplitudes, frequência fundamental e ângulo de fase. Nota-se no início, os multiplicadores, posicionados para ajustar e representar a amplitude do sinal em valor real.

3.6 Ensaio do Sistema de Medição

Considerando importante a análise preliminar do sistema de medição tal como a funcionalidade e coerência das medições dos instrumentos disponíveis, foram realizados testes em uma carga RL conhecida, utilizando dois reostatos em paralelos ajustados em 19Ω , em série

a um indutor de 185 mH, (de resistência interna de $20\ \Omega$), e alimentada por uma tensão de 127V RMS, proveniente de um Varivolt trifásico, conforme mostra a Figura 3.11.

Figura 3.11 – Ensaio utilizando uma carga RL.



Fonte: do autor.

Como observado na Figura 3.11, foram utilizados alguns medidores, como o multímetro FLUKE 179, os wattímetros MINIPA ET-4080 e ET-4091, e juntamente o analisador de energia da FLUKE 434. No ensaio foram ligados os wattímetros em paralelo com a carga para medição de tensão e o envolvendo no condutor da carga para medição de corrente, da mesma forma foi realizado com o analisador de energia. Também foram inseridos um multímetro em série com a carga para medição de corrente e outro em paralelo medindo tensão.

Destaca-se que tais instrumentos utilizados são pertencentes a instituição CEFET-MG CAMPUS II, sendo amplamente reconhecidos e empregados em atividades experimentais.

Em paralelo às medições de bancada realizou-se a simulação do circuito via software, de modo analisar e comparar com os valores medidos.

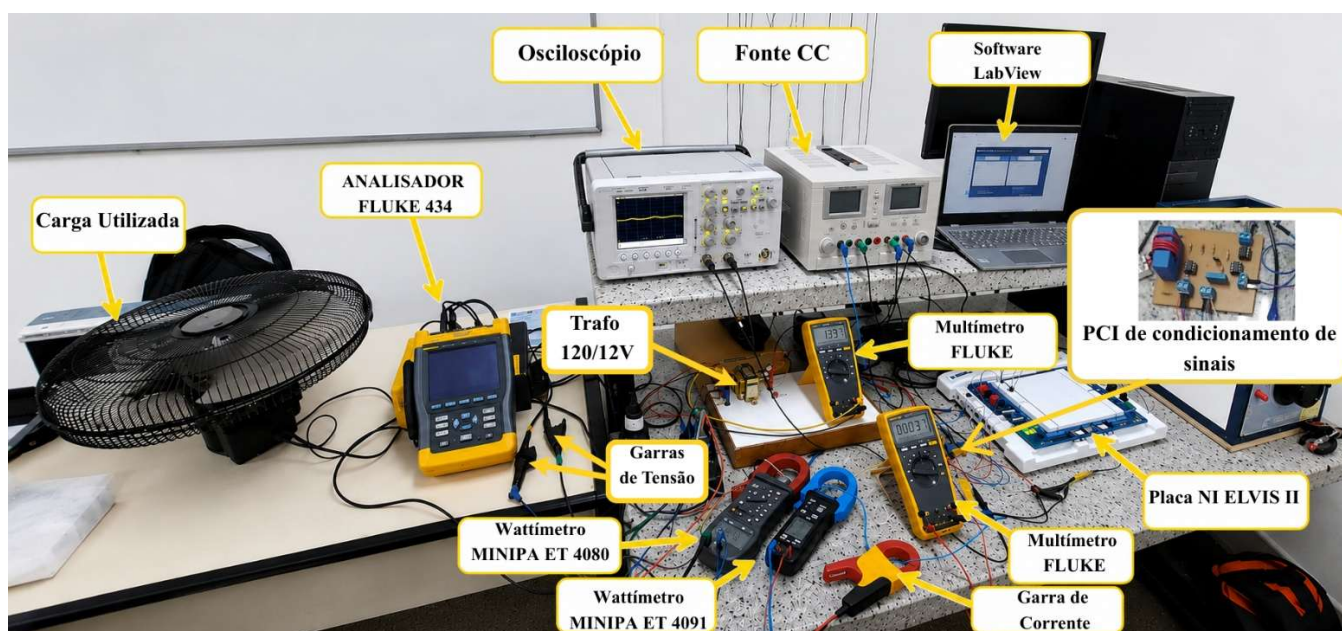
3.7 Protótipo desenvolvido

Com base na estrutura projetada inicialmente e na integração das etapas construtivas do

projeto, foi desenvolvido o protótipo de um medidor de qualidade de energia, possibilitando a realização de testes e a verificação do seu funcionamento.

A montagem foi realizada em bancada, e os componentes que compõe o projeto foram posicionados e interligados conforme o esquema proposto, onde a carga utilizada foi um ventilador com controle de velocidade por TRIAC (*Triode for Alternating Current*), triodo de corrente alternada. O ventilador utilizado, da marca a Venti-Delta, possui 200W de potência e a tensão de alimentação é 127 V – 60Hz, conforme apresenta a Figura 3.12.

Figura 3.12 – Protótipo desenvolvido.



Fonte: do autor.

Conforme detalhado no decorrer deste capítulo, inicialmente a PCI é alimentada com tensão contínua de $\pm 15V$, para alimentar o transdutor de corrente LEM LA 55-p e os amplificadores operacionais contidos no circuito. Em seguida tem-se a medição dos sinais de tensão e corrente, onde o sinal de saída do secundário do transformador é conectado na entrada CA da placa de condicionamento e o condutor que alimenta o ventilador é envolvido no transdutor LEM LA 55-p com as 5 voltas definidas. Os sinais de tensão e corrente de saída da PCI foram conectados às pontas de prova do osciloscópio e às entradas analógicas da Placa NI Elvis II, que por meio do cabo usb comunica-se com o computador possibilitando o monitoramento em tempo real via software *LabView*.

Os terminais de referência (GND) da PCI, da placa de aquisição e da fonte de

alimentação CC foram interligados, estabelecendo um ponto referencial comum entre os componentes, evitando a flutuação dos sinais durante as medições.

Em relação às medições, semelhantemente ao ensaio preliminar, o analisador de energia FLUKE 434, e os wattímetros MINIPA ET-4080 e ET-4091 foram ligados em paralelo ao ventilador para medir a tensão de entrada e com a garra envolvida no condutor do mesmo, para medir a corrente drenada. Conectou-se, também, dois multímetros FLUKE 179 ao circuito da carga, um em série, medindo a corrente e outro em paralelo para medir a tensão.

A Figura 3.13 apresenta o transformador abaixador utilizado no projeto.

Figura 3.13 – Transformador utilizado no projeto.



Fonte: do autor.

O fabricante deste transformador é a W.B Transformadores, cujo os dados correspondentes são:

Tensão de entrada: 127/220 Vca;

Tensão de saída: 12-0-12 Vca;

Corrente nominal: 1A;

Frequência: 60Hz.

4 RESULTADOS

Uma vez definido e desenvolvido o projeto proposto, com suas etapas e métodos, torna-se possível analisar e compreender cada processo executado e o seu comportamento como um todo. Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante os testes e validações realizados no sistema desenvolvido, composto pela placa de condicionamento de sinais, plataforma de prototipagem NI Elvis II e o programa implementado no software *LabView*, visando o bom funcionamento e desempenho do analisador de qualidade de energia projetado.

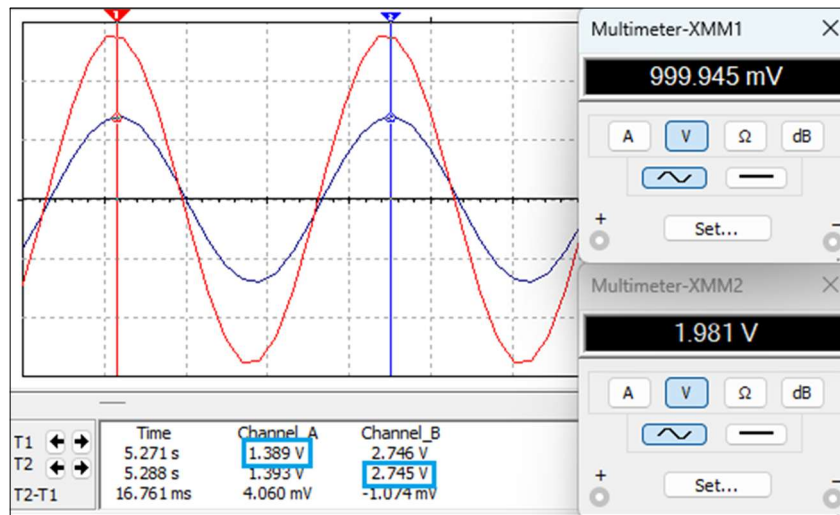
4.1 Análise e validação por simulação dos circuitos da PCI

Nessa seção serão exibidos os resultados referentes aos testes e validações dos circuitos de medição de corrente e de tensão. Etapa essencial para garantir a conformidade dos resultados e a fidelidade dos sinais monitorados.

4.1.1 Circuito de medição de corrente

Com o circuito de medição de corrente definido, no software *Multisim*, adotou-se um valor de 10mA RMS no secundário do transdutor LEM LA 55-p, de modo que na entrada do circuito, tem-se a tensão no resistor R_m , sendo aproximadamente 1V RMS. Nisso, em função do ganho (2) estabelecido no mesmo, observa-se o sinal de saída, representado pela curva vermelha, em relação ao sinal de entrada de cor azul, como mostra a Figura 4.1.

Figura 4.1 – Relação de ganho do circuito de medição de corrente.



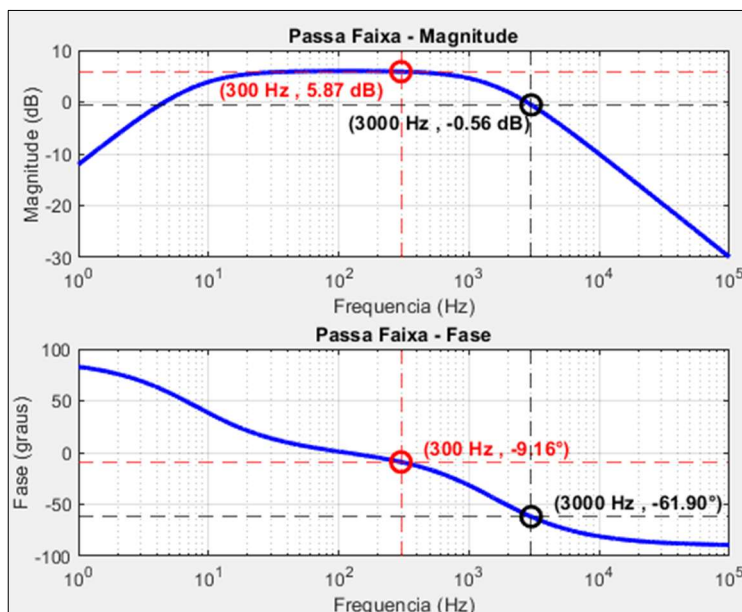
Fonte: do autor.

Percebe-se que a relação dos entre entrada e saída dos sinais medidos pelos cursores apresentam ganho aproximadamente igual ao valor projetado, constando praticamente 2A RMS na saída. No caso, tais valores medidos no circuito, como sinal de tensão, são referenciados em relação à corrente, representando a situação real analisada, como detalhado na secção 3.2.

Na simulação observa-se uma mínima defasagem entre os sinais de entrada e saída, a qual pode ser atribuída ao comportamento dinâmico do circuito de condicionamento, que não é puramente resistivo devido a presença dos filtros RC e amplificadores, os quais podem introduzir constantes de tempo no circuito.

Em complemento à avaliação do circuito, foi realizado no *Matlab* a análise de resposta em frequência, visando o comportamento do mesmo em função do filtro passa-faixa ativo que o compõe. Nisso, adotou-se a frequência do sinal de entrada para dois casos, sendo 300Hz e 3kHz as frequências definidas. Na primeira situação, observa-se na Figura 4.2 que o sinal em 300Hz permanece na região de passagem com ganho 2, aproximadamente em +6dB, ou seja, mantendo um ganho próximo ao valor teórico do circuito, assim como apresentado pequena defasagem.

Figura 4.2 – Análise da resposta em frequência do circuito de medição de corrente.



Fonte: do autor.

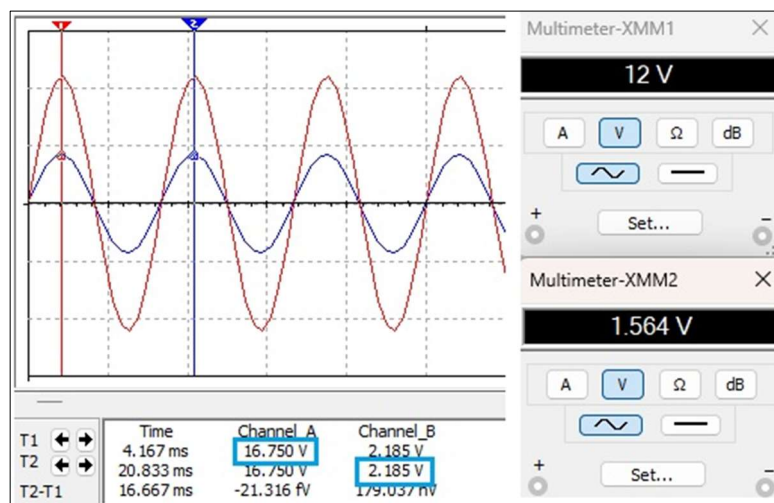
Em relação a resposta do circuito na frequência de 3kHz, nota-se que, por estar acima da frequência de corte superior definida pelo filtro ($f_c=1,59\text{kHz}$), o sinal encontra-se fora da região passante do sistema, consequentemente, com ganho reduzido e aumento na defasagem, provocada pelos capacitores contidos no circuito, que introduzem atraso de fase quando o sinal começa a distanciar da região de passagem. Dessa maneira, confirma-se o comportamento esperado do filtro em relação ao circuito em estudo.

4.1.2 Circuito de medição de tensão

Conforme definido no projeto, o circuito de medição de tensão destina-se a reduzir a tensão na entrada, afim de obter um ganho menor, alinhando-se com uma margem de segurança, em relação a faixa aceitável das entradas analógicas da placa de aquisição NI ELVIS II.

Tendo em vista a Figura 4.3, aplicou-se uma tensão de 12V RMS na entrada circuito, o que corresponde aproximadamente 16,97V em valor de pico. E na saída, com os cursores no gráfico, obteve-se o valor de 2,185 V de pico, que por sinal, aproximou-se do valor definido, reduzindo em 87% o valor da entrada.

Figura 4.3 – Relação de ganho do circuito de medição de tensão.



Fonte: do autor.

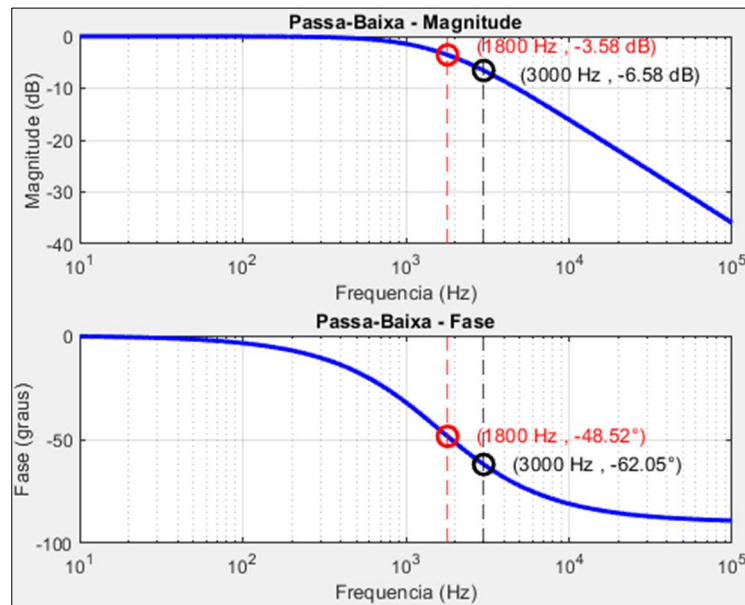
Analisando os valores medidos pelos multímetros, valida-se de modo positivo tal aspecto do circuito, sendo capaz de reduzir a amplitude do sinal de entrada, em conformidade ao esperado.

Nota-se que, a pequena diferença que é percebida nas medições dos valores de pico, dos cursores do gráfico, pode ser justificada pela resolução gráfica, arredondamento numérico, tal como a própria limitação contida no posicionamento dos cursores. De fato, tais variações são compreensíveis e irrelevantes, não comprometedoras aos resultados.

A fim de obter um sinal de saída com menor interferência à ruído, bem como evitar o fenômeno *aliasing*, antes da aquisição feita pela placa NI ELVIS II, optou-se em inserir, no circuito um filtro passa baixa, similar ao implementado no circuito de medição de corrente.

Com objetivo de analisar o comportamento do circuito com filtro aplicado, foram consideradas as frequências 1,8kHz e 3kHz, ambas acima da frequência de corte, correspondente à 1,59kHz. E com base na Figura 4.4, é visto que em 1,8kHz o sinal já se encontra na faixa onde já se iniciou a atenuação, no caso, em -3,5dB. Já em 3kHz, percebe-se que o sinal sofre atenuação considerável, uma vez que está posicionado bem fora da região de passagem.

Figura 4.4 – Análise da resposta em frequência do circuito de medição de tensão.



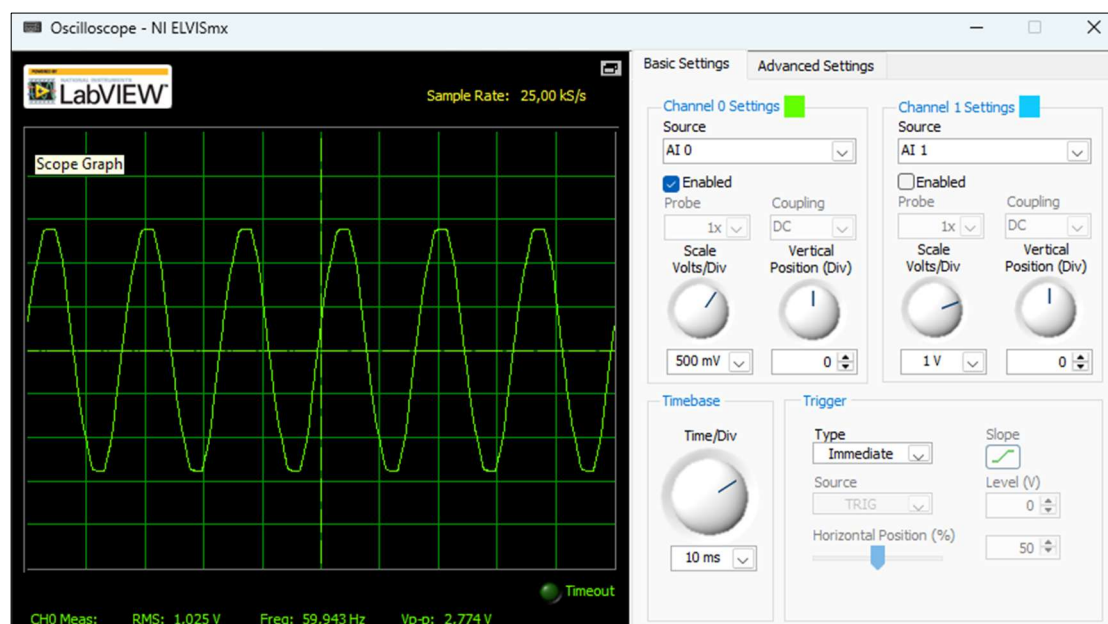
Fonte: do autor.

Portanto, conclui-se que o filtro se comporta de acordo com os critérios conceituais que regem a definição e o projeto de filtros ativos.

4.2 Avaliação da Placa de aquisição NI ELVIS II

Após os testes e a validação da PCI de condicionamento de sinais, iniciou-se o teste de comunicação e aquisição da placa NI ELVIS II. A princípio, uma vez estabelecida a comunicação com software *NI ELVISmx*, considerando o transformador abaixador 120/12V e medido o sinal do secundário pela PCI, ao conectar a saída do circuito de medição de tensão na entrada analógica ai0 da placa de aquisição, obteve-se o sinal aquisitado de modo satisfatório, como ilustra a Figura 4.5, na qual visualiza-se a forma de onda do sinal através do osciloscópio do software.

Figura 4.5 – Sinal de tensão aqusitado pela NI EIVIS II.



Fonte: do autor.

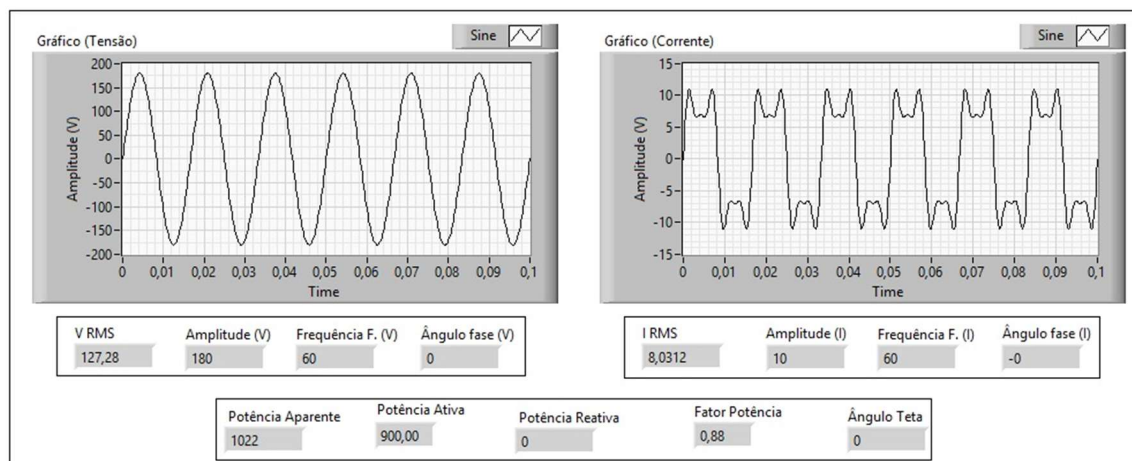
Em análise, torna-se perceptível o quanto a qualidade é favorecida, tal como a aquisição, uma vez que a taxa de amostragem se apresentou numa faixa adequada.

De modo progressivo, as etapas que constituem os testes realizados, até a presente seção, satisfatoriamente confirmam e validam os resultados esperados, na qual as medições, o condicionamento e a aquisição dos sinais são concluídos positivamente.

4.3 Testes preliminares no software LabView

Com os resultados obtidos e esclarecidos nas seções anteriores, foi possível progredir no desenvolvimento do projeto, partindo-se para o software *LabView*, onde, uma vez desenvolvido o código de programação, em função dos objetivos propostos nesse trabalho, realizou-se simulações no mesmo, permitindo verificar os cálculos desenvolvidos, assim como os ajustes necessários nos blocos de funções definidos na programação.

A Figura 4.6 apresenta os resultados encontrados após considerar-se um sinal de corrente conhecido, sendo sua função no domínio tempo $f(t) = 10 \sin(\omega t) + 5 \sin(3\omega t) + 2 \sin(5\omega t)$, adotando-se em sequência um sinal de tensão senoidal puro de 180V em valor de pico.

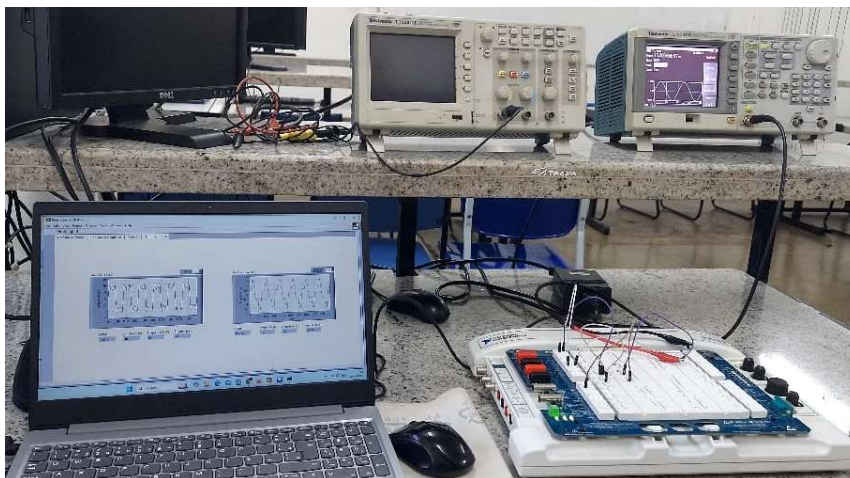
Figura 4.6 – Sinal simulado no *LabView*.

Fonte: do autor.

Portanto, em conformidade com os cálculos citados nas seções 2.5.3 e 2.5.5, obteve-se o valor de tensão e corrente eficaz de 127,3V RMS e 8,03A RMS respectivamente, assim como os valores das potências sendo $S= 1022\text{VA}$, $P= 900\text{W}$ e $FP=0,88$. Notando-se que o valor de Q nesse caso foi nulo, uma vez considerou-se nula a defasagem entre a tensão e a corrente na componente fundamental. Os resultados obtidos via código foram próximos aos calculados, observando-se de fato a coerência nos métodos adotados tal como nas funções utilizadas na programação.

Ressalta-se que, em um segundo momento, ao considerar um cenário distinto, foi estabelecido a comunicação com a placa NI EIVIS II, em seguida, realizado um experimento no qual utilizou-se um gerador de funções a fim de gerar um sinal de senoidal. Em sequência, considerando-se um segundo sinal gerado pela própria placa de aquisição via função *Analog Outputs*, adotou-se como base um circuito simples com dois resistores de $10\text{k}\Omega$, somando assim os dois sinais. Nesse caso, o objetivo maior foi em configurar corretamente o bloco de função DAQ no *LabView*, responsável em adquirir os sinais aquisitados pela placa NI ELVIS II. Após a montagem, vista na Figura 4.7, e realizados os testes, observou-se satisfatoriamente a resposta do bloco de função após a configuração realizada.

Figura 4.7 – Teste de configuração do Bloco DAQ no *LabView*.

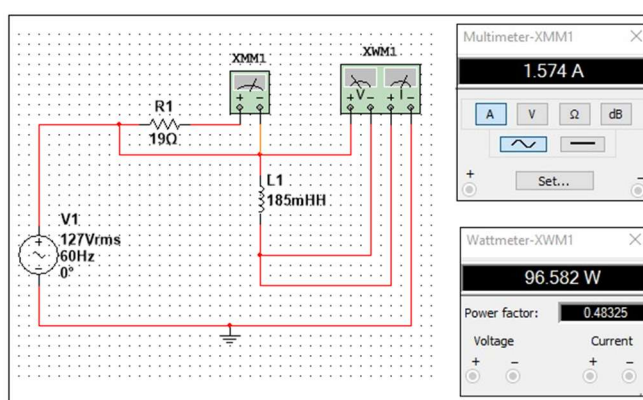


Fonte: do autor.

4.4 Avaliação preliminar do sistema de medição

Com o intuito de verificar a coerência das medições realizadas pelos instrumentos, que compõem o sistema de medição proposto, adotou-se uma carga conhecida, com base em componentes acessíveis e, comparado os parâmetros medidos com os que foram obtidos por meio de simulação, utilizando o software *Multisim*. A Figura 4.8 mostra o circuito simulado com a carga utilizada, juntamente com os valores medidos, constituída por um resistor de 19Ω e um indutor de 185 mH (de resistência interna de 20Ω) em série, e alimentada por uma tensão de 127 V RMS .

Figura 4.8 – Circuito simulado de uma carga RL.



Fonte: do autor.

A corrente total obtida foi $1,547\text{ A}$, a potência ativa com o valor de $95,582\text{ W}$ e fator de

potência de 0,483.

Na sequência, foi realizado a montagem do circuito em bancada, a fim de obter e validar os resultados experimentais apresentados pelos medidores, como mostrado na Figura. Foi utilizado um indutor de 185mH, dois reostatos ajustados em 19Ω cada, ligados em paralelos de modo reduzir a corrente que passa por eles conforme mostrado anteriormente da Figura 3.10. A Tabela 4.1 expõe os valores obtidos pelos instrumentos utilizados, sendo as medições de corrente e de tensão praticamente iguais, confirmando positivamente a qualidade de medição e precisão dos aparelhos em relação essas grandezas.

Tabela 4.1 – Carga RL: Resultados obtidos pelos instrumentos utilizados.

Parâmetros	Multímetro		Wattímetros		Analizador QE
	Fluke 179	Minipa ET-4091	Minipa ET-4080		Fluke 434
Tensão RMS (V)	127,1	127,1	127,2		127,1
Corrente RMS (A)	1,59	1,6	1,6		1,6
Potência ativa (W)	x	89,5	90		90
Potência aparente (VA)	x	195,1	196,2		200
Potência Reativa (VAR)	x	173,7	175,4		180
Fator de Potência	x	0,45	0,415		0,47

Fonte: do autor.

Em análise aos valores das potências e fator de potência obtidos, também se observa uma coerência entre os resultados, apresentando baixa variação, indicando boa concordância entre as medições realizadas. Ressaltando que, a pequena divergência existente é compreensível, uma vez que os instrumentos possuem diferentes classes de precisão, fundo de escala e métodos internos de cálculos, assim como fator de tolerância e a condição real de calibração de cada um.

Em relação os resultados obtidos em simulação, compreende-se que por se tratar de um circuito ideal, o mesmo apresenta valores um pouco diferentes, uma vez que é isento de perdas elétricas.

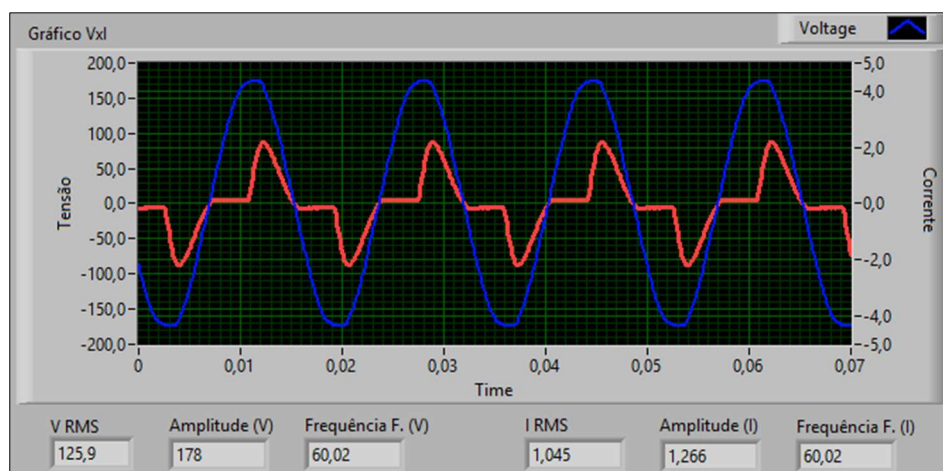
4.5 Medidor de qualidade de energia desenvolvido

Nessa seção são abordados os resultados obtidos no experimento realizado utilizando

como carga um ventilador, com controle de velocidade por TRIAC, no qual é feito a análise do comportamento dessa carga junto a implementação do analisador de qualidade de energia desenvolvido neste trabalho. As medições foram realizadas a partir da disposição dos instrumentos em bancada, como visto na Figura 3.11 no capítulo anterior, semelhantemente ao teste realizado na seção 4.4. Desse modo, expõe-se a comparação entre o analisador proposto, um analisador comercial de referência (FLUKE 434) e medidores independentes (multímetros e wattímetros), considerando os parâmetros importantes para análise de qualidade de energia, como mencionados nas seções anteriores.

A Figura 4.9 apresenta a forma de onda do sinal da tensão (em azul) e a corrente (em vermelho) da rede elétrica, ou seja, a tensão de entrada e a corrente drenada pelo sistema (controlador de velocidade mais o ventilador), junto ao valor RMS, valor de pico da fundamental tal como a frequência da fundamental. Sinal esse capturado por meio do programa desenvolvido no software *LabView*.

Figura 4.9 – Forma de onda de tensão de entrada e corrente do ventilador.

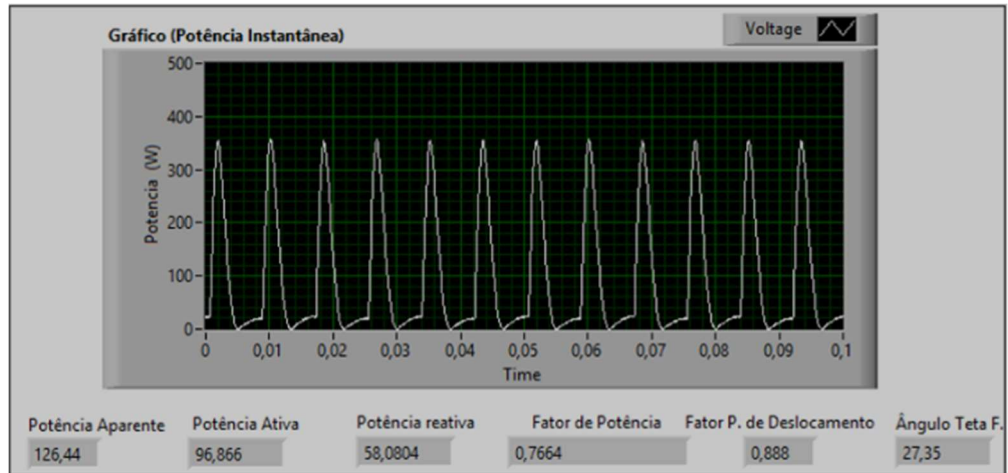


Fonte: do autor.

É possível perceber a qualidade da aquisição do sinal, sem ruídos perceptíveis, tal como a distorção do sinal de corrente, proveniente do comportamento típico do dispositivo TRIAC para controle de velocidade, que permite o controle da tensão aplicada à carga por meio do ajuste do ângulo de disparo desse sinal aplicado, resultando em uma corrente distorcida.

De forma simultânea, foram obtidos os valores das potências e fator de potência do sistema avaliado, na qual também foi gerado um gráfico respectivo a potência instantânea referida, conforme mostra a Figura 4.10.

Figura 4.10 – Gráfico da potência instantânea e valores obtidos.

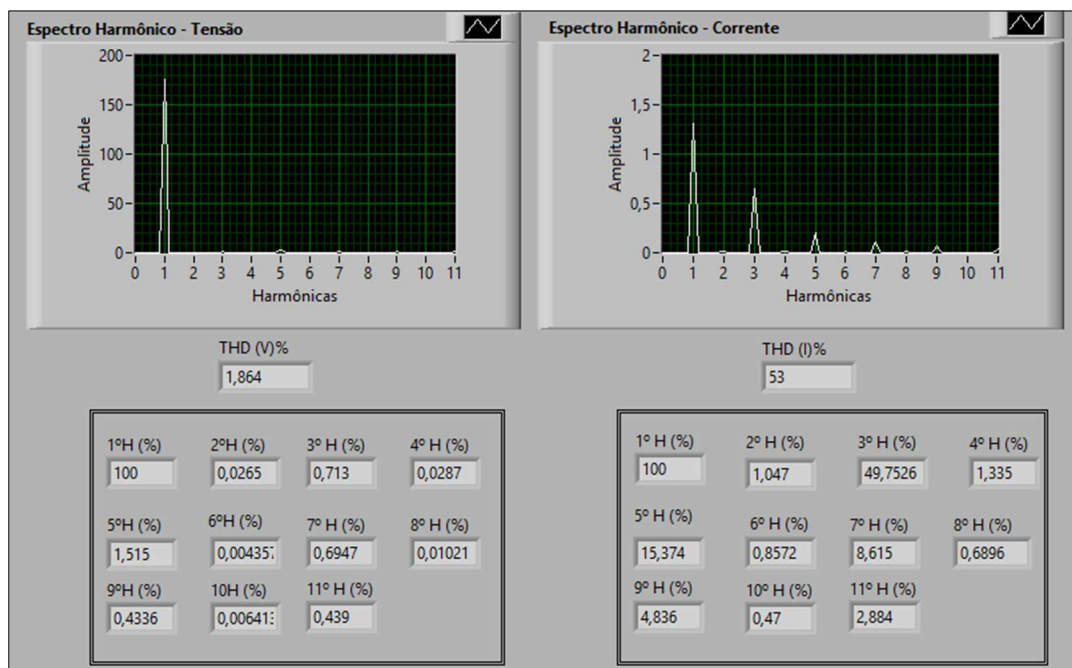


Fonte: do autor.

Os resultados obtidos apresentaram coerência entre as grandezas, no caso, potência ativa, aparente e reativa, assim como fator de deslocamento e fator de potência, em relação a carga utilizada.

Em sequência foram analisados os resultados referentes às harmônicas contidas no sinal, através da decomposição de cada uma, junto a taxa de distorção harmônica total. Observa-se na Figura 4.11 o espectro em frequência do sinal de corrente e tensão tal como a THD e as componentes harmônicas.

Figura 4.11 – Espectro em frequência dos sinais de tensão e corrente.



Fonte: do autor.

Percebe-se que a primeira harmônica representa a fundamental em 60Hz e as demais são frequências múltiplas da mesma. Observa-se a diferença do conteúdo harmônico do sinal de corrente em relação ao apresentado no sinal de tensão, predominando as harmônicas ímpares no espectro, enquanto os harmônicos pares apresentam amplitudes praticamente desprezíveis; comportamento de sistemas com simetria de forma de onda e, também, característico de uma carga não linear.

Para fins de validação dos resultados obtidos pelo sistema desenvolvido, foram capturadas as medições dos instrumentos utilizados no projeto, considerando-se o analisador de qualidade de energia FLUKE 434 como referência. A Figura 4.12 apresenta os resultados referente a tensão, corrente, potências, fator de potência e fator de deslocamento obtidos pelo analisador FLUKE 434.

Figura 4.12 – I: Medições dos parâmetros com o analisador FLUKE 434.



Fonte: do autor.

E possível perceber na Figura 4.12 a coerência dos valores eficaz de tensão e corrente, dos valores das potências e fator de potência em relação a característica da carga, assim como às medições obtidas via cálculos, realizados no software *LabView*.

Em complemento a comparação com o analisador FLUKE, foram registrados os valores

do mesmo em relação aos harmônicos e THD em relação a fundamental, conforme a Figura 4.13.

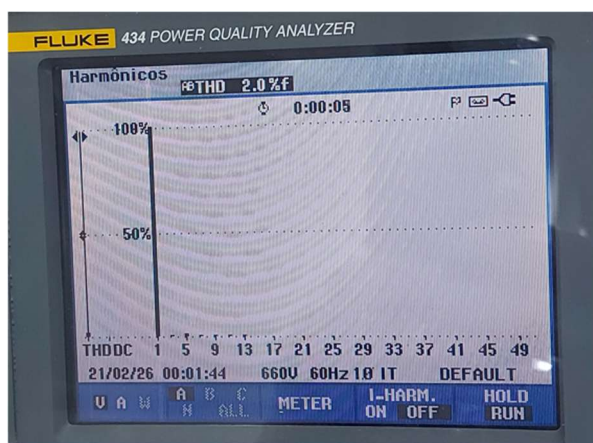
Figura 4.13 – II: Medições dos parâmetros com o analisador FLUKE 434.



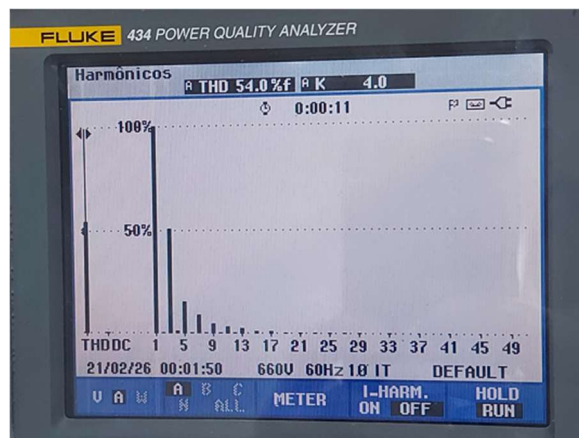
a)



b)



c)



d)

Fonte: do autor.

Como exposto na Figura 4.13, primeiramente em a) observa-se o valor da THD total da tensão de entrada em relação a fundamental, em seguida as componentes harmônicas como

porcentagem da fundamental. Semelhantemente é apresentado em b), onde tem-se a THD total da corrente e as respectivas harmônicas. Já em c) e d) são expostos os espectros harmônicos da tensão e corrente respectivamente. Percebe-se a concordância dos valores encontrados no analisador de referência em relação ao projeto.

Para melhor análise qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos, através das medições realizadas pelos medidores em bancada, bem como pelo projeto desenvolvido, foi elaborada a Tabela 4.2 detalhando cada medição aos respectivos instrumentos e respectivos erros relativos percentuais em relação aos valores de referência do FLUKE 434.

Tabela 4.2 – Protótipo: Resultados obtidos pelos instrumentos utilizados.

Análise dos parâmetros medidos do Ventilador									
Parâmetros	Multímetro		Wattímetros				Analisador QEE		
	FLUKE 179	Erro (%)	MINIPA ET-4091	Erro (%)	MINIPA ET-4080	Erro (%)	FLUKE 434	Projeto	Erro (%)
Tensão RMS (V)	126,1	0,238	125,7	0,0795	126,2	0,318	125,8	125,9	0,0795
Corrente RMS (A)	1,07	2,73	1,02	7,27	1,2	9,09	1,1	1,045	5
Potência ativa (W)	x	x	99,9	0,1	130	30	100	96,86	3,14
Potência aparente (VA)	x	x	134,6	12,17	150	25	120	126,44	5,37
Potência Reativa (VAR)	x	x	90	50	70	16,67	60	58,08	3,2
Fator de Potência	x	x	0,74	2,63	0,87	14,47	0,76	0,766	0,79
Fator de Deslocamento	x	x	x	x	x	x	0,86	0,888	3,26

Fonte: do autor.

Analisando os resultados referentes às medições das potências e fator de potência, listados na Tabela 4.2, percebe-se que o analisador desenvolvido apresentou resultados satisfatórios em relação aos valores referência do FLUKE 434, com erros relativos compreensíveis ao contexto do desenvolvimento realizado. Quanto aos demais aparelhos, em certos parâmetros apresentaram valores próximos, e em outros já com uma certa divergência. Sendo que, mediante as considerações empregadas a esse tipo de experimento, deve-se considerar que o erro apresentado, em parte, remete ao cenário em que são aparelhos de modelos diferentes, com características e métodos de cálculos particulares, como consideradas na seção anterior.

Considerando as taxas de distorção harmônica total de tensão e corrente, foi elaborada a Tabela 4.3, em que apresenta os valores obtidos pelo medidor desenvolvido, o analisador de referência e pelo wattímetro MINIPA ET 4080. Também são apresentados os erros relativos em relação ao analisador de referência FLUKE 434.

Tabela 4.3 – Análise da THD de tensão e corrente.

THD de tensão e corrente					
THD (%)	MINIPA ET 4080	Erro (%)	FLUKE 434	Projeto	Erro (%)
Tensão	2,2	10	2,0	1,86	7
Corrente	55,3	2,41	54,0	53,0	1,85

Fonte: do autor.

Conforme observado na Tabela 4.3, o protótipo desenvolvido apresentou erros relativos inferiores ao do MINIPA ET 4080, quando ambos avaliados em relação ao analisador de referência. Tal resultado evidencia a boa exatidão do protótipo na medição de THD de tensão e corrente, o que demonstra sua capacidade de fornecer resultados compatíveis com os valores de referência.

Além da análise da THD, realizou-se avaliação das componentes harmônicas individuais de tensão. A Tabela 4.4 apresenta as amplitudes das primeiras harmônicas ímpares obtidas pelo wattímetro MINIPA ET 4080, pelo analisador de referência e pelo protótipo.

Tabela 4.4 – Análise das harmônicas de tensão.

Harmônicas de tensão			
Harmônica (%)	MINIPA ET 4080	FLUKE 434	Projeto
3 ^a	0,6	0,6	0,71
5 ^a	1,7	1,5	1,5
7 ^a	0,7	0,7	0,69
9 ^a	0,4	0,5	0,43
11 ^a	0,5	0,5	0,44

Fonte: do autor.

Observa-se que tanto o protótipo quanto o wattímetro MINIPA apresentaram comportamento semelhante ao analisador de referência na identificação das componentes harmônicas de tensão ao longo das ordens analisadas. De modo geral, os valores obtidos pelo medidor desenvolvido acompanharam os resultados alcançados pelo analisador FLUKE 434, o que evidencia a capacidade de medir e representar adequadamente o conteúdo harmônico do

sinal.

Na sequência, em complemento à análise harmônica realizada, apresenta-se a Tabela 4.5 com as componentes harmônicas do sinal de corrente.

Tabela 4.5 – Análise das harmônicas de corrente.

Harmônicas de corrente			
Harmônica (%)	MINIPA ET 4080	FLUKE 434	Projeto
3 ^a	51,6	50,4	49,75
5 ^a	16,1	15,5	15,37
7 ^a	9,0	9,0	8,61
9 ^a	5,2	5,1	4,83
11 ^a	3,3	3,3	2,88

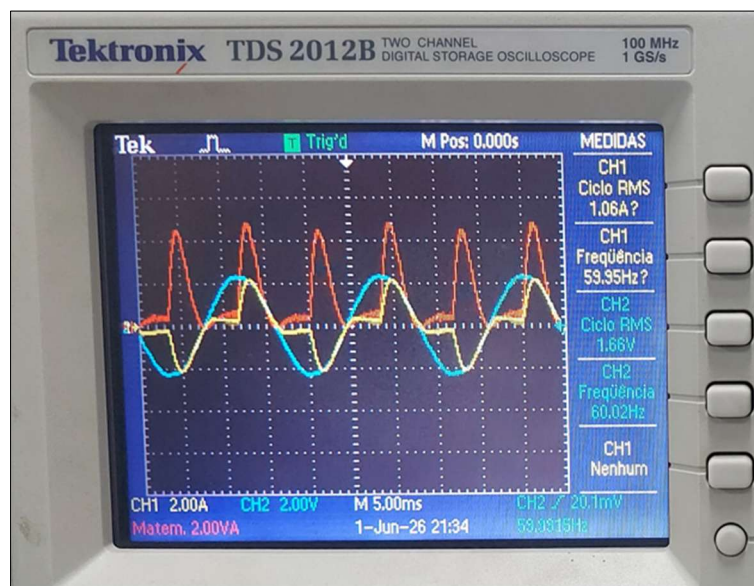
Fonte: do autor.

De forma similar ao observado na análise das componentes de tensão, percebe-se a proximidade dos valores obtidos pelo projeto em relação ao medidor de referência, assim como ao wattímetro.

Portanto, conclui-se que o analisador de qualidade de energia desenvolvido apresentou uma resposta positiva em função dos parâmetros que caracterizam detalhadamente o ventilador com controlador de velocidade por TRIAC, como uma carga não linear. Explicitando também a proximidade dos resultados encontrados em comparação ao analisador de qualidade de energia de referência e ao wattímetro MINIPA ET 4080.

Após a comparação dos parâmetros medidos, realizou-se uma análise qualitativa das formas de onda adquiridas pelo sistema desenvolvido, quanto às formas observados no osciloscópio, com objetivo de verificar a fidelidade da reprodução dos sinais aquisitados. A Figura 4.14 apresenta a tela do osciloscópio com as formas de onda dos sinais de tensão e corrente fornecidos na saída PCI de condicionamento e, também, a potência instantânea.

Figura 4.14 – Formas de onda obtidas pelo osciloscópio.

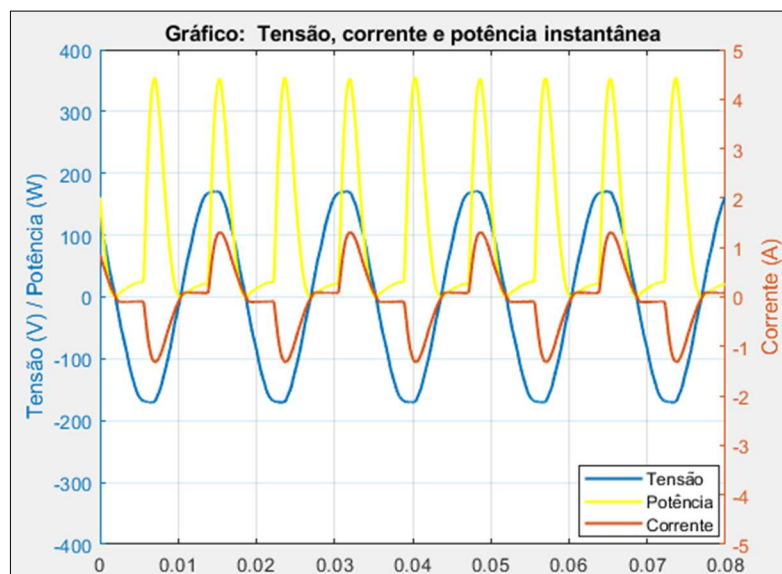


Fonte: do autor.

Ao observar a Figura 4.14 percebe-se que o sinal de corrente (amarelo) da carga se comporta de forma similar ao mostrado na Figura 4.9, obtidos no *LabView*. O sinal de tensão é representado na cor azul e a potência instantânea na cor vermelha. Nota-se também, que o valor eficaz da corrente (1,06A) corresponde praticamente o mesmo, em relação ao valor medido nos instrumentos bem como pelo medidor desenvolvido. O sinal de tensão lido pelo osciloscópio apresenta valor eficaz de acordo com o projetado, uma vez que há minimamente o fator de tolerância dos componentes contidos na PCI.

Os dados obtidos no software *LabView* foram exportados e reprocessados no software *Matlab* a fim de validar os dados aquisitados, assim com uma análise das formas de onda das grandezas elétricas envolvidas, conforme mostra a Figura 4.15.

Figura 4.15 – Formas de onda obtidas pelo software *Matlab*.



Fonte: do autor.

Observa-se que ambas as formas de onda estão visualmente alinhadas em relação ao tempo, porém é notório o quanto o sinal da corrente é distorcido em relação ao sinal senoidal da tensão. Teoricamente, mesmo que haja um deslocamento entre o sinal de corrente e tensão, predominam-se as distorções existentes provocadas pelo chaveamento do TRIAC.

Contudo, evidencia-se que o analisador de qualidade de energia desenvolvido e testado, aplicado às medições de uma carga não linear, apresentou resultados que atenderam aos requisitos de desempenho. Tendo em vista que tais medições foram coerentes em relação à margem de erro apresentada.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as conclusões alcançadas, considerações finais e propostas de trabalhos futuros em relação ao trabalho desenvolvido.

5.1 Conclusões

O presente trabalho abordou, inicialmente, um estudo sobre a qualidade de energia elétrica e sua importância nos sistemas elétricos. Foram tratados os principais conceitos relacionados às grandezas elétricas, às distorções harmônicas e ao fator de potência, enfatizando os impactos que podem causar aos sistemas elétricos.

Com base no contexto apresentado, foi proposto e desenvolvido um medidor de qualidade de energia elétrica monofásico capaz de realizar a medição, aquisição e processamento das grandezas elétricas, possibilitando avaliar os parâmetros associados à qualidade de energia elétrica. Para isso, foram projetados circuitos de condicionamento de sinais de tensão e corrente, os quais são necessários para adequação do sinal à aquisição realizada pela placa NI ELVIS II. Além disso, foram aplicados procedimentos e cálculos via software *LabView*, o que permitiu determinar as principais grandezas de análise da qualidade de energia elétrica e, assim, avaliá-las realizando o monitoramento em tempo real.

A validação do medidor desenvolvido foi realizada e conduzida por etapas, por meio dos testes individuais dos circuitos projetados, análise das formas de onda dos sinais medidos, verificação das grandezas calculadas e comparação dos resultados obtidos pelos instrumentos de medição definidos em projeto, bem como o instrumento de referência adotado, no caso o analisador FLUKE 434. Dessa maneira, foi possível verificar o funcionamento e desempenho do medidor projetado de forma progressiva e validar sua capacidade de representar adequadamente os parâmetros elétricos analisados.

Os ensaios realizados permitiram a obtenção dos principais parâmetros elétricos voltados à qualidade de energia, incluindo valores eficazes, potências, fator de potência e a presença das distorções harmônicas contidas nos sinais medidos.

Portanto, o medidor de qualidade energia desenvolvido neste trabalho cumpriu satisfatoriamente e com grande qualidade o fim para que foi projetado. Diante dos resultados coerentes obtidos, pode-se concluir que os objetivos propostos foram alcançados, confirmando a adequação da metodologia adotada e sua contribuição para estudo e compreensão das grandezas elétricas associadas à qualidade de energia elétrica.

5.2 Trabalhos Futuros

Para a realização de trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de uma segunda versão da PCI, adotando melhorias no layout e inserindo um plano de terra dedicado, afim de garantir a redução de possíveis interferências eletromagnéticas. Adicionalmente, sugere-se a integração de uma fonte de alimentação CC simétrica diretamente na placa, eliminando a necessidade de uma fonte externa e contribuindo para maior compactação e autonomia do sistema.

Como segunda proposta, sugere-se a realização de ensaios experimentais para levantamento dos parâmetros elétricos do transformador utilizado, tais como resistências dos enrolamentos e indutâncias de magnetização e dispersão, permitindo a utilização de um modelo equivalente mais representativo em simulações futuras.

De forma complementar, como terceira proposta, recomenda-se a ampliação dos ensaios para outros tipos de carga, de modo avaliar o comportamento do sistema em outras condições de operação.

Por fim, sugere-se aprimoramento do sistema em relação a identificação e processamento de componentes harmônicas de ordens mais elevadas, ampliando a capacidade de análise dos sinais elétricos.

|REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentals of Electric Circuits**. 6. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2017.
- ANDRADE, M. M. X. **Desenvolvimento de uma plataforma para medição de consumo de energia elétrica com monitoramento via sistema web**. Universidade Federal do Ceará (UFC). Sobral. 2023.
- ANEEL. **PRODIST – Módulo 8: Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. 2021.
- ARENAS, L. A. D. O. **Medidor inteligente de energia elétrica embarcado em FPGA**. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha solteira, p. 143. 2019.
- ARRANZ-GIMON, A. et al. A Review of Total Harmonic Distortion Factors for the Measurement of Harmonic and Interharmonic Pollution in Modern Power Systems. **Energies**, 14, Outubro 2021.
- BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. **Protective Relaying: Principles and Applications**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press (Taylor & Francis Group), 2014.
- CAMPOS, M. D. O.; LOUZADA, D. O.; SOUZA, W. A. D. Desenvolvimento de um analisador de qualidade de energia elétrica com sistema de monitoramento remoto. **Brazilian Journal of Development**, 9, n. 2, 2023. 8112-8126.
- COELHO, A. P. **Projeto de um sistema para medição de consumo e análise da qualidade da energia elétrica para sistemas monofásicos**. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). João Molevade. 2020.
- DUGAN, R. C. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- FLUKE CORPORATION. Fluke 179 True-RMS Digital Multimeter, Everett, 2019. Disponível em: <<https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/multimetros-digitais/fluke-179>>. Acesso em: 27 maio 2026.
- FLUKE CORPORATION. Fluke 434/435 Power Quality and Energy Analyzers – technical specifications, Everett. Disponível em: <<https://www.fluke.com/en-us/product/electrical-testing/power-quality/434-435>>. Acesso em: 28 maio 2026.
- FONDATO, L. G. D. G.; FIGUEIRA, R. G.; FLORIAN, F. Estudo de qualidade de energia em sistemas elétricos. **Recima 21 - Revista Científica Multidisciplinar**, VI, n. 11, 01 Novembro 2025.
- FRADEN, J. **Handbook of Modern Sensors**. 5. ed. New York: Springer, 2016.
- IEEE. **IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions**. IEEE Standards

Association. New York. 2010. (IEEE Std 1459-2010).

IEEE. **IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**. IEEE Standards Association. New York. 2014. (IEEE Std 519-2014).

IEEE. **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). New York. 2019. (IEEE Std 1159-2019).

KAUR, J.; BATH, S. Harmonic distortion in power systems due to electronic control and renewable energy integration: a comprehensive review. **Discover Electronics**, 2025.

KHAN, A.; WYRWA, A. A Survey of Quantitative Techniques in Electricity Consumption-A Global Perspective. **Energies**, 17, 2024.

KIRK, F. R.; WEEDON, T.; KIRK, P. **Instrumentation and Process Control**. 7. ed. Oxford: [s.n.], 2019.

KUMAR, L. et al. Design, power quality analysis, and implementation of IoT-based smart energy meter. **Computers & Electrical Engineering**, 93, 2021.

LEÃO, R. P. S.; SAMPAIO, R. F.; ANTUNES, F. L. M. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2014.

LEM. Current Transducer LA 55-P, Meyrin, 2023. Disponível em: <https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la_55-p_v19.pdf>. Acesso em: 02 maio 2026.

MALLALA, B.; TAJUDDIN, M. F. N.; THANIKANTI, S. B. Design of Power Quality Analyzer Using a Field Programmable Gate Array. **Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering**, 2024. 1-14.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MARCELINO, J.; COSTA, T.; MORAIS, R. Protótipo de um medidor de energia elétrica inteligente: Aplicado a unidades consumidoras residenciais. **Anais do V SINGEP**, São Paulo, 2016. 1-13.

MINIPA DO BRASIL. Alicat Wattímetro Digital ET-4080: manual de instruções/especificações técnicas, São Paulo, 2016. Disponível em: <<https://www.minipa.com.br/images/Manual/ET-4080-1100-BR.pdf>>. Acesso em: 27 maio 2026.

MINIPA DO BRASIL. Alicat wattímetro ET-4091 – proposta técnica, São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.minipa.com.br/images/proposta_tecnica/ET-4091-1303-BR.pdf>. Acesso em: 28 maio 2026.

MOHAN, N.; UNDELAN, T.; ROBBINS, W. **Power Electronics: Converters, Applications and Design**. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2012.

MORRIS, A.; LANGARI, R. **Measurement and Instrumentation: Theory and Application**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015.

NATIONAL INSTRUMENTS. **NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite II Series (NI ELVIS II Series) User Manual**. National Instruments. Austin. 2011.

NATIONAL INSTRUMENTS. LabVIEW. **National Instruments**. Disponível em: <https://www.ni.com/en/shop/labview?srsId=AfmBOopVnKdWJefflIw3u-W6f5zu_J67aaRvhUIHRK7xe8R73AEm-Sxg>. Acesso em: 15 maio 2026.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-time signal processing**. 3. ed. Boston: Pearson, 2010.

PEREIRA, M. J. C. D. P. **Analizador de energia utilizando o chip ATM90E36 e módulo ESP8266 com arquitetura Restful**. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Manaus. 2022.

PROTECTIVE Relaying: Principles and Applications. 4. ed. [S.l.]: [s.n.], 2014.

ROCHA, J. E. **Qualidade de energia elétrica**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, p. 37. 2016.

RODRIGUES, N. M.; JANEIRO, F. M.; RAMOS, P. M. **Low-Cost Embedded Measurement System for Power Quality Frequency Monitoring**. IEEE 14th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2020). Setúbal: IEEE. 2020.

SAWHNEY, A. **A course in electrical and electronic measurements and instrumentation**. 18. ed. New Delhi: Dhanpat Rai & Co., 2010.

SEDRA, A.; SMITH, K. **Microelectronic Circuits**. 7. ed. Oxford: Oxford University Press, 2015.

SEPASI, S.; TALICHET, C.; PRAMANIK, A. Power Quality in Microgrids: A Critical review of Fundamentals, Standards, and Case Studies. **IEEE Access**, 11, 2023.

SOUSA, E. et al. Development a Low-Cost Wireless Smart Meter with Power Quality Measurement for Smart Grid Applications. **Sensors**, 23, Agosto 2023.

VICIANA, E. et al. All-in-one three-phase smart meter and power quality analyzer with extended IoT capabilities. **Measurement**, 206, 2023.

VIEIRA, R. B. **Analizador de Qualidade de Energia Elétrica**. Universidade de Brasília (UnB), Faculdade UnB Gama. Brasília. 2020.

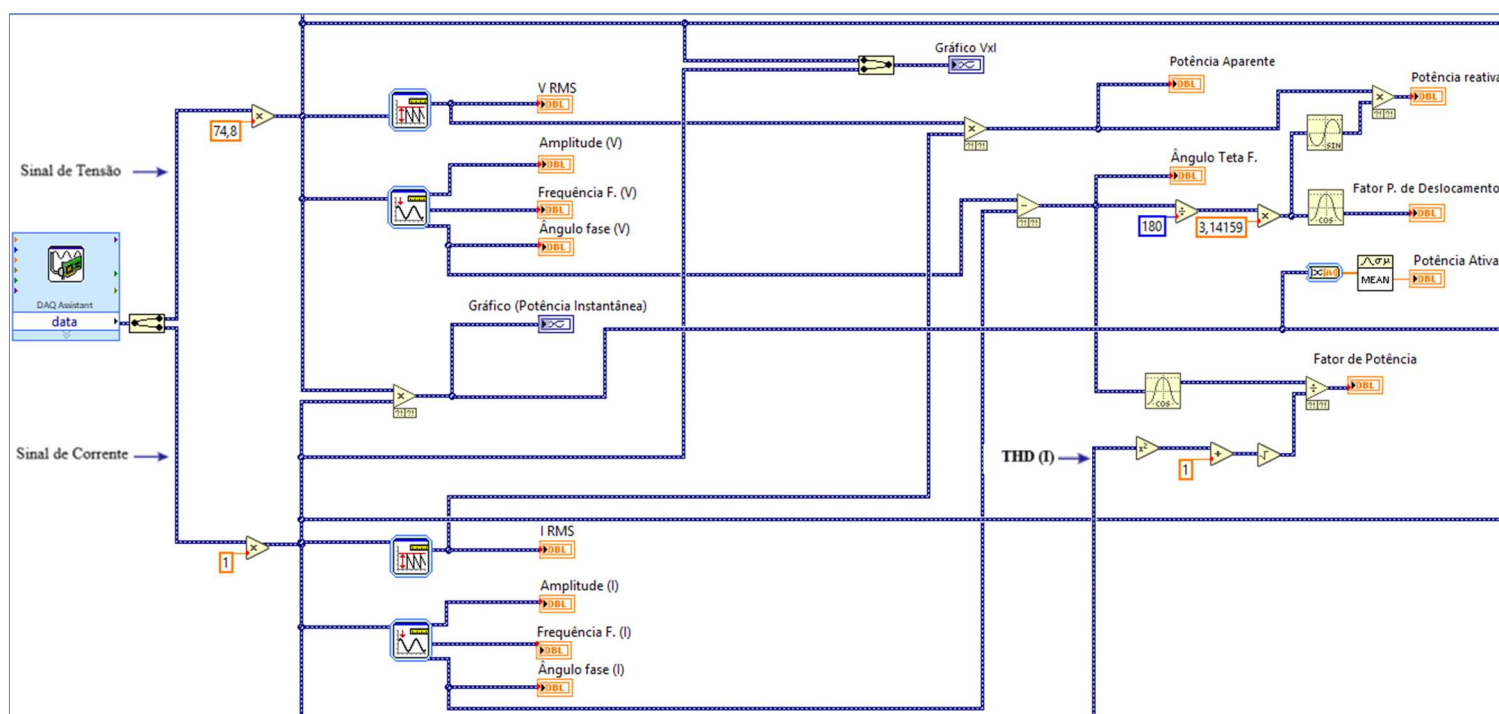
ZAINAL, N. et al. **Development of Power Quality Analysis using LabVIEW**. IEEE International Conference on Power and Energy (PECon). Langkawi: IEEE. 2022. p. 192-196.

APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO GRÁFICA DESENVOLVIDA NO LABVIEW

Neste apêndice são apresentados os trechos do diagrama de blocos do programa desenvolvido no *LabView*, organizados de com as etapas de processamento implementadas.

A Figura A.1 apresenta a etapa responsável pela aquisição dos sinais de tensão e corrente, com a obtenção dos seus respectivos valores eficazes, amplitude, frequência e ângulo de fase. Também são expostas as montagens do gráfico (Tensão x Corrente) e do gráfico da potência instantânea. Logo após são realizados os cálculos das potências (ativa, aparente e reativa), fator de potência e fator de deslocamento.

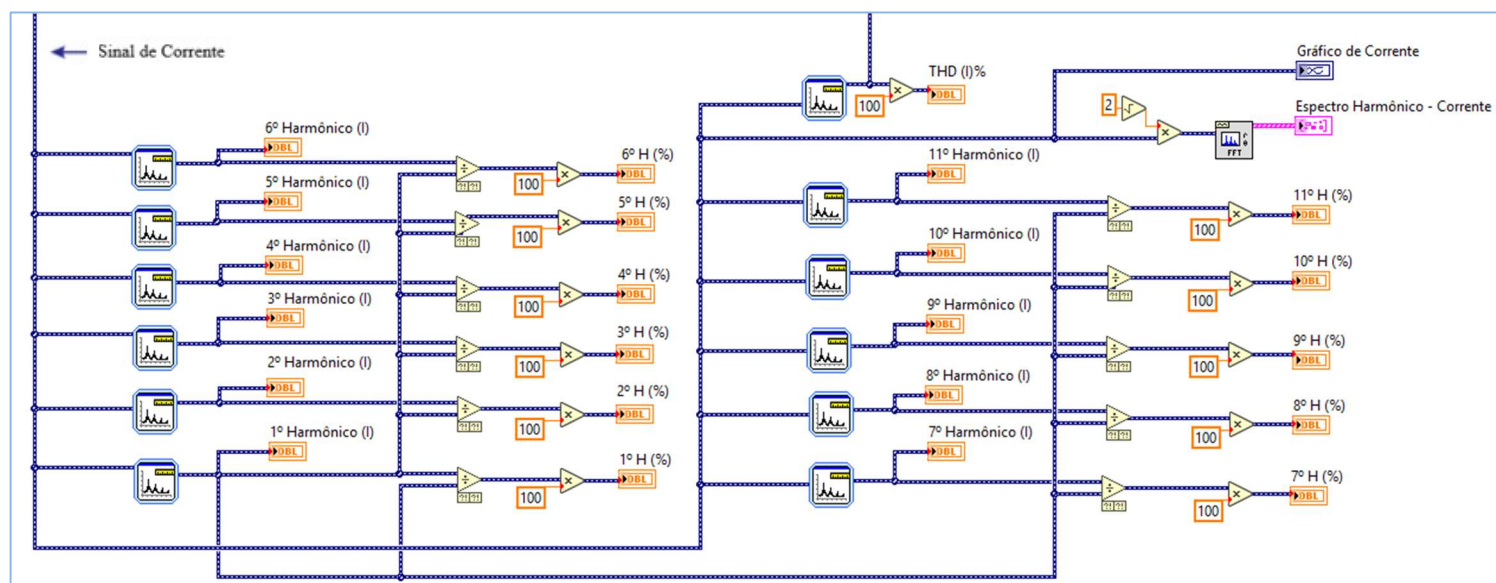
Figura A.1 – Diagrama de blocos (Parte I).



Fonte: do autor.

A Parte II do diagrama e blocos, apresentada na Figura A.2, contém o conjunto de blocos responsáveis pelo cálculo das componentes harmônicas do sinal de corrente em relação à componente fundamental. Também são apresentados o cálculo da THD da corrente em relação a fundamental, a montagem dos blocos responsáveis pela geração dos gráficos da corrente e do espectro harmônico do sinal de corrente.

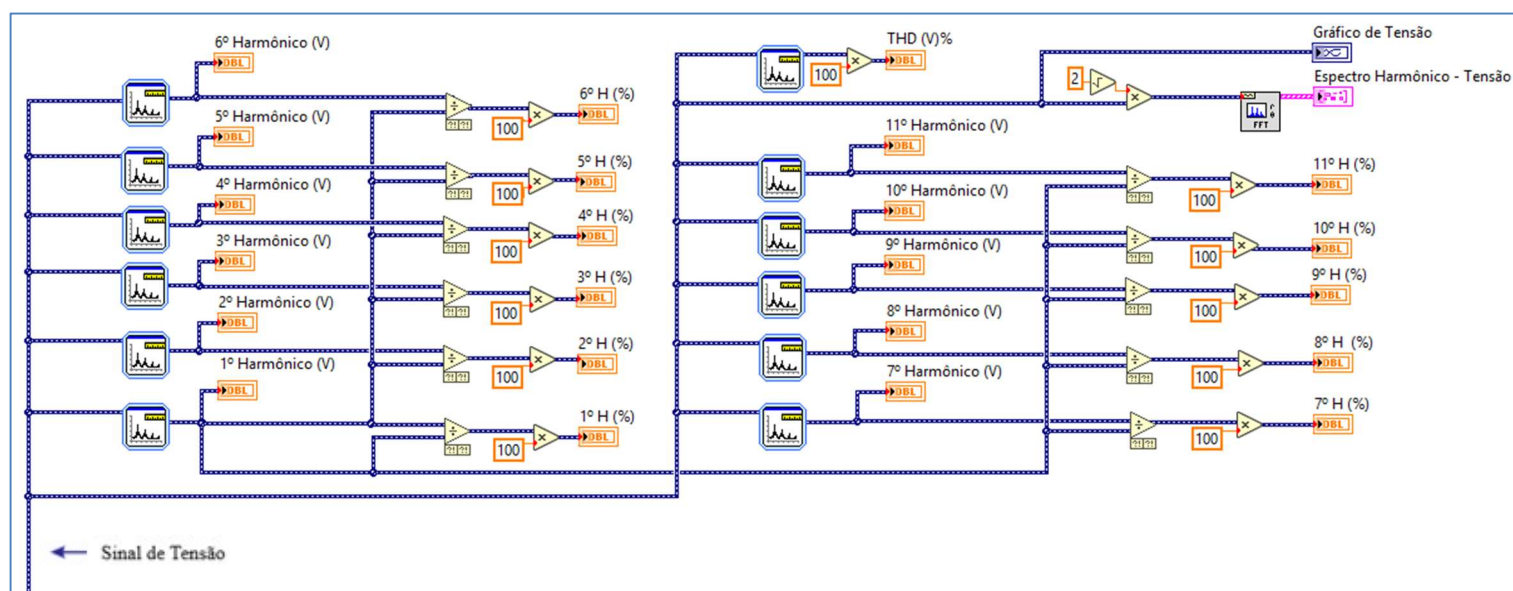
Figura A.2 – Diagrama de blocos (Parte II).



Fonte: do autor.

A Parte III do diagrama de blocos apresenta a mesma estrutura da Parte II, sendo aplicado ao sinal de tensão, incluindo o cálculo da THD e a geração dos gráficos da forma de onda e o respectivo espectro harmônico do sinal de tensão.

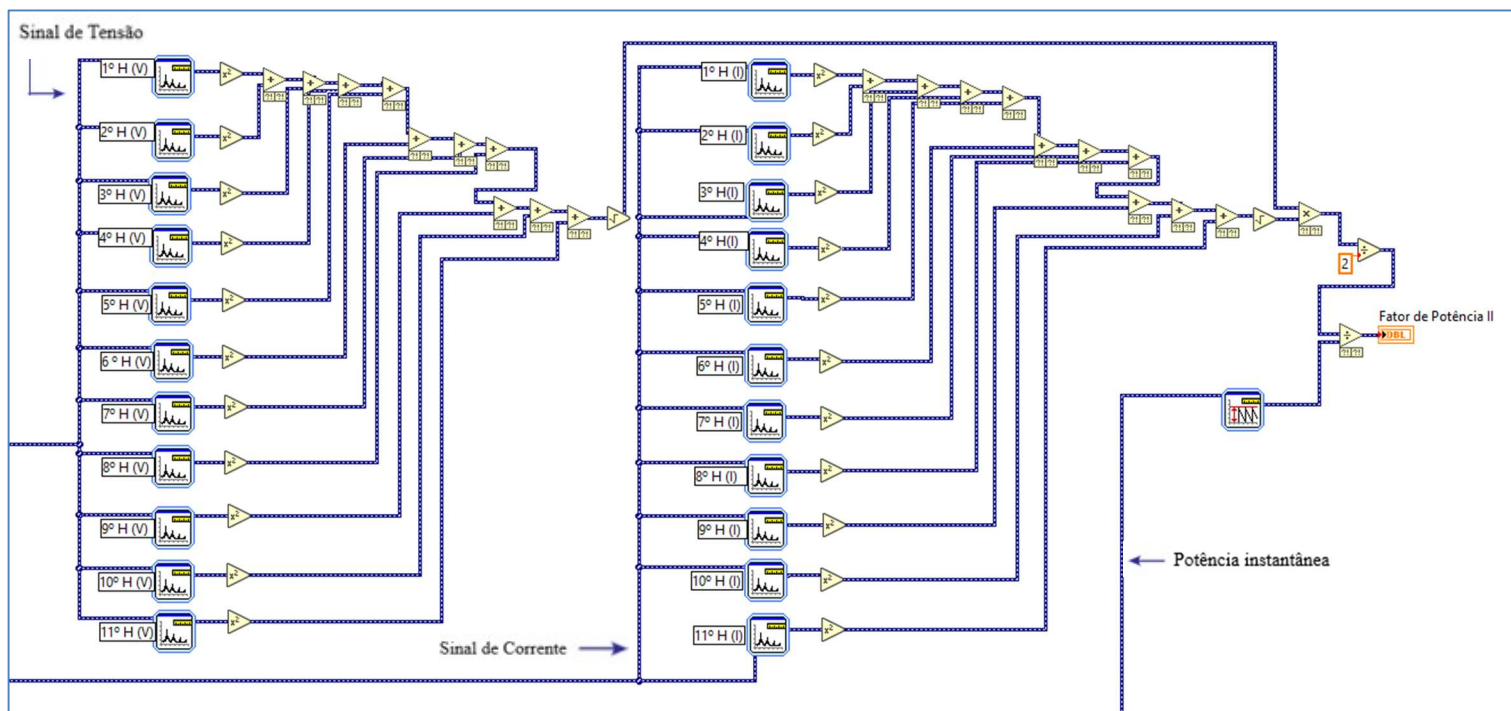
Figura A.3 – Diagrama de blocos (Parte III).



Fonte: do autor.

A Parte IV, ilustrada pela Figura A.4, apresenta o cálculo do fator de potência pelo método utilizado pelo analisador de referência FLUKE 434, sendo posteriormente comparado com a formulação teórica apresentada da Parte I.

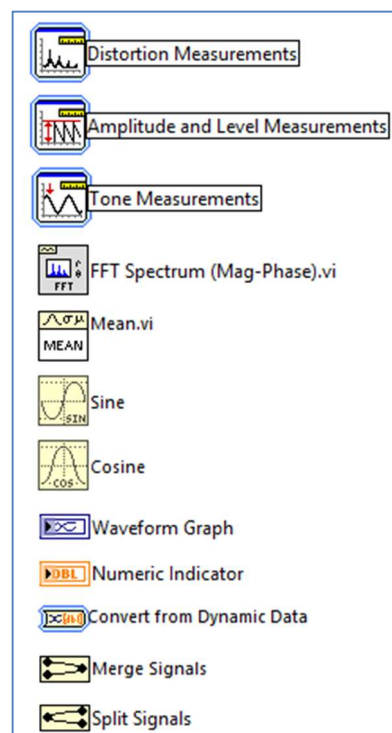
Figura A.4 – Diagrama de blocos (Parte VI).



Fonte: do autor.

A Figura A.5 apresenta os blocos utilizados no desenvolvimento do programa, identificados por seus respectivos nomes.

Figura A.5 – Blocos utilizados na implementação do programa.



Fonte: do autor.

