



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

LENILSON ANDRADE BARBOSA

CONCEPÇÃO DE UM PROTÓTIPO PARA ESTIMAR
PARÂMETROS RELACIONADOS À POTÊNCIA E À
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Campina Grande, Paraíba.
Março de 2019

LENILSON ANDRADE BARBOSA

CONCEPÇÃO DE UM PROTÓTIPO PARA ESTIMAR
PARÂMETROS RELACIONADOS À POTÊNCIA E À
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

*Dissertação apresentada à Coordenação do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Elétrica.*

Área de concentração: Processamento de Energia.

Orientadores:

Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc.
Prof. George Rossany Soares de Lira, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba.
Março de 2019

B238c

Barbosa, Lenilson Andrade.

Concepção de um protótipo para estimar parâmetros relacionados à potência e à qualidade da energia elétrica / Lenilson Andrade Barbosa. – Campina Grande, 2019.

80 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa, Prof. Dr. George R. S. Lira".

Referências.

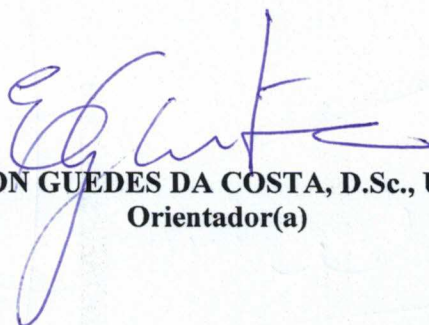
1. Qualidade da Energia Elétrica. 2. Interface Remota. 3. Cargas Lineares e não Lineares. 4. Protótipo. 5. Processamento de Energia Elétrica. I. Costa, Edson Guedes da. II. Lira, George R. S. III. Título.

CDU 621.316(043)

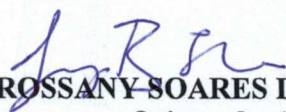
**"CONCEPÇÃO DE UM PROTÓTIPO PARA ESTIMAR PARÂMETROS RELACIONADOS
À POTÊNCIA E À QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA"**

LENILSON ANDRADE BARBOSA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 25/03/2019



EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



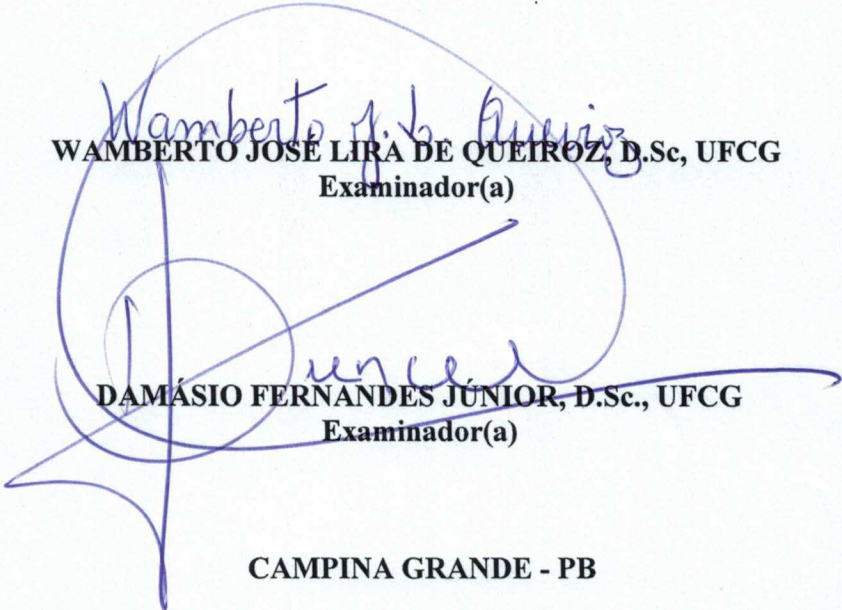
GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Examinador(a)



WAMBERTO JOSÉ LIRA DE QUEIROZ, D.Sc, UFCG
Examinador(a)



DAMÁSIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, pela proteção e cuidado até então, e por me proporcionar mais esta oportunidade de qualificação.

Agradeço à minha mãe, Leni, entre outras coisas, pelo incentivo nos momentos de desmotivação.

Agradeço à minha esposa, Luciene e ao meu filho Ângelo, por todo amor e pela paciência quando de minha ausência em alguns momentos.

Agradeço a toda a minha família e amigos por todo o apoio, carinho e confiança para que mais essa etapa fosse conquistada em minha vida.

Agradeço ao professor Edson Guedes e ao professor George Rossany pela orientação, incentivo e amizade.

Agradeço a João Victor e a Victor Hugo, por toda a contribuição para o desenvolvimento deste trabalho. Apesar das dificuldades de horários, não mediram esforços para ajudar.

Agradeço aos técnicos do LAT por todo o suporte. Em especial a Higor, por toda a assistência na manutenção dos equipamentos e na montagem dos ensaios.

Agradeço a todos os meus colegas do LAT pelo companheirismo e pelas inúmeras contribuições para a realização deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos que participaram, de forma direta ou indireta, no desenvolvimento deste trabalho.

*“Comece fazendo o que é
necessário, depois o que é
possível, e de repente você
estará fazendo o impossível.”*

São Francisco de Assis

RESUMO

Apresenta-se a concepção de um protótipo para estimar parâmetros relacionados à potência e à qualidade da energia elétrica, capaz de fornecer dados do consumo, valores eficazes, valores máximos e mínimos, harmônicas individuais até a 50^a, distorção harmônica total, desbalanceamento de tensão, frequência e potências. Foram utilizados um circuito integrado medidor de energia trifásico 90E36A como interface de aquisição dos sinais elétricos e um computador de placa única *Beaglebone Black* para cálculo dos parâmetros e implementação da interface remota com o usuário. Os dados adquiridos são processados e, além de salvos em arquivo, são disponibilizados para o usuário na forma de tabelas e gráficos, por meio de uma interface gráfica *web*. O protótipo desenvolvido foi caracterizado e testado em laboratório quando comparado com um analisador comercial da qualidade de energia elétrica. Os desvios percentuais das medições, em relação ao medidor de referência, foram avaliados para cargas lineares e não lineares. Como principais resultados se destacam desvios percentuais não superiores a 2,40% e a 0,05%, respectivamente, para as medições de valores eficazes e de frequência.

Palavras-chave: Protótipo; Qualidade da energia elétrica; Interface remota; Cargas lineares e não lineares.

ABSTRACT

The concept of prototype design to estimate the parameters to the power and the power of the electric power, able to provide data of consumption, slow values, maximum and minimum values, harmonic individuals up to 50^a, total harmonic distortion, voltage unbalance, frequency and powers is presented. A three-phase integrated energy meter 90E36A was used as the electric signal acquisition interface and a single Beaglebone Black board computer for parameter calculation and implementation of the remote interface. The acquired data are processed and, in addition to being saved in a file, are made available to the user in the form of tables and graphs, through a graphical web interface. The prototype developed was characterized and tested in the laboratory when compared to a commercial electric power quality analyzer, used as reference meter. The percentage deviations of the measurements, relative to the reference meter, were evaluated for linear and non-linear loads. The main results are percentage deviations not exceeding 2,40% and 0,05%, respectively, for measurements of effective values and frequency.

Keywords: Prototype design; Power quality; Remote interface; Linear and non-linear loads.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Distúrbios associados à QEE.	17
Figura 2- Topologia do protótipo desenvolvido.	31
Figura 3- Diagrama de blocos – 90E36A.	33
Figura 4- Fotografia da BBB.	34
Figura 5- Circuito de condicionamento de sinais de tensão.	36
Figura 6- Sensor de corrente SCT013.	37
Figura 7- Circuito de condicionamento de sinais de corrente.	37
Figura 8- Circuito de retificação e eliminação de ondulação.	38
Figura 9- Circuito de retificação e eliminação de ondulação.	38
Figura 10- Arranjo experimental utilizado para testes do protótipo em laboratório.	48
Figura 11– Teste experimental com carga resistiva.	49
Figura 12 – Formas de onda das tensões na fase A obtidas pelo protótipo e pelo qualímetro.	50
Figura 13 – Formas de onda das tensões na fase B obtidas pelo protótipo e pelo qualímetro.	50
Figura 14 – Formas de onda das tensões na fase C obtidas pelo protótipo e pelo qualímetro.	51
Figura 15 – Formas de onda das correntes na fase A obtidas pelo protótipo e pelo qualímetro.	52
Figura 16 – Formas de onda das correntes na fase B obtidas pelo protótipo e pelo qualímetro.	52
Figura 17 – Formas de onda das correntes na fase C obtidas pelo protótipo e pelo qualímetro.	53
Figura 18 – Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase A.	55
Figura 19 – Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase B.	55
Figura 20 – Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase C.	56
Figura 21 – Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase A.	56
Figura 22 – Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase B.	57
Figura 23 – Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase C.	57
Figura 24 – Arranjo experimental com carga não linear.	61
Figura 25 – Formas de onda das tensões na fase A obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo Nexus 1500.	61
Figura 26 – Formas de onda das tensões na fase B obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo Nexus 1500.	62
Figura 27 – Formas de onda das tensões na fase C obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo Nexus 1500.	62
Figura 28 – Formas de onda das correntes na fase A obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo Nexus 1500.	64
Figura 29 – Formas de onda das correntes na fase B obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo Nexus 1500.	64
Figura 30 – Formas de onda das correntes na fase C obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo Nexus 1500.	65
Figura 31 – Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase A.	67
Figura 32 – Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase B.	67
Figura 33 – Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase C.	68

Figura 34 – Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase A.....	68
Figura 35 – Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase B.....	69
Figura 36– Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase C.....	69
Figura 37– Captura de tela da página web desenvolvida – parâmetros gerais.....	72
Figura 38– Captura de tela da página web desenvolvida – forma de onda da tensão. ...	73
Figura 39– Captura de tela da página web desenvolvida – harmônicas.....	73
Figura 40– Captura de tela da página web desenvolvida – potências.	74
Figura 41– Captura de tela da página web desenvolvida – potências.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categoria e características típicas dos distúrbios da QEE.....	18
Tabela 2- Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).	21
Tabela 3- Limites para desequilíbrios de tensão.	22
Tabela 4- Quadro comparativo – trabalhos reportados na literatura.	28
Tabela 5- Composição das harmônicas para a tensão de alimentação nas fases.	48
Tabela 6-Desvios percentuais e coeficientes de correlação inerentes às formas de onda de tensão.	51
Tabela 7-Desvios percentuais e coeficientes de correlação inerentes às formas de onda das correntes medidas na fase A.	53
Tabela 8- Análise comparativa dos valores eficazes.	54
Tabela 9- Análise comparativa para a DHT.	58
Tabela 10 – Frequência medida pelo protótipo e pelo Nexus 1500.	58
Tabela 11- Fator de desbalanceamento medido pelo protótipo e pelo Nexus 1500.	58
Tabela 12- Análise comparativa – método senoidal.	59
Tabela 13- Análise comparativa – potência pelo método de Willems.	59
Tabela 14-Desvios percentuais e coeficientes de correlação inerentes às formas de onda de tensão.	63
Tabela 15-Desvios percentuais e coeficientes de correlação inerentes às formas de onda de corrente.	65
Tabela 16- Análise comparativa valores eficazes.	66
Tabela 17- Análise comparativa para a DHT.	70
Tabela 18- Frequência medida pelo protótipo e pelo Nexus 1500.	70
Tabela 19- Fator de desbalanceamento medido pelo protótipo e pelo Nexus 1500.	70
Tabela 20- Análise comparativa – Triângulo de potência.	71
Tabela 21- Análise comparativa – potência pelo método de Willems.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analog To Digital Converter</i>
ANEEL	Agência Nacional De Energia Elétrica
AQEE	Analisador De Qualidade Da Energia
BBB	<i>Beaglebone Black</i>
CBQEE	Congresso Brasileiro Da Qualidade Da Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito Integrado
DFT	Transformada Discreta De Fourier
DHI	Distorção Harmônica Individual
DHT	Distorção Harmônica Total
DHT ₃	Distorção Harmônica Total De Tensão Para As Componentes Múltiplas De 3
DHT ₁	Distorção Harmônica Total De Tensão Para As Componentes Ímpares Não Múltiplas De 3
DHT _P	Distorção Harmônica Total De Tensão Para As Componentes Pares Não Múltiplas De 3
DMA	<i>Direct Memory Access</i>
DPS	<i>Digital Signal Processor</i>
eMMC	<i>Embedded Multimedia Card</i>
FD	Fator De Desequilíbrio De Tensão
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FP	Fator De Potência
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Global System For Mobile Communications</i>
IEEE	Instituto De Engenheiros Eletricistas E Eletrônicos
PC	<i>Personal Computer</i>
PLC	<i>Power Line Communication</i>
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
PRODIST	Procedimentos De Distribuição De Energia Elétrica No Sistema Elétrico Nacional

PRU	<i>Programmable Real-Time Unit</i>
PRU-ICSS	<i>Programmable Real-Time Unit Industrial Control Subsystem</i>
PXI	PCI Extensions For Instrumentation
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SBC	<i>Single Board Compute</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interfac</i>
TC	Transformador De Corrente
UA	Unidade De Alimentação
UCPS	Unidade De Condicionamento E Processamento De Sinais
UI	Unidade De Interface
UPIU	Unidade De Processamento De Dados E Interface Com Usuário

SUMÁRIO

1	Introdução	13
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos.....	15
1.3	Contribuições	16
1.4	Estrutura do texto.....	16
2	Fundamentação Teórica	17
2.1	Fatores Determinantes da Qualidade da Energia Elétrica.....	17
2.1.1	Fenômenos Transitórios.....	19
2.1.2	Afundamento de Tensão	20
2.1.3	Interrupção de Tensão.....	20
2.1.4	Elevação de Tensão	21
2.1.5	Harmônicas	21
2.1.6	Desequilíbrio de Tensão	22
2.1.7	Variações de Frequência	23
2.2	Estimação de Potência	23
2.3	Considerações	24
3	Revisão Bibliográfica.....	25
3.1	Considerações	30
4	Procedimentos Construtivos e Computacionais.....	31
4.1	Unidade de Aquisição de Sinais e Processamento de Dados.....	32
4.1.1	Circuito Integrado 90E36A.....	33
4.1.2	<i>BeagleBone Black</i> (BBB)	34
4.2	Unidade de Condicionamento de Sinais	35
4.2.1	Condicionamento dos Sinais de Tensão	36
4.2.2	Condicionamento dos Sinais de Corrente	36
4.3	Unidade de Alimentação.....	38
4.4	Cálculo dos Parâmetros de QEE e Potência	39
4.4.1	Cálculo do Valor Eficaz.....	39
4.4.2	Estimação da Frequência	40
4.4.3	Análise Harmônica	40
4.4.4	Estimação de Desbalanceamento.....	41

4.4.5	Estimação da Potência	42
4.5	Interface com o Usuário.....	45
4.6	Considerações	45
5	Resultados	47
5.1	Testes do Protótipo em Laboratório.....	47
5.2	Testes com Carga Linear	48
5.3	Testes com Carga Não Linear.....	60
5.4	Unidade de Interface com o Usuário	72
5.5	Considerações	74
6	Conclusões e Trabalhos futuros	75
6.1	Trabalhos Futuros	77
6.2	Produção Científica.....	77
	Referências	78

1 INTRODUÇÃO

Um novo conceito de redes elétricas tem se difundido e ganhado espaço tanto na academia quanto em empresas de energia elétrica como também na mentalidade dos consumidores. As chamadas redes inteligentes de energia elétrica (do inglês, *Smart Grids*), são redes que utilizam tecnologias avançadas de medição e de comunicações para permitir o gerenciamento da energia elétrica desde a geração até o consumo. Segundo Cesário Júnior (2014), tais redes estarão aptas a coordenar as necessidades e capacidades de geradores, distribuidores e usuários finais da energia elétrica, minimizando os custos, enquanto mantém a confiabilidade, a eficiência e a estabilidade do sistema. As redes elétricas inteligentes também possibilitarão a redução dos furtos de energia (perdas não técnicas), a melhoria dos serviços fornecidos pelas concessionárias e gerenciamento da geração em pequena escala, no conceito da geração distribuída. Contudo, torna-se necessário um efetivo monitoramento e o controle da qualidade da energia fornecida.

Nesse contexto, a qualidade da energia elétrica tornou-se um dos temas de maior importância para concessionárias e consumidores (XAVIER, 2016). Isto se deve, principalmente, ao uso de equipamentos cada vez mais sensíveis a variações da energia elétrica, a proliferação do emprego de cargas com relação tensão-corrente não linear e à entrada da geração distribuída nas redes de distribuição. O impacto da geração distribuída nas redes de distribuição, especialmente, tende a ser cada vez mais notável, na medida em que se populariza o acesso a esse tipo de tecnologia pelos consumidores de energia elétrica. Soma-se a isto ainda, a entrada em operação de usinas solares de grande porte, especialmente na região Nordeste do país.

Entre os possíveis efeitos da entrada da geração distribuída, destaca-se a injeção de harmônicos nas redes. O emprego de inversores para efetivar a conexão da geração ao sistema elétrico pode promover um acréscimo elevado de harmônicos, a depender da eficiência e qualidade do inversor. Harmônicos causam distorções na forma de onda dos sinais elétricos, além de favorecer o aumento das perdas por aquecimento devido às correntes de Foucault, ruído e redução da vida útil dos equipamentos. Outra preocupação relacionada à alta penetração da geração distribuída na rede, segundo Souza (2014), é a elevação dos perfis de tensão para níveis acima dos limites recomendados.

Neste contexto, Dungan *et al.* (2004) destaca a preocupação com a qualidade da energia elétrica por parte das concessionárias e até dos próprios consumidores, sobretudo os de grande porte, os quais buscam implementar programas de monitoramento da qualidade da energia elétrica. Nesta mesma direção, Xavier (2016) relata que a demanda em melhorar a qualidade da energia impulsiona o desenvolvimento de sistemas de monitoramento da qualidade da energia.

Diante do exposto, acredita-se que o ponto de partida para a implantação de redes inteligentes é a substituição dos medidores de energia convencionais por medidores inteligentes (CESÁRIO JUNIOR, 2014). Segundo Yan *et al.* (2013), por meio de medidores inteligentes é possível obter benefícios, como por exemplo, medição com mais acurácia da energia e realização da medição sem a necessidade de deslocamento de pessoal. Os benefícios podem também ser estendidos aos consumidores finais, pois a garantia de acesso às informações do consumo e da qualidade da energia fornecida é primordial para os consumidores industriais, comerciais e residenciais.

Uma característica recomendada para os novos medidores de energia elétrica também é que sejam reconfiguráveis. Esta característica permite desde a configuração do dispositivo para atender um consumidor específico, como a mudança de modalidades tarifárias, bem como a mudança dos algoritmos de cálculo utilizados. Neste sentido, Medeiros (2016) ressalta a importância do desenvolvimento de dispositivos reconfiguráveis para a aquisição de grandezas elétricas aplicados ao monitoramento da energia elétrica.

Portanto, baseado no trabalho desenvolvido por Medeiros (2016), a proposta central deste trabalho é a concepção de um protótipo que possibilite acesso às informações do consumo e da qualidade da energia fornecida, possibilitando assim, a medição e o monitoramento do consumo local e à distância, como também, fornecendo os parâmetros de qualidade da energia elétrica. Para tanto, foi projetado, construído e testado em laboratório um dispositivo capaz de medir os sinais de tensão e corrente, assim como seus valores de pico e *RMS*, valores de componentes harmônicas, distorção harmônica total, desbalanceamento, frequência e potência consumida. Para permitir o monitoramento e a avaliação dos dados gerados, isto é, formas de onda e parâmetros calculados, foi desenvolvida uma interface de monitoramento à distância para o usuário.

1.1 MOTIVAÇÃO

O conceito de redes elétricas inteligentes permite encontrar soluções para o monitoramento e o controle do consumo de energia elétrica, a aplicação de geração distribuída e mini distribuída e uma maior efetividade da redução das perdas não técnicas nos sistemas elétricos de potência. Ele também possibilita a melhoria da qualidade da energia e do serviço fornecidos pelas concessionárias. Para tanto, a evolução dos medidores é imprescindível, uma vez que os medidores deverão ser os dispositivos responsáveis pela aquisição, processamento e monitoramento de dados nas redes elétricas inteligentes. Atualmente, os medidores convencionais de energia possibilitam unicamente a medição de consumo. Por outro lado, para a realização da análise da qualidade da energia fornecida, por exemplo, são empregados analisadores específicos e de custo elevado em pontos estratégicos do sistema elétrico. Portanto, no contexto das redes elétricas inteligentes e da necessidade de melhoria da qualidade da energia, é de bom alvitre o desenvolvimento de um protótipo para estimar parâmetros relacionados à potência e à qualidade da energia elétrica.

1.2 OBJETIVOS

Como objetivo geral tem-se a concepção, desde o projeto aos testes comparativos, de um protótipo para estimar parâmetros relacionados à potência e à qualidade da energia elétrica.

Dentre os objetivos específicos destacam-se:

- Desenvolver, implementar e testar algoritmos computacionais dedicados à determinação de parâmetros relacionados à qualidade da energia elétrica: valor eficaz e valor de pico, frequência, desbalanceamento, distorção harmônica total e distorção harmônica individual;
- Desenvolver, implementar e testar algoritmos computacionais dedicados à determinação de parâmetros relacionados ao consumo de energia elétrica: potências ativa, reativa e aparente e fator de potência;
- Desenvolver uma interface remota para a permitir acesso do usuário às medições geradas pelo dispositivo;

- Realizar a análise comparativa do dispositivo desenvolvido frente a um analisador de energia comercial.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

A principal contribuição deste trabalho é a proposição de um protótipo de baixo custo, reconfigurável, capaz de integrar funções de medição de potência e de fornecer parâmetros de qualidade da energia elétrica com acurácia, quando comparado a um analisador de qualidade de energia comercial. Também pode-se contribuir para o aprimoramento das técnicas de desenvolvimento e de produção de dispositivos de medição de energia elétrica em âmbito nacional.

1.4 ESTRUTURA DO TEXTO

No Capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica para embasar o leitor acerca dos temas a serem tratados neste trabalho. Também, são descritos conceitos de qualidade da energia elétrica e estimação de potência.

Em seguida, no Capítulo 3, é apresentada a revisão bibliográfica comentando os principais trabalhos reportados na literatura. O enfoque é dado ao desenvolvimento de medidores de energia elétrica, como ênfase na medição de parâmetros de qualidade da energia e potência.

No Capítulo 4 é apresentada a proposta de um protótipo para medição de potência e estimação de parâmetros relacionados à qualidade da energia elétrica, destacando-se sua arquitetura, a unidade de aquisição e processamento de dados, os algoritmos de cálculo de parâmetros utilizados e a interface desenvolvida para interação com o usuário.

Em seguida, no Capítulo 5 são expostos e discutidos os resultados obtidos a partir de testes laboratoriais realizados no protótipo desenvolvido. É apresentada também uma análise comparativa entre o protótipo e um analisador de energia comercial.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e contribuições, além de propostas para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

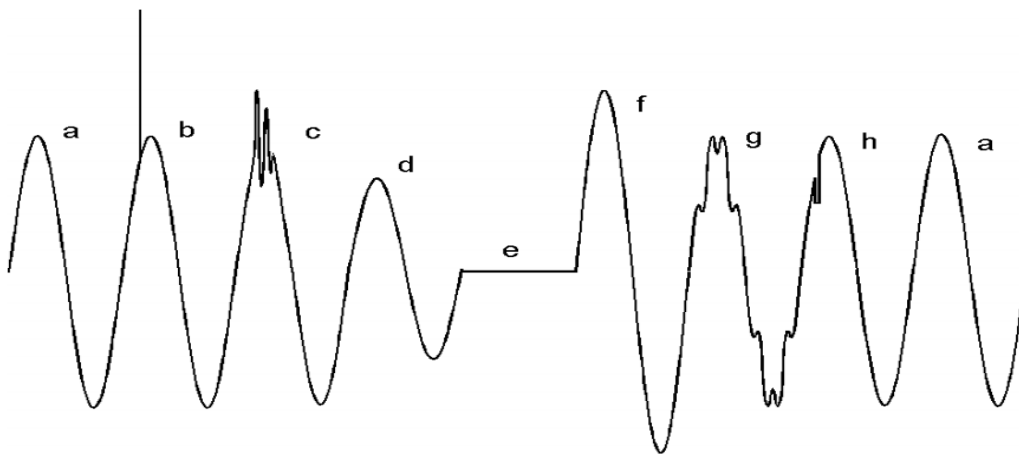
Neste capítulo é apresentada uma fundamentação teórica para embasar o leitor acerca dos temas tratados, fornecendo informações sobre as definições relacionadas à qualidade da energia elétrica, bem como a descrição dos seus principais fenômenos, destacando-se assim os principais distúrbios, suas causas e formas de identificação.

2.1 FATORES DETERMINANTES DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A qualidade da energia elétrica (QEE) está associada à ausência ou à baixa ocorrência de distúrbios que afetam formas de onda, amplitude, frequência ou fase dos sinais de tensão e de corrente, podendo ocasionar falha ou operação inadequada de equipamentos (BOLLEN, 2000). A QEE também visa permitir o conforto dos usuários da energia elétrica, na medida em que contribui para a mitigação de fenômenos que possam causar desconfortos como, por exemplo, a cintilação luminosa.

Na Figura 1 são exemplificados alguns dos principais distúrbios relacionados à qualidade da energia elétrica.

Figura 1- Distúrbios associados à QEE.



Fonte: Bronzeado *et al.* (1997).

- a) Tensão normal;
- b) Transitório Impulsivo de Tensão;
- c) Transitório Oscilatório de Tensão;
- d) Afundamento de Tensão;
- e) Interrupção de Tensão;
- f) Elevação de Tensão;
- g) Distorção Harmônica;
- h) Cortes na Tensão.

Em termos de legislação e da aplicação de padrões aceitáveis para os parâmetros relacionados à QEE, se destacam, em nível mundial, as normas europeias EN 50160, IEC 61000-4-15 e IEC 61000-4-7 que tratam de flutuação, harmônicas e desvios/variações de tensão e a norma IEEE 519 que trata do monitoramento e da interpretação dos fenômenos relacionados à QEE. Na Tabela 1 são apresentadas as características típicas dos principais distúrbios da QEE, conforme encontrado na IEEE 519 (2009).

Tabela 1 - Categoria e características típicas dos distúrbios da QEE.

Categoria	Duração típica	Amplitude de tensão típica
1. Transitório		
1.1. Impulsivo		
1.1.1. Nanossegundo	< 50 ns	
1.1.2. Microssegundo	50 ns – 1 ms	
1.1.3. Milissegundo	> 1 ms	
2. Variação de tensão de curta duração		
2.1. Instantâneo		
2.1.1. Afundamento	0,5-30 ciclos	0,1-0,9 p.u.
2.1.2. Elevação	0,5-30 ciclos	1,1-1,8 p.u.
2.2. Momentâneo		
2.2.1. Interrupção	0,5 ciclos – 3 s	< 0,1 p.u.
2.2.2. Afundamento	30 ciclos – 3 s	0,1-0,9 p.u.
2.2.3. Elevação	30 ciclos – 3s	1,1-1,4 p.u.
2.3. Temporário		
2.3.1. Interrupção	>3 s – 1 min	< 0,1 p.u.
2.3.2. Afundamento	>3 s – 1 min	0,8-0,9 p.u.
2.3.3. Elevação	>3 s – 1 min	1,1-1,2 p.u.

(continuação)

Categoria	Duração típica	Amplitude de tensão típica
3. Variação de tensão de longa duração		
3.1. Interrupção sustentada	> 1 min	0,1 p.u.
3.2. Subtensão	> 1 min	0,8-0,9 p.u.
3.3. Sobretenção	> 1 min	1,1-1,2 p.u.
4. Desequilíbrio		
4.1. Tensão	Regime permanente	0,5-2%
4.2. Corrente	Regime permanente	1,0-30%
5. Distorção da forma de onda		
5.1. Harmônicas	Regime permanente	0-20%
5.2. Inter-harmônicas	Regime permanente	0-2%
6. Flutuação de tensão	Intermitente	0,1-7%
7. Variações de frequência	< 10 s	± 0,10 Hz

Fonte: Adaptado de IEEE (2009).

No Brasil, com o intuito de normatizar e fiscalizar aspectos relacionados à QEE no sistema de distribuição de energia elétrica, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) criou um documento específico para fazer parte dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST).

O Módulo 8 (PRODIST, 2017) discorre especificamente sobre a qualidade do serviço e do produto das distribuidoras de energia elétrica. A qualidade do produto, refere-se aos parâmetros normativos de conformidade de tensão em regime permanente, além das perturbações nas formas de onda. A qualidade de serviço, refere-se aos procedimentos relativos aos indicadores de qualidade e dos tempos de atendimento.

Nas subseções seguintes serão apresentados os principais parâmetros e fenômenos relacionados à qualidade da energia elétrica.

2.1.1 FENÔMENOS TRANSITÓRIOS

Transitórios eletromagnéticos podem ser definidos como perturbações na forma de onda alternada, de tensão ou de corrente, oriundas de alterações abruptas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica. Caracterizado por uma acentuada

descontinuidade do sinal, curta duração e alta amplitude, os transitórios eletromagnéticos podem se apresentar tanto com polaridade aditiva quanto com polaridade subtrativa em relação à forma de onda nominal. Suas características são predominantemente determinadas pela resistência, indutância e capacitância da rede de elétrica no ponto de interesse (DOMMEL, 1996).

Os fenômenos transitórios relacionados à qualidade da energia elétrica podem ser classificados em impulsivos e oscilatórios. Transitórios impulsivos são fenômenos aleatórios causados por descargas atmosféricas.

A principal fonte de transitórios oscilatórios em sistemas de potência é a energização de bancos de capacitores. Em virtude do elevado di/dt verificado nesse tipo de manobra, são excitadas ressonâncias em alta frequência, que se convertem em oscilações rápidas da tensão no ponto de conexão do capacitor.

2.1.2 AFUNDAMENTO DE TENSÃO

O afundamento de tensão é uma redução do valor eficaz da tensão, na frequência fundamental, para um valor entre 0,1 e 0,9 p.u. em relação à tensão nominal do sistema.

Tipicamente, afundamentos de tensão são provocados pela entrada de cargas de porte significativo em relação ao nível de curto-circuito local e por faltas monofásicas (curto-circuito fase-terra) (ARRUDA, 2003). As características de um afundamento de tensão, diante de uma determinada falta dependem da natureza da falta, sua posição relativa a outros consumidores e o tipo de proteção utilizada.

2.1.3 INTERRUPÇÃO DE TENSÃO

Uma interrupção ocorre quando a tensão de fornecimento ou a corrente de carga é inferior a 0,1 p.u. Esse tipo de distúrbio pode ser causado por faltas no sistema elétrico, falhas em equipamentos e mal funcionamento dos dispositivos de proteção do sistema de potência. Interrupções de tensão provocam sérios transtornos tanto para as concessionárias quanto para os consumidores, na medida em que comprometem o fornecimento de energia elétrica, gerando insegurança e perdas econômicas.

2.1.4 ELEVAÇÃO DE TENSÃO

As elevações de tensão são caracterizadas pelo aumento no valor eficaz da tensão, na frequência fundamental, superior a 1,1 p.u. Trata-se do efeito contrário ao do afundamento, sendo as principais causas, a saída de grandes blocos de cargas ou a conexão de bancos de capacitores. Elevações de tensão também podem estar associadas a faltas fase-terra, visto que as fases não defeituosas experimentam elevação de tensão. A severidade de uma elevação de tensão durante uma condição de falta é função do local da falta, da impedância do sistema e do aterramento (ARRUDA, 2003).

2.1.5 HARMÔNICAS

As harmônicas são componentes espectrais de um sinal cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência fundamental de operação de um sistema elétrico de potência. Originadas a partir de cargas com características de operação não lineares, as harmônicas causam distorções na forma de onda dos sinais, além de perdas, ruído e redução da vida útil dos equipamentos. Em alguns casos, podem causar ressonância e, conseqüentemente, sobretensões em sistemas de potência, desarme de sistemas de controle de cargas sensíveis, entre outros.

Para fins de conformidade, subdivide-se o espectro harmônico em três classes: componentes pares não múltiplas de três, componentes ímpares não múltiplas de três e componentes múltiplas de três. Para cada uma dessas classes há uma DHT máxima admitida em função da tensão nominal de operação, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2- Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_N \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_N < 230 \text{ kV}$
DHT %	10,0	8,0	5,0
DHT _P %	2,5	2,0	1,0
DHT _I %	7,5	6,0	4,0
DHT ₃ %	6,5	5,0	3,0

DHT_P = distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3; DHT_I = distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3; DHT₃ = distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3.

Fonte: Adaptado de PRODIST (2017).

As componentes múltiplas de três são destacadas pelo fato de serem bastante comuns nos sistemas de potência e estarem associadas a correntes no neutro de transformadores e redes de baixa tensão.

2.1.6 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Desequilíbrio de tensão em um sistema trifásico é uma condição na qual são verificadas diferenças entre os módulos das tensões de fase, defasagem angular diferente de 120 graus entre elas, ou ainda, as duas condições simultaneamente. O desequilíbrio de tensão também pode ser definido como o desvio máximo dos valores médios das tensões ou correntes trifásicas, dividido pela média dos mesmos valores, expresso em percentuais (PAULILLO, 1996).

Segundo Arão (2014), os desequilíbrios de tensão são causados pela distribuição desigual de cargas monofásicas nos alimentadores. Nesse sentido, são produzidas correntes desequilibradas nos circuitos de distribuição e, por conseguinte, quedas de tensão nas impedâncias do sistema com valores diferentes nas três fases.

Os desequilíbrios de tensão têm consequências danosas para o funcionamento de alguns equipamentos elétricos, comprometendo, na maioria dos casos, o seu desempenho e a sua vida útil. Particularmente, no caso de motores trifásicos, o desequilíbrio de tensão pode causar elevação da temperatura de operação dos condutores dos enrolamentos, redução do conjugado (devido à existência de torque contrário ao sentido normal de rotação) e vibrações mecânicas indesejadas (REZENDE & SAMESIMA, 2012).

O valor de referência para o desbalanceamento nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da baixa tensão, deve ser igual ou inferior a 3%, conforme apresentado na Tabela 3. O valor, além de servir como referência durante o planejamento do sistema elétrico, deve ser considerado, especialmente, no dimensionamento dos motores trifásicos a serem utilizados.

Tabela 3- Limites para desequilíbrios de tensão.

Tensão nominal	Limite
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	3,0%
$1 \text{ kV} < V_N < 230 \text{ kV}$	2,0%

Fonte: Adaptado de PRODIST (2017).

2.1.7 VARIAÇÕES DE FREQUÊNCIA

O termo variações de frequência é definido como desvios da frequência fundamental de operação de um sistema elétrico de potência (60 Hz para o Brasil).

Tradicionalmente, a frequência do sistema de potência é associada diretamente à velocidade de rotação dos geradores que suprem o sistema, no entanto, a atual conjuntura do sistema de geração de energia demanda atenção também com a entrada em operação de fontes de geração que se utilizam de inversores, os quais também podem contribuir para oscilações de frequência. Em sentido geral, variações de frequência são observadas em virtude do balanço dinâmico entre geração e carga.

As variações de frequência que ultrapassam os limites normais de operação podem ser causadas por grandes desbalanços entre produção e consumo de energia elétrica, como se verifica por ocasião da saída de grandes blocos de carga ou de geração.

A fim de manter a estabilidade do sistema, é admissível uma variação da frequência dentro de uma faixa de 59,9 a 60,1 Hz (PRODIST, 2017).

2.2 ESTIMAÇÃO DE POTÊNCIA

Os estudos que nortearam o desenvolvimento de conceitos sobre a estimação da potência elétrica foram estabelecidos no final do Século XIX, portanto, em um contexto de uso de cargas lineares e invariantes no tempo (CZARNECKI, 2016). Outrossim, a presença de distorções harmônicas nos sistemas elétricos de então era praticamente desprezível (COELHO, 2018). Neste sentido, foram estabelecidas as definições de potência ativa e de potência reativa, bem como potência aparente e fator de potência, conforme seguem:

- Potência ativa (P): potência efetivamente consumida, isto é, que gera trabalho;
- Potência reativa (Q): potência que não realiza trabalho;
- Potência aparente (S): valor de pico da potência instantânea;
- Fator de potência (FP): razão entre a potência ativa e a potência aparente.

As definições de potência sob condições senoidais são consolidadas e bem aceitas na comunidade científica, portanto, não há dificuldades na sua interpretação. No entanto,

em 1892, Steinmetz produziu um experimento no qual observou que a igualdade $S^2 = P^2 + Q^2$ não era satisfeita diante do uso de cargas com característica não linear (STEINMETZ, 1892, apud COELHO, 2018).

A necessidade de mensurar a parcela não ativa da potência, portanto, motivou o desenvolvimento de diversos trabalhos orientados no sentido de permitir o cálculo de potência em condições não-senoidais, dentre os quais se destaca o trabalho de Willems (1992), o qual será explorado no presente trabalho.

O trabalho de Alves (2015) traz uma sequência histórica muito completa sobre as metodologias de cálculo de potência, e Frazio Junior (2012), Arcanjo (2013), Lima (2014), Alves (2015) e Coelho (2018) elaboraram estudos acerca das características e do equacionamento utilizado pelas principais teorias.

A importância dos trabalhos desenvolvidos, entretanto, se torna ainda mais significativa atualmente em virtude da crescente entrada em operação de cargas e sistemas de geração de energia elétrica com características fortemente não lineares (geradores fotovoltaicos, eólicos, dentre outros).

2.3 CONSIDERAÇÕES

Uma fundamentação teórica para embasar o leitor acerca dos temas tratados foi apresentada. Também, foram fornecidas informações sobre aspectos relevantes para o trabalho relacionados à qualidade da energia elétrica e estimação de potência.

No próximo capítulo serão apresentados os principais trabalhos que descrevem o desenvolvimento de medidores de energia elétrica, como ênfase na medição de parâmetros de qualidade da energia e potência.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais trabalhos reportados na literatura sobre o desenvolvimento de medidores de energia elétrica, com ênfase na medição de parâmetros de qualidade da energia e potência. Neste sentido, destaca-se a evolução dos medidores desenvolvidos, bem como a sua importância no conceito das redes inteligentes de energia elétrica.

Para Depuru *et al.* (2011) um medidor inteligente é um medidor capaz de medir não apenas o consumo de energia elétrica, mas também, capaz de fornecer informações sobre os parâmetros da energia fornecida/consumida. Portanto, entre suas funcionalidades e vantagens em relação aos medidores convencionais, destaca-se, a facilidade de acesso às informações relacionadas ao consumo e à qualidade da energia. A importância de analisar a qualidade da energia é indiscutível, sobretudo na medida que é cada vez mais comum o uso de equipamentos elétricos sensíveis a distúrbios.

Embora o conceito de medição inteligente seja relativamente recente, a literatura já reporta desde a década de 1980 trabalhos sobre o tema. Um dos primeiros trabalhos encontrados na literatura sobre o desenvolvimento de um dispositivo para monitoramento da energia é o de Montensen e Johnson (1988). No seu trabalho, eles propõem um sistema para análise de harmônicos em um sistema elétrico comercial. Para tanto, foi desenvolvida uma placa para aquisição e digitalização dos sinais de tensão e de corrente baseada no microprocessador 68000. O processamento dos dados obtidos foi realizado por um computador. Como resultado, foi possível a realização da análise de componentes harmônicas até a 63ª ordem e capacidade de armazenamento de 1 semana de dados.

Na sequência, sobretudo a partir dos anos 2000, diversos trabalhos foram desenvolvidos no sentido de permitir a medição de energia e de parâmetros de qualidade da energia, tais como, cálculos de valores eficazes (*RMS* verdadeiro), distorção harmônica, frequência e potência (ativa, reativa, aparente e fator de potência). Um aspecto comum a todos os trabalhos verificados é a subdivisão do processo de medição nos seguintes módulos básicos: aquisição, condicionamento e digitalização dos sinais, processamento dos dados e exibição dos resultados.

Chen *et al.* (2000), descrevem o projeto de um sistema de monitoramento da energia elétrica, a partir da aquisição dos sinais elétricos por um sistema de aquisição de

dados de uso geral em computador. O sistema foi desenvolvido baseado em padrões abertos ou públicos, isto é, sem a necessidade de um instrumental de *hardware* e *software* proprietários, a fim de minimizar a dependência de produtos de determinados fornecedores. A unidade de monitoramento desenvolvida consiste em uma placa de condicionamento de sinais e em uma placa de aquisição de dados instalada em um computador com tecnologia PXI (arquitetura desenvolvida pela *National Instruments* em 1998 para instrumentação e monitoramento). O sistema desenvolvido incorpora uma rotina FFT para análise das harmônicas e a identificação de afundamentos de tensão, por meio do cálculo do valor eficaz da tensão e da corrente. Para a visualização dos dados, o sistema possui uma interface implementada para ambiente *Windows*® desenvolvida em C++.

Em 2006, Wei *et al.* (2006) desenvolveram um trabalho no qual propunham um sistema de monitoramento da energia elétrica em tempo real, o qual combinava a alta capacidade de processamento de um DSP com a flexibilidade de recursos de um computador. O sistema de aquisição dos dados proposto era baseado no DSP (*Digital Signal Processor*, em português: processador digital de sinais) TMS320C6711b e no conversor analógico digital ADS8364 de seis canais. O sistema desenvolvido era trifásico e permitia o monitoramento de DHT, valores eficazes, flutuação e desbalanceamento de tensão, além do cálculo de potências. A interface com usuário foi desenvolvida utilizando o software LABVIEW® e permitia acesso aos parâmetros atualizados a cada 100 ms.

Zhang e Li (2009) propuseram um trabalho no qual foi desenvolvido um sistema de monitoramento online da energia elétrica. O sistema desenvolvido consistia em unidades clientes e um servidor. Cada unidade cliente era formada por um sistema de aquisição de dados com capacidade de aquisição de 1024 amostras por ciclo e por um computador. O computador era utilizado para o cálculo dos parâmetros (harmônicas, valor eficaz e potência) e para o envio dos dados para o servidor. Cada cliente ainda dispunha de um módulo GPS, a fim de permitir ao servidor a sincronização dos dados enviados. Ao servidor cabia o armazenamento das informações enviadas pelos clientes em um banco de dados e a permissão de acesso via *web*.

Lanndi *et al.* (2011) desenvolveram um sistema de baixo custo para medição de energia. O medidor monofásico desenvolvido, baseado no microcontrolador ARM STM32, era capaz de medir tensão e corrente eficazes e distorção harmônica total, além de potência ativa e reativa. Um servidor *web* integrado permitia acesso às informações relativas ao perfil de consumo e aos demais parâmetros medidos. A arquitetura do sistema

permitia ainda a interação entre diversos medidores instalados em rede, por meio da comunicação de diversos medidores com um concentrador via PLC (do inglês, *Power Line Communication*).

Em 2013, Li e Lianping (2013) desenvolveram um trabalho no qual propunham a implementação de um medidor de energia trifásico, bidirecional e que permitisse a estimação de frequência e de harmônicas. O protótipo foi desenvolvido com base no circuito integrado ATT7022, um medidor trifásico bidirecional dedicado. Para realizar a interface com o ATT7022, utilizou-se um microcontrolador (não especificado no trabalho) e um computador foi utilizado para processamento e visualização dos dados.

Fonsêca (2015) desenvolveu um protótipo de medidor de energia destinado ao monitoramento de transformadores de distribuição monofásicos. O medidor desenvolvido, baseado no circuito integrado ADE7880, um medidor de energia dedicado, era capaz de medir tensão e corrente eficazes, distorção harmônica e potência. Foi desenvolvido também um *software* para visualização dos dados medidos. A comunicação entre o medidor desenvolvido e o computador no qual se instalou o *software* de monitoramento foi realizada por meio de módulos de comunicação com tecnologia *ZigBee*.

Também em 2015, Volkens *et al.* (2015) desenvolveram um medidor de energia elétrica de tempo real com interface de comunicação *web*. O medidor trifásico desenvolvido, baseado no microcontrolador ARM STM32, era capaz de medir tensão e corrente e mensurar valores de distorção harmônica individual, potência e energia. O medidor possibilitava ainda a previsão do consumo mensal de energia, e caso fossem informadas as cargas da instalação e o consumo mensal pretendido, o medidor fornecia sugestões de ações a serem adotadas para se atingir tal consumo. Além da interface de comunicação *web*, o protótipo dispunha de conexão GSM (do inglês, *Global System for Mobile Communications*), a fim de que mensagens de texto fossem enviadas para o usuário.

Já em 2016, Medeiros (2016) desenvolveu um sistema de aquisição de grandezas elétricas aplicado ao monitoramento da energia elétrica. Para tanto, utilizou-se o CI MCP3008 para aquisição dos dados e uma plataforma embarcada (*BeagleBone Black*) para processamento dos dados e apresentação dos resultados, os quais foram disponibilizados por meio de uma interface *web* básica. Com o sistema desenvolvido foi possível medir grandezas tais como tensão e corrente eficazes, distorção harmônica total e distorção harmônica individual até a 9ª ordem, além de potência. O trabalho também

fez uma breve comparação entre dois métodos de cálculo de potência: o método tradicional (triângulo de potências) e o método do IEEE, este, no entanto, considerando apenas as harmônicas ímpares até a harmônica de nona ordem. O trabalho de Medeiros (2016), entretanto, além de utilizar conversor A/D com resolução apenas de 10 bits, não incorporou a medição de outros parâmetros relevantes para o monitoramento da energia tais como: frequência e desbalanceamento. A interface *web* desenvolvida, ainda, mostrou-se bastante rudimentar, permitindo acesso apenas às formas de onda dos sinais medidos e aos valores calculados para a potência.

Em 2018, Pietrosanto e Paciello (2018) propuseram um protótipo de medidor de energia bidirecional capaz de realizar a medição de valores eficazes, potência e harmônicas. O dispositivo proposto se baseia no CI ADE1913, o qual permite a aquisição simultânea dos sinais de tensão e corrente com 24 bits de resolução. No protótipo desenvolvido, o ADE913 é controlado por meio de um microcontrolador ARM STM32F205RBT6, o qual é responsável também pelo processamento dos dados. A fim de permitir o acesso às medições, foi utilizado um protocolo de comunicação por rádio frequência.

Na Tabela 4 é apresentado um resumo comparativo das principais pesquisas desenvolvidas, destacando os parâmetros calculados e outras características relevantes.

Tabela 4- Quadro comparativo – trabalhos reportados na literatura.

Ano	Pesquisadores	Grandezas medidas	Parâmetros calculados	Cálculo dos parâmetros <i>onboard</i>	Comunicação/ Apresentação dos dados
1988	Mortensen e Johnson	V_a e I_a	DHI	PC	RS232 / PC
2000	Chen <i>et al.</i>	V_a, V_b, V_c, I_a, I_b e I_c	DHT, DHI e afundamentos	PC PXI	PC / interface própria em C++
2006	Wei <i>et al.</i>	V_a, V_b, V_c, I_a, I_b e I_c	Valor eficaz, flutuação, DHT, DHI, flutuação, FD, P e Q.	DSP + PC	PCI / PC
2009	Zhang e Li	V_a e I_a	Valor eficaz, DHT, DHI, S, P, Q, FP	PC	PC / web
2011	Landi <i>et al.</i>	V_a e I_a	Valor eficaz, DHT, DHI, P e Q	ARM STM32	PLC/ web
2013	Li e Lianping	V_a e I_a	DHT, DHI, P, Q e <i>f</i> .	ATT7022	PC
2015	Fonsêca	V_a, V_b, V_c, I_a, I_b e I_c	Valor eficaz, DHT, DHI, S e FP.	CI ADE7880	Zigbee / PC

(continuação)

Ano	Pesquisadores	Grandezas medidas	Parâmetros calculados	Cálculo dos parâmetros onboard	Comunicação/ Apresentação dos dados
2015	Volkers <i>et al.</i>	V_a, V_b, V_c, I_a I_b e I_c	Valor eficaz, DHI, P, Q e S.	ARM STM32	Ethernet e GSM/ <i>web</i>
2016	Medeiros	V_a, V_b, V_c, I_a I_b e I_c	Valor eficaz, DHT, DHI, S, P, Q e FP.	<i>BeagleBone Black</i>	Ethernet / <i>web</i>
2018	Pietrosanto e Paciello	V_a, V_b, V_c, I_a I_b, I_c e I_n	Valor eficaz, DHI, S, P, Q e FP.	ARM STM32	RF
2019	Barbosa	V_a, V_b, V_c, I_a I_b e I_c	Valor eficaz, DHI, DHT, S, F, FD, P, Q e FP.	<i>BeagleBone Black</i>	Ethernet / <i>web</i>

S = potência aparente; P = potência ativa; Q = potência reativa; FP = fator de potência; FD = fator de desbalanceamento; f = frequência; DHT = distorção harmônica total; DHI = distorção harmônica individual.

Fonte: Próprio autor.

Analisando os trabalhos reportados na literatura foi possível constatar, portanto, que os sistemas de medição e monitoramento de energia citados realizam as etapas de processamento dos dados e cálculos dos parâmetros por meio de quatro diferentes tipos de dispositivos: computador, DSP, microcontrolador e Circuito Integrado dedicado. No entanto, a tendência verificada, conforme reportado pelos trabalhos realizados a partir de 2011, é a de substituição do computador pelos demais dispositivos citados anteriormente.

Vale salientar também o uso de circuitos integrados dedicados que, a partir da leitura dos sinais de tensão e corrente, realizam o cálculo de alguns parâmetros *in loco* (LI e LIANPING, 2013; FONSECA, 2015). Embora essa abordagem simplifique a implementação e torne o dispositivo final mais compacto e barato possui a desvantagem de não possuir flexibilidade para a alteração no cálculo dos parâmetros (número de amostras utilizadas, tempo de integralização dos dados, normas atendidas, etc.), para os dispositivos encontrados comercialmente.

Em se tratando da exibição/disponibilização dos dados, predomina o uso do próprio computador ou a sua combinação com um servidor *web*. Para a transmissão dos dados são utilizadas diversas tecnologias: RS232 (MONTENSEN e JOHNSON, 1988), GSM (VOLKERS *et al.*, 2015), *ZigBee* (FONSECA, 2015), *ethernet* (ZHANG E LI, 2009; LANNDI *et al.*, 2011; VOLKERS *et al.*, 2015; MEDEIROS, 2016) e RF (PIETROSANTO E PACIELLO, 2018).

O protótipo apresentado neste trabalho, portanto, constitui-se na concepção de um novo dispositivo de medição, de baixo custo, capaz de estimar com acurácia parâmetros

relacionados à potência e à qualidade da energia elétrica. O protótipo faz uso do CI 90E36A, dedicado à medição de energia, e de um computador de placa única para o processamento dos dados. Esta combinação dá flexibilidade à solução e permite que o dispositivo desenvolvido seja reconfigurável, isto é, facilita a mudança dos algoritmos de cálculos e permite a configuração do medidor conforme as características do ponto de medição.

São estimados os valores de potência ativa, potência reativa e potência aparente, utilizando-se dois métodos distintos, além dos seguintes parâmetros da qualidade da energia elétrica: valor eficaz e valor de pico, frequência, desbalanceamento, distorção harmônica total e distorção harmônica individual até a 50ª ordem.

3.1 CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo, foi realizada uma síntese dos principais trabalhos, reportados na literatura, sobre o desenvolvimento de medidores de energia elétrica voltados à medição de parâmetros de qualidade da energia e potência.

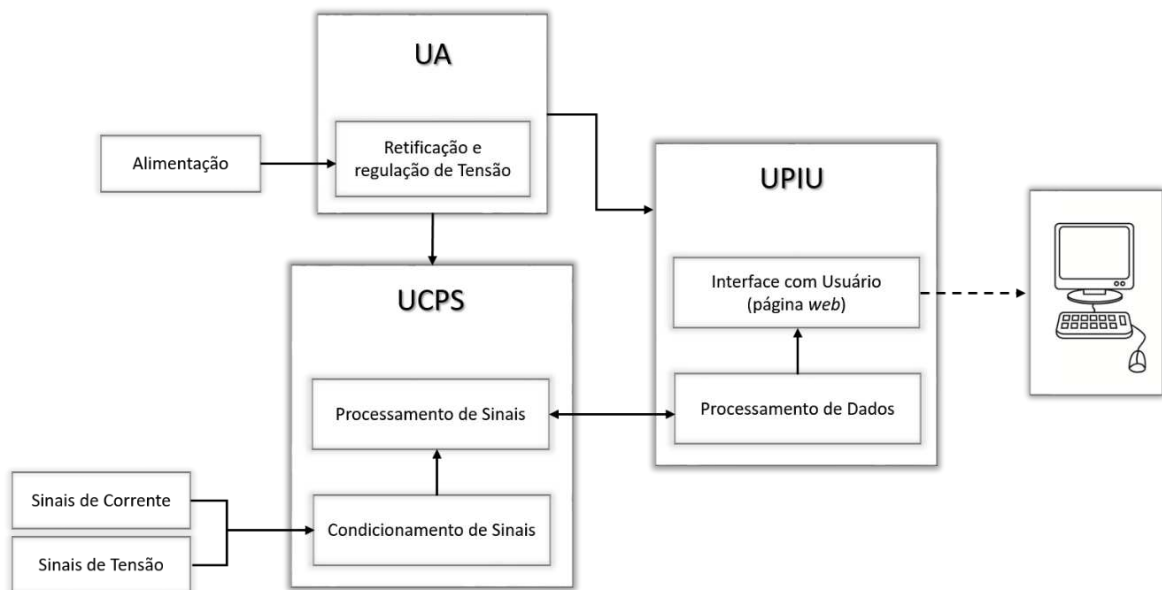
No próximo capítulo, serão apresentados aspectos relacionados ao projeto e à construção do medidor de energia reconfigurável, destacando-se o sistema de aquisição e processamento de dados, os algoritmos de cálculo de parâmetros utilizados e a interface desenvolvida para interação com o usuário.

4 PROCEDIMENTOS CONSTRUTIVOS E COMPUTACIONAIS

Neste capítulo são descritos os procedimentos construtivos e computacionais empregados para o desenvolvimento do medidor de energia elétrica proposto. Destacam-se a arquitetura, a unidade de aquisição e processamento de dados, as expressões utilizadas nos algoritmos de cálculo de parâmetros e a interface desenvolvida para interação com o usuário.

O protótipo foi projetado em três unidades: unidade de alimentação (UA), unidade de condicionamento e processamento de sinais (UCPS) e unidade de processamento de dados e interface com usuário (UPIU), conforme topologia apresentada na Figura 2.

Figura 2- Topologia do protótipo desenvolvido.



Fonte: Próprio autor.

As unidades UA e UCPS são partes físicas do sistema, sensores, amplificadores operacionais, dispositivos de aquisição e processamento de sinais dentre outros componentes eletrônicos. De forma integrada, tais unidades são responsáveis por adequar os níveis de tensão e corrente ao conversor analógico digital do processador de sinais. Já a UPIU é a unidade física responsável pelo gerenciamento do processador de sinais e pela implementação das rotinas computacionais utilizadas pelo protótipo para estimação dos

parâmetros da QEE e potência. A UPIU também conta com um submódulo lógico que corresponde à interface com o usuário (UI). O submódulo UI é composto por uma interface de monitoramento para *web* desenvolvida como ferramenta de interação entre o sistema de aquisição de dados e o usuário. Na página *web* desenvolvida é possível visualizar todos os dados medidos pelo protótipo na forma de gráficos e tabelas.

Na sequência deste capítulo, são apresentadas de maneira detalhada as unidades que compõem o protótipo, bem como as expressões matemáticas utilizadas pela unidade de processamento de dados para estimação dos parâmetros relacionados à QEE e à potência.

4.1 UNIDADE DE AQUISIÇÃO DE SINAIS E PROCESSAMENTO DE DADOS

A unidade que realiza a aquisição dos sinais e o processamento dos dados é baseada em um circuito integrado (CI) medidor de energia e em um computador de placa única. A sua função principal é adquirir as formas de onda das tensões e correntes trifásicas, realizar o processamento local dos dados e disponibilizar via interface *web* os seguintes parâmetros:

- Formas de onda de tensão e corrente;
- Tensão e corrente *RMS*;
- Máximos e mínimos;
- Harmônicas individuais;
- Distorção harmônica total;
- Desbalanceamento;
- Frequência;
- Potências aparente, ativa e reativa;
- Fator de potência.

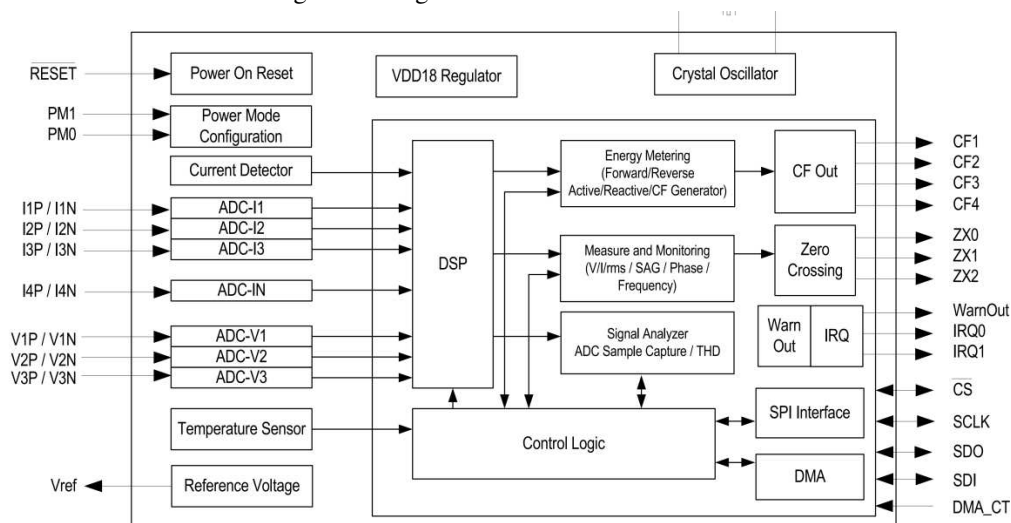
Para realizar a aquisição e o processamento dos sinais de tensão e corrente trifásicos, foi utilizado o circuito integrado 90E36A, desenvolvido pela Atmel®. Para implementar o protocolo de comunicação de dados com o 90E36A, realizar o cálculo dos parâmetros e implementar a interface com o usuário, foi utilizado o computador de placa única *Beaglebone Black*, desenvolvido pela *Beagleboard*®.

4.1.1 CIRCUITO INTEGRADO 90E36A

O circuito integrado 90E36A é um medidor trifásico de alta desempenho utilizado em aplicações de monitoramento de energia e aquisição de sinais elétricos. O 90E36A dispõe de 7 conversores analógicos-digitais (ADC) sigma-delta de segunda ordem, distribuídos em 3 canais de tensão (A, B e C) e 4 canais de corrente (Fases A, B, C e Neutro). No que diz respeito à exatidão de medição, os conversores analógicos-digitais possuem uma resolução de 24 bits e frequência de amostragem de 8 kHz.

Por ser um CI dedicado à medição de energia, o 90E36A apresenta um DSP que permite o processamento de sinais necessários para calcular a potência ativa, reativa e aparente (fundamental e harmônicas), cálculo de valor eficaz, distorções harmônicas totais e individuais até a 32ª harmônica. Permite ainda a identificação de alguns distúrbios relacionados às grandezas calculadas. Na Figura 3 apresenta-se o diagrama de blocos do CI 90E36A.

Figura 3- Diagrama de blocos – 90E36A.



Fonte: Atmel (2017).

A interface do 90E36A com o ambiente externo é feita por meio de comunicação *Serial Peripheral Interface* (SPI). Tal interface permite dois modos de operação: escravo e mestre.

Na configuração de escravo, os registradores do 90E36A podem ser lidos ou escritos por um dispositivo externo a fim de que sejam realizadas as configurações devidas ou a estimativa das grandezas elétricas via DSP interno. Na configuração de mestre, no entanto, o 90E36A habilita o módulo *DMA* (*Direct Memory Access*) e transfere

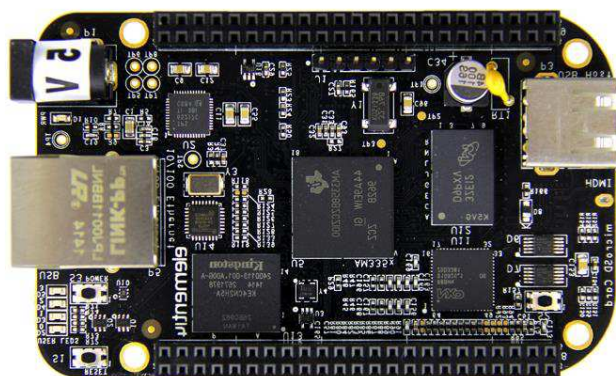
os dados obtidos pelos conversores analógicos-digitais para um dispositivo externo usando a interface SPI. A escolha do modo de operação da interface SPI é realizada por meio do pino *DMA_CT* do 90E36A.

Embora o 90E36A permita a estimação de grandezas elétricas por meio de seu DSP interno, neste trabalho as estimativas não serão utilizadas. Serão implementadas, no entanto, rotinas computacionais que possibilitem o cálculo dos parâmetros relacionados à potência e à qualidade da energia a partir da leitura direta dos conversores analógicos-digitais. Essa abordagem visa dar maior flexibilidade ao protótipo desenvolvido, permitindo o acesso às formas de onda adquiridas e a consequente implementação de rotinas computacionais de cálculo que extrapolam os parâmetros calculados originalmente pelo 90E36A.

4.1.2 BEAGLEBONE BLACK (BBB)

A *Beaglebone Black* é um computador de placa única (*Single Board Computer - SBC*) de *hardware* e *software* livres, isto é, todos os seus códigos, *designs* e componentes estão disponíveis e podem ser alterados por qualquer desenvolvedor. Ela é composta por um processador de 1 GHz (*Texas Instruments Sitara AM335x Cortex A8 ARM*), memória DDR3 de 512MB, *Ethernet*, armazenamento eMMC e suporte de vídeo HDMI. Na Figura 4 é apresentada uma fotografia da BBB.

Figura 4- Fotografia da BBB.



Fonte: Beagleboard (2017).

As principais características da plataforma *BeagleBone* são (MOLLOY, 2015):

- É de baixo custo, podendo ser adquirida entre 45 – 55 Dólares americanos;
- Suporta muitos padrões de interface para dispositivos eletrônicos;

- Consome pouca potência, entre 1 e 2,3 W;
- É expansível por meio de “placas filhas” (*doughterboards*), e dispositivos USB;
- Tem suporte por grande comunidade de inovadores e entusiastas;
- É *open-hardware* e suporta ferramentas e aplicações *open-software*.

Do ponto de vista de *software*, a BBB executa em seu processador principal uma aplicação Linux embarcada responsável pelo controle dos periféricos. No entanto, por meio de duas unidades programáveis em tempo real (PRU) permite a execução de rotinas que necessitem de uma resposta rápida. As PRU são microcontroladores de 32 bits e 200 MHz que podem ser utilizados de modo independente do processador principal e são capazes de criar interrupções em tempo de execução, sendo esta a principal diferença entre este SBC e os demais presentes no mercado.

Os programas para PRU são escritos em *assembly* e precisam ser compilados para arquivo binário para serem executados. A arquitetura da PRU-ICSS (RISC) é relativamente pequena e possui, aproximadamente, 45 instruções que podem ser categorizadas como operações aritméticas, operações lógicas, carregamento e armazenamento do registrador; e controle de fluxo de programa (MOLLOY,2015).

Neste projeto, em particular, as PRU serão utilizadas para realizar a interface entre o sistema operacional Linux responsável pela realização das operações de cálculo e de exibição dos resultados e o circuito integrado 90E36A responsável pela aquisição dos sinais elétricos.

4.2 UNIDADE DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS

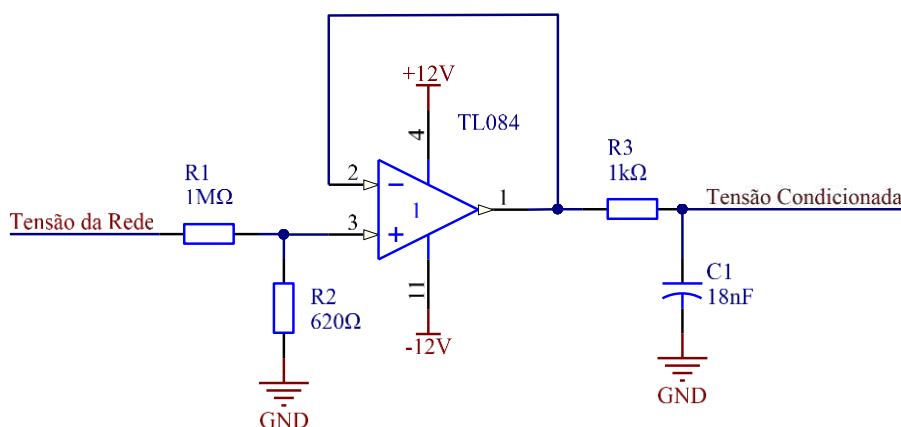
Os sinais provenientes da rede elétrica precisam ser adequados aos níveis de operação permitidos pelos conversores analógico-digitais do 90E36A. Para tanto, foram desenvolvidos circuitos de condicionamento para os sinais de tensão de cada uma das fases (A, B e C) e para os sinais de corrente das fases.

4.2.1 CONDICIONAMENTO DOS SINAIS DE TENSÃO

A amplitude máxima dos sinais suportados pelos conversores analógico-digitais do 90E36A é de $\pm 0,30$ V, portanto, faz-se necessária a adequação dos sinais provenientes da rede elétrica a fim de medi-los. Além de atenuar o sinal de entrada, o circuito de condicionamento de sinais também deve propiciar uma saída de baixa impedância para a entrada do filtro passa-baixas utilizados para a atenuação de componentes de frequência indesejáveis.

Na Figura 5 é apresentado o diagrama do circuito de condicionamento dos sinais de tensão desenvolvido.

Figura 5- Circuito de condicionamento de sinais de tensão.



Fonte: Próprio autor.

O circuito de condicionamento dos sinais de tensão desenvolvido realiza a atenuação de um sinal de 220 V, com picos de $\pm 311,12$ V, de forma a se obter em sua saída um sinal com amplitude de $\pm 0,19$ V. Assim, dispõem-se ainda de uma faixa de segurança para variações de amplitude da tensão de entrada.

4.2.2 CONDICIONAMENTO DOS SINAIS DE CORRENTE

Antes da etapa de condicionamento é necessário fazer a aquisição dos sinais de corrente. Existem diversas maneiras de adquirir corrente, dentre as quais pode-se citar, o uso de resistores *shunt*, transformadores de corrente (TC), bobinas de Rogowski e sensores baseados no efeito Hall. Neste projeto, optou-se por utilizar o transformador de corrente SCT013 para medição de corrente, por ser não invasivo, possuir característica

linear dentro da faixa de medição empregada e ser largamente empregado em medidores de potência. O SCT013 permite a transformação de correntes primárias da ordem de 5A a 100A para correntes secundárias de 50 mA, dependendo do modelo utilizado. Na Figura 6, apresenta-se uma fotografia ilustrativa do sensor de corrente utilizado.

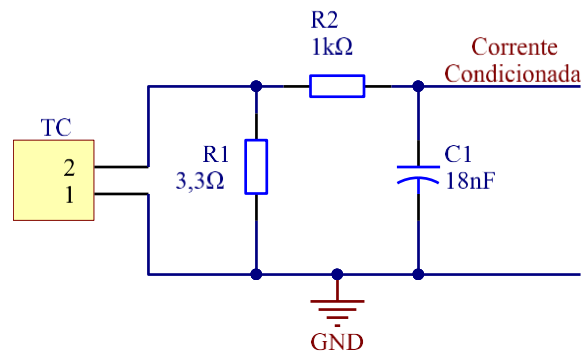
Figura 6- Sensor de corrente SCT013.



Fonte: Filipeflop (2017).

Para o condicionamento dos sinais de corrente oriundos do SCT013, por sua vez, foi utilizado o circuito sugerido pelo *datasheet* do 90E36A cujo diagrama é apresentado na Figura 7.

Figura 7- Circuito de condicionamento de sinais de corrente.



Fonte: Próprio autor.

Sabendo que a corrente máxima de saída do TC é de $50 \text{ mA}_{\text{rms}}$, o resistor de $3,3 \Omega$ proporciona uma saída máxima do condicionador de corrente seja de $165 \text{ mV}_{\text{rms}}$ com pico de $233,34 \text{ mV}$.

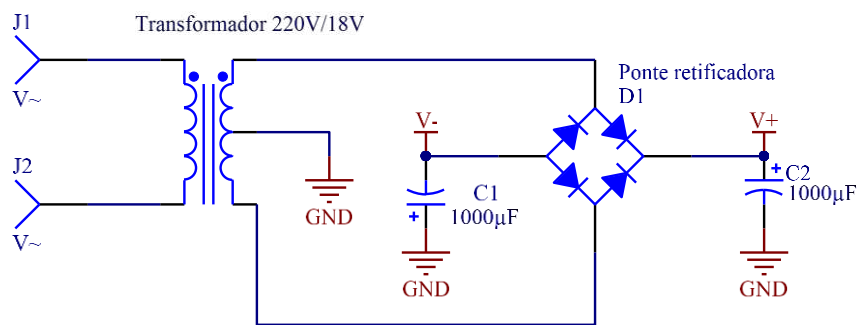
Como os canais do 90E36A são diferenciais, as saídas dos condicionadores foram colocadas nas entradas positivas dos canais *ADC* e as entradas negativas foram aterradas.

4.3 UNIDADE DE ALIMENTAÇÃO

A unidade de alimentação consiste em circuitos destinados a adequar a tensão proveniente da rede elétrica para alimentação dos circuitos que compõem o protótipo desenvolvido.

A tensão proveniente da rede com valor eficaz de 220 V é atenuada por meio de um transformador abaixador isolado com relação de 220V/18V. Após atenuada, a tensão é retificada por uma ponte de diodos e filtrada por capacitores, de acordo com a Figura 8.

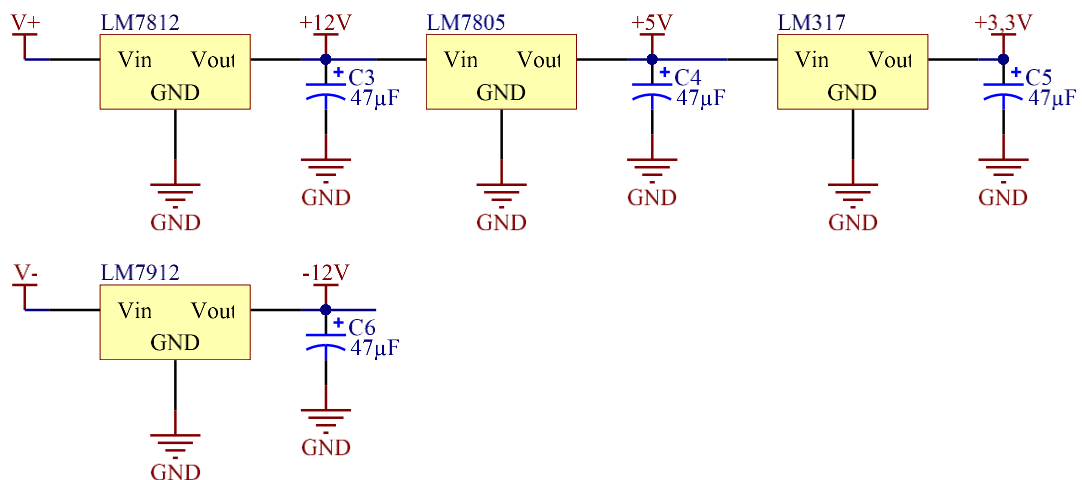
Figura 8- Circuito de retificação e eliminação de ondulação.



Fonte: Próprio autor.

Depois da retificação e da filtragem, foram utilizados reguladores de tensão a fim de obter tensões de +/-12 V, +5 V e 3,3 V, contínuas. Para tanto, foram utilizados os reguladores LM7812, LM7912, LM7805 e LM317. O circuito de regulação de tensão é ilustrado pela Figura 9.

Figura 9- Circuito de retificação e eliminação de ondulação.



Fonte: Próprio autor.

4.4 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE QEE E POTÊNCIA

Nas subseções seguintes, apresenta-se as equações empregadas pelo protótipo desenvolvido para o cálculo dos parâmetros relacionados à qualidade da energia e à potência.

4.4.1 CÁLCULO DO VALOR EFICAZ

O valor eficaz de um sinal elétrico corresponde ao valor de tensão/corrente que produz a mesma energia de uma fonte de tensão/corrente CC. Ele pode ser determinado como a raiz quadrática do valor médio do sinal ao quadrado (NILSSON e RIEDEL, 2009). Então, o valor eficaz (Y_{RMS}), do sinal $y(t)$, de período T é determinado por:

$$Y_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} y(t)^2 dt}. \quad (1)$$

A Expressão (1) possibilita o cálculo do valor eficaz de um sinal periódico qualquer, inclusive quando há distorção harmônica. Assim, denomina-se tal valor com eficaz verdadeiro (do inglês *true RMS*).

Em se tratando, no entanto, do cálculo do valor eficaz a partir de N amostras de valores discretos obtidas a partir de um sinal contínuo, como ocorre em dispositivos digitais, a Expressão (1) pode ser reescrita conforme apresentado na Equação (2).

$$Y_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2}. \quad (2)$$

Neste trabalho, foi desenvolvida e implementada uma rotina computacional baseada na Equação (2) para cálculo do valor eficaz das grandezas elétricas trifásicas analisadas.

4.4.2 ESTIMAÇÃO DA FREQUÊNCIA

Na literatura existem diversos métodos para a estimação da frequência. Em geral, os métodos são baseados na Transformada Discreta de Fourier, no Método dos Mínimos Quadrados, nos filtros de Kalman, no PLL (*Phase Locked Loop*) ou na passagem do sinal de tensão por zero.

O uso da detecção pelo cruzamento por zero e o cálculo do número de ciclos que ocorrem em um determinado intervalo de tempo (PHADKE *et al.*, 1983) é uma metodologia simples e bem conhecida. Muitos aprimoramentos e variações foram sugeridos, a fim de melhorar sua exatidão, tais como os propostos por Friedman (1994) e o apresentado por Vainio e Ovaska (1995).

Neste trabalho uma adaptação do método de cruzamento por zero, descrito pela IEC 61000-4-30 (2015), foi utilizado para a estimação da frequência. Neste sentido, pelo fato de não haver variações frequentes do seu valor, a frequência fundamental foi estimada a cada 1 s.

4.4.3 ANÁLISE HARMÔNICA

Os níveis de distorção harmônica podem ser caracterizados pelo espectro harmônico completo, com amplitudes e ângulos de fase de cada componente harmônica individual. Eles também podem ser caracterizados por uma quantidade única, a distorção harmônica total, para se medir a amplitude da distorção harmônica. A Distorção Harmônica Total de tensão (DHT) e a distorção harmônica individual de tensão de ordem h (DHI_h) são calculadas pelas seguintes expressões:

$$DHI_h = \frac{V_h}{V_1} \times 100, \quad (3)$$

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}} V_h^2}}{V_1}, \quad (4)$$

em que V_1 , V_h e $h_{m\acute{a}x}$ são, respectivamente, tensão fundamental medida, tensão harmônica de ordem h e ordem harmônica máxima.

A determinação das componentes espectrais de frequência de um sinal, denominada de análise espectral, pode ser realizada utilizando-se diversos métodos dentre os quais se destacam os algoritmos baseados na Transformada Rápida de Fourier (em inglês *Fast Fourier Transform* ou FFT). FFT é uma forma eficiente para se calcular a Transformada Discreta de Fourier (DFT) e a sua inversa. A Transformada de Fourier é a ferramenta preconizada pela norma IEC 61.000-3-2 para análises de distorções harmônicas.

Pelo fato de ser uma transformada largamente aplicada e por existir vasta literatura, incluindo algoritmos e rotinas em várias linguagens de programação, optou-se pelo uso da FFT na implementação das rotinas computacionais utilizadas pelo protótipo desenvolvido para análise espectral.

Seja, portanto, $x(t)$ um sinal no domínio do tempo, ao ser amostrado com um intervalo de amostragem T , com N amostras, a sua representação pode ser feita por $x(m)$, em que $m = 0, 1, 2, \dots, N-1$, e a transformação para o domínio frequência pode ser feita por meio da DFT, definida pela Equação (5):

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(m) \cdot W^{mk}, \quad (5)$$

para $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ e $W^{mk} = e^{-j2\pi/N}$.

O uso da DFT, no entanto, torna-se inviável em aplicações de tempo real (TOMPKINS E WEBSTER, 1981), uma vez que possui complexidade computacional $O(N)^2$. Para contornar tal situação, em 1965 foi desenvolvida uma forma mais rápida de implementar a transformada de Fourier com complexidade $O(N \log_2 N)$, a qual recebeu o nome de transformada rápida de Fourier. A FFT consiste em dividir o vetor de amostras de entrada em subsequências curtas que são submetidas à DFT. Muitos algoritmos de FFT realizam os cálculos modificando diretamente o vetor de amostras, e necessitam que o tamanho do vetor seja uma potência de 2.

4.4.4 ESTIMAÇÃO DE DESBALANCEAMENTO

Para o cálculo do fator de desequilíbrio de tensão FD , conforme apresentado na Equação (6), utiliza-se a relação entre as amplitudes das componentes de sequência positiva V_{pos} e de sequência negativa V_{neg} verificadas no sistema elétrico.

$$FD = \frac{|V_{neg}|}{|V_{pos}|} 100. \quad (6)$$

Para o cálculo do desequilíbrio, a aplicação do método das componentes simétricas apresenta o inconveniente de que os sistemas de medição precisam possuir *hardware* apropriado para mensurar o ângulo de fase das tensões (LIMA, 2017). Não sendo satisfeita essa condição, alguns métodos alternativos podem ser empregados. O método alternativo para cálculo do fator desequilíbrio designado pela ANEEL é dado por:

$$FD = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}, \quad (8)$$

em que V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} são as tensões de linha do sistema.

Neste trabalho, foi desenvolvida e implementada uma rotina computacional baseada nas Equações (7) e (8) para cálculo do fator de desbalanceamento.

4.4.5 ESTIMAÇÃO DA POTÊNCIA

A partir da aquisição dos sinais de tensão e de corrente em uma carga alimentada por corrente alternada, torna-se possível a determinação das potências aparente, ativa e reativa, além do fator de potência associado. Nesse sentido, a potência aparente S pode ser calculada diretamente pela Equação (9), na qual V e I correspondem aos valores *RMS* dos sinais de tensão e de corrente.

$$S = V \cdot I. \quad (9)$$

A potência ativa P é definida, em tempo discreto, como a média do somatório do produto da corrente pela tensão, em que N é o número de amostras utilizadas, conforme indica a Expressão (10)

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} V[n] \cdot I[n]. \quad (10)$$

A partir do cálculo da potência aparente e da potência ativa é possível a determinação da potência reativa (Q) por meio da Equação (11),

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (11)$$

O cálculo do fator de potência FP , considerando os sistemas lineares, isto é, com formas de ondas senoidais, é dado por

$$FP = \cos \phi = \frac{P}{S}, \quad (12)$$

em que ϕ é a defasagem entre os sinais de tensão e de corrente considerados.

Em se tratando de sistemas trifásicos a quatro fios, as potências ativa, reativa e aparente totais, respectivamente, são dadas por

$$P_{TOTAL} = P_A + P_B + P_C, \quad (13)$$

$$Q_{TOTAL} = Q_A + Q_B + Q_C, \quad (14)$$

$$S_{TOTAL} = S_A + S_B + S_C, \quad (15)$$

em que P_{TOTAL} , Q_{TOTAL} e S_{TOTAL} correspondem, respectivamente, às potências ativa, reativa e aparente totais, quando consideradas as fase A , B e C .

O protótipo desenvolvido efetua o cálculo para cada uma das fases do sistema separadamente conforme as Expressões (13), (14) e (15). A potência ativa é calculada via média da potência instantânea, a potência aparente é computada via valores eficazes de tensão e corrente, e a potência reativa é obtida segundo a definição clássica do triângulo de potências.

Em se tratando da estimação de potência em sistemas com características fortemente não lineares, a teoria tradicional de potências, desenvolvida para sinais senoidais, mostra-se inadequada. Diversas teorias de cálculo de potência elétrica têm sido

propostas, entretanto, ainda não há uma proposta que seja totalmente aceita e difundida, sendo na realidade um tema controverso (COELHO, 2018).

Dentre os principais métodos empregados para cálculo de potência em condições não senoidais, destaca-se o método desenvolvido por Willems (1992). O trabalho desenvolvido por Willems propõem uma interpretação diferente da decomposição de potência em sistemas trifásicos distorcidos.

Os valores instantâneos de tensão e corrente agrupados em vetores, respectivamente, são dados por \mathbf{V} e \mathbf{I} , com dimensão m igual ao número de fases do sistema. A potência instantânea trifásica é expressa pelo produto escalar entre \mathbf{V} e \mathbf{I} , isto é,

$$s = \mathbf{V}^T \cdot \mathbf{I}, \quad (16)$$

na qual \mathbf{V}^T representa a matriz transporta do vetor \mathbf{V} .

É definido que \mathbf{I}_p é a projeção do vetor \mathbf{I} sobre o vetor \mathbf{V} . Por definição, o vetor \mathbf{I}_p é proporcional ao vetor \mathbf{V} , isto é,

$$\mathbf{V}^T \cdot \mathbf{I} = \mathbf{V}^T \cdot \mathbf{I}_p, \quad (17)$$

em que \mathbf{I}_p é definido como *corrente ativa instantânea*. Assim,

$$\mathbf{I}_p = \frac{\mathbf{V}^T \cdot \mathbf{I}}{\|\mathbf{V}\|^2} \mathbf{V} = \frac{s}{\|\mathbf{V}\|^2} \mathbf{V}. \quad (18)$$

A corrente obtida pela diferença:

$$\mathbf{I}_q = \mathbf{I} - \mathbf{I}_p, \quad (19)$$

é denominada como *corrente não-ativa instantânea* (ou corrente reativa instantânea) e é ortogonal a \mathbf{V} , isto é,

$$\mathbf{V}^T \cdot \mathbf{I}_q = 0. \quad (20)$$

A corrente \mathbf{I}_p , portanto, está associada à parcela da energia efetivamente transformada em trabalho, enquanto o vetor \mathbf{I}_q está associada à parcela da energia de

acoplamento entre fontes e cargas, energia reativa. Portanto, a potência ativa instantânea é obtida por:

$$p = V \cdot I_p, \quad (21)$$

e a potência reativa instantânea é definida como o vetor resultando do produto vetorial dado por:

$$q = V \times I_q. \quad (22)$$

O trabalho desenvolvido por Willems possui a grande vantagem de utilizar fundamentalmente variáveis instantâneas de tensão e corrente. Esse aspecto se traduz em um equacionamento mais simples e de melhor entendimento, quando comparado com outros métodos de cálculo de potência em condições não senoidais.

O protótipo desenvolvido também implementa o método de cálculo desenvolvido por Willems (1992) a fim de permitir uma análise comparativa entre os dois métodos supracitados.

4.5 INTERFACE COM O USUÁRIO

A fim de possibilitar a interação do usuário com o sistema de aquisição de dados, foi desenvolvida uma aplicação *web* nas linguagens de programação HTML e PHP. A aplicação contém páginas que permitem a visualização das formas de onda dos sinais medidos e dá acesso a tabelas contendo informações tais como valores eficazes, mínimos e máximos, desbalanceamento, frequência, harmônicos individuais e totais, além de potência. A aplicação encontra-se hospedada na própria *Beaglebone Black* e pode ser acessada via rede de computadores.

4.6 CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo foi apresentada uma proposta de medidor de energia, destacando-se sua arquitetura, a unidade de aquisição e processamento de dados, os algoritmos de cálculo de parâmetros utilizados e a interface desenvolvida para interação com o usuário.

No próximo capítulo serão expostos e discutidos os resultados obtidos a partir de testes laboratoriais realizados no protótipo desenvolvido, bem como a análise comparativa entre o protótipo e um analisador de energia comercial.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são expostos e discutidos os resultados obtidos a partir de testes laboratoriais realizados no protótipo desenvolvido. Para analisar a acurácia das grandezas medidas pelo protótipo, foi realizada uma comparação com um analisador de qualidade da energia comercial (AQEE), determinando-se as incertezas obtidas nas medições, quando comparadas. Para tanto, foram comparados os níveis de similaridade das formas de onda de tensão e corrente adquiridos, bem como os valores de tensão e corrente, coeficientes harmônicos, potência, frequência e desbalanceamento medidos.

5.1 TESTES DO PROTÓTIPO EM LABORATÓRIO

Com o objetivo de determinar as incertezas das medições efetuadas pelo protótipo desenvolvido, foram realizados testes em laboratório utilizando cargas de natureza linear e não linear. No primeiro teste, utilizou-se como carga um conjunto de lâmpadas incandescentes de 100W. Já no segundo teste, foi utilizado um conjunto de lâmpadas fluorescentes compactas de 45W como carga. Em ambos os testes, os dados medidos e obtidos com o protótipo desenvolvido foram comparados com os resultados obtidos a partir de um AQEE, da marca *Electro Industries*®, modelo *Nexus 1500*. O AQEE utilizado é homologado e se encontrava calibrado.

Para a alimentação das cargas, foi utilizada uma fonte de tensão programável, marca *California Instruments*®, modelo 3000Lx, com parâmetros de amplitude, frequência, tensão e harmônicos que pudessem ser controlados e apresentassem valores confiáveis e estáveis. A tensão de alimentação foi composta com harmônicas de amplitude e fase acordo com a Tabela 5. As combinações de harmônicas foram baseadas no trabalho de Fonsêca (2015), cujos valores são, de forma aproximada, tipicamente encontrados em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Tabela 5- Composição das harmônicas para a tensão de alimentação nas fases.

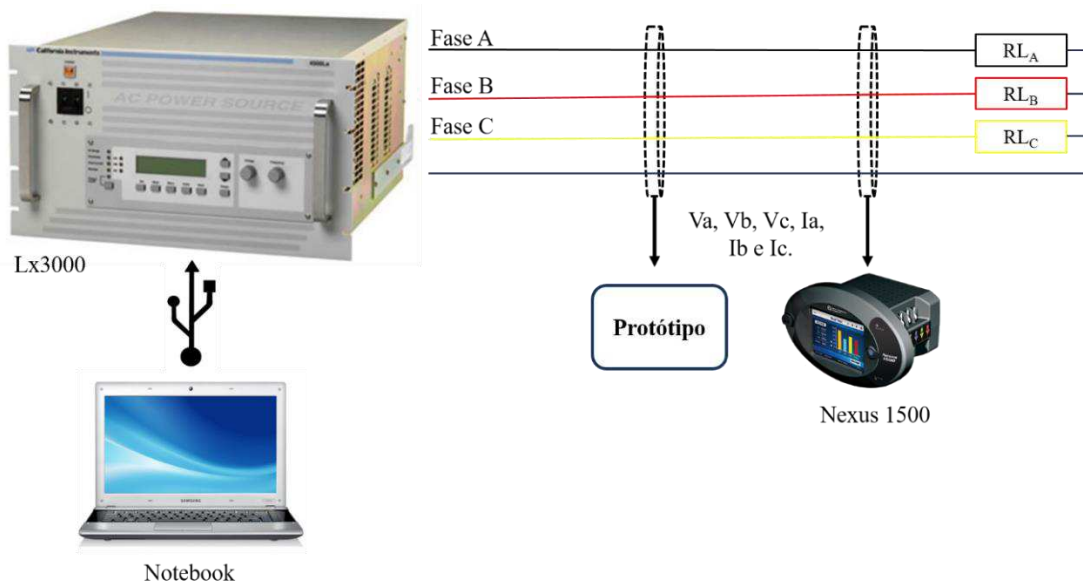
Harmônica	Fases A e C		Fase B	
	Amplitude (V)	Fase (°)	Amplitude (V)	Fase (°)
1	220,0	0	220,0	0
3	2,0	86	4,0	86
5	2,9	168	5,8	168
7	0,3	-49	0,6	-49
9	0,6	160	1,2	160
11	0,5	173	1,0	173
13	0,2	-1	0,4	-1
15	0,1	86	0,2	86

Fonte: Adaptado de Fonsêca (2015).

O qualímetro, utilizado como medidor de referência, foi instalado/posicionado em paralelo com o protótipo durante os testes experimentais.

O arranjo experimental utilizado para a validação do protótipo é ilustrado pela Figura 10.

Figura 10- Arranjo experimental utilizado para testes do protótipo em laboratório.

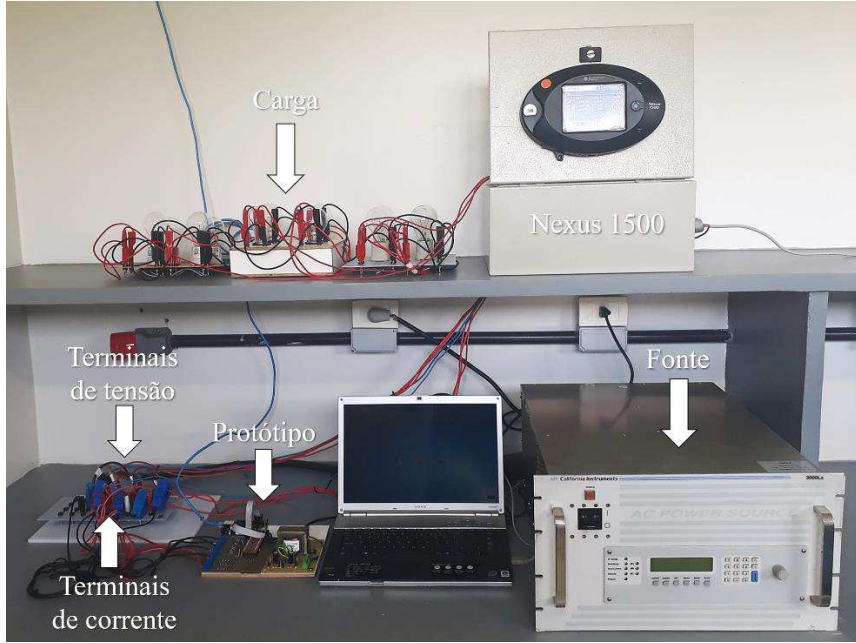


Fonte: Próprio autor (2018).

5.2 TESTES COM CARGA LINEAR

Para avaliar o desempenho do protótipo desenvolvido frente a cargas com fator de potência elevado e baixa distorção harmônica, foi realizado um teste experimental com lâmpadas incandescentes. O arranjo experimental utilizado é ilustrado pela Figura 11.

Figura 11– Teste experimental com carga resistiva.



Fonte: Próprio autor

Os dados obtidos tanto pelo AQEE quanto pelo protótipo desenvolvido foram exportados para o *Matlab*®, no qual as análises foram feitas. A comparação entre os sinais adquiridos pelo protótipo e pelo qualímetro se deu por meio da análise dos valores de pico (máximo e mínimo) e do grau de correlação das formas de onda. Para a comparação entre os valores de pico, foram utilizadas as médias das amplitudes máximas e mínimas verificadas dentro de uma janela de medição de 12 ciclos.

Considerando a necessidade de se comparar os sinais adquiridos pelo AQEE com os sinais adquiridos pelo protótipo, foi utilizado como métrica de comparação o coeficiente de determinação R^2 , que é dado determinado pela expressão

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad (23)$$

na qual,

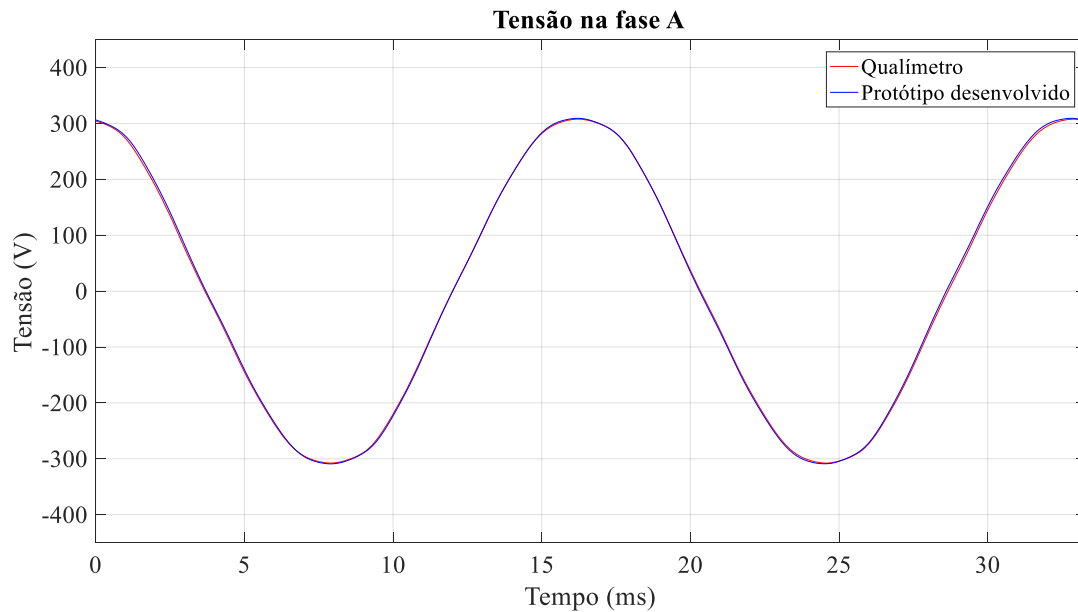
$$SSE = \sum_{h=1}^k [s_m(h) - s(h)]^2 \text{ e } SST = \sum_{h=1}^k [s_m(h) - \bar{s}_m]^2, \quad (24)$$

em que, $s_m(h)$ e $s(h)$ são os valores obtidos pelo AQEE e pelo protótipo, respectivamente; k é o número de amostras; \bar{s}_m é o valor médio do sinal do AQEE.

Para a realização de análises comparativas entre as formas de onda adquiridas pelo protótipo e as formas de onda adquiridas pelo qualímetro é necessário que os sinais

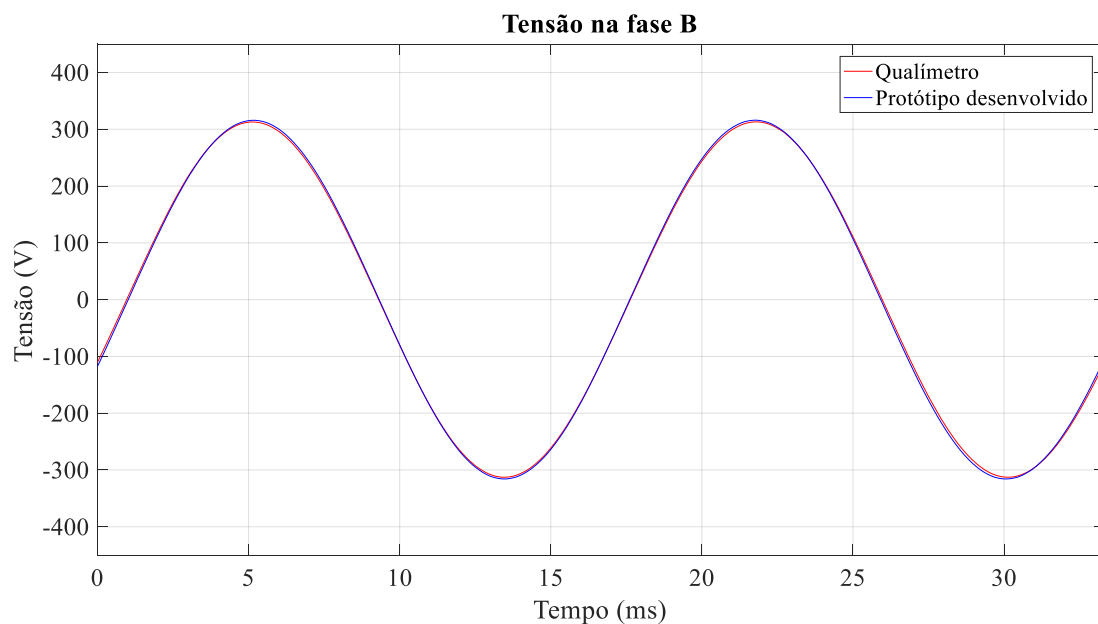
adquiridos não tenham defasagem temporal. Neste sentido, por se tratar de sinais periódicos, nos quais não há variação de carga, os sinais de tensão e de corrente adquiridos por ambos os dispositivos foram deslocados no tempo e sobrepostos no *Matlab*. As formas de ondas das tensões obtidas nas fases A, B e C podem ser observadas, respectivamente, nas Figuras 12 a 14.

Figura 12 – Formas de onda das tensões na fase A obtidas pelo protótipo e pelo qualímetro.



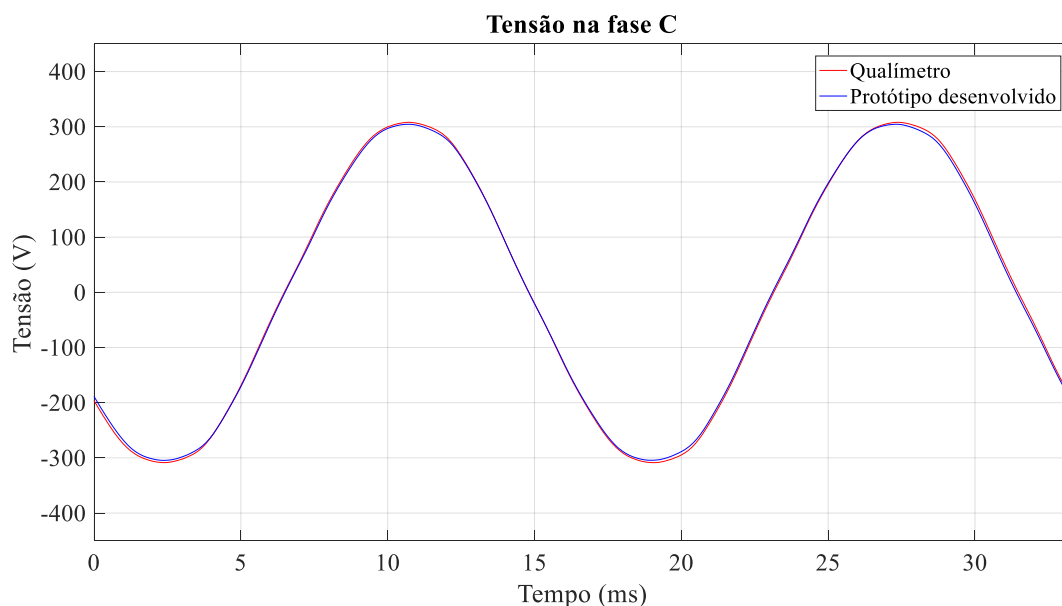
Fonte: Próprio autor.

Figura 13 – Formas de onda das tensões na fase B obtidas pelo protótipo e pelo qualímetro.



Fonte: Próprio autor.

Figura 14 – Formas de onda das tensões na fase C obtidas pelo protótipo e pelo qualímetro.



Fonte: Próprio autor.

Comparando-se os sinais de tensão adquiridos pelo protótipo em relação ao AQEE, foram obtidos desvios percentuais entre os valores de pico inferiores a 0,8% e coeficientes de correlação entre as formas de onda superiores a 0,999. Os desvios percentuais e os coeficientes de correlação entre as formas de onda de tensão calculados, para as três fases, são expressos na Tabela 6.

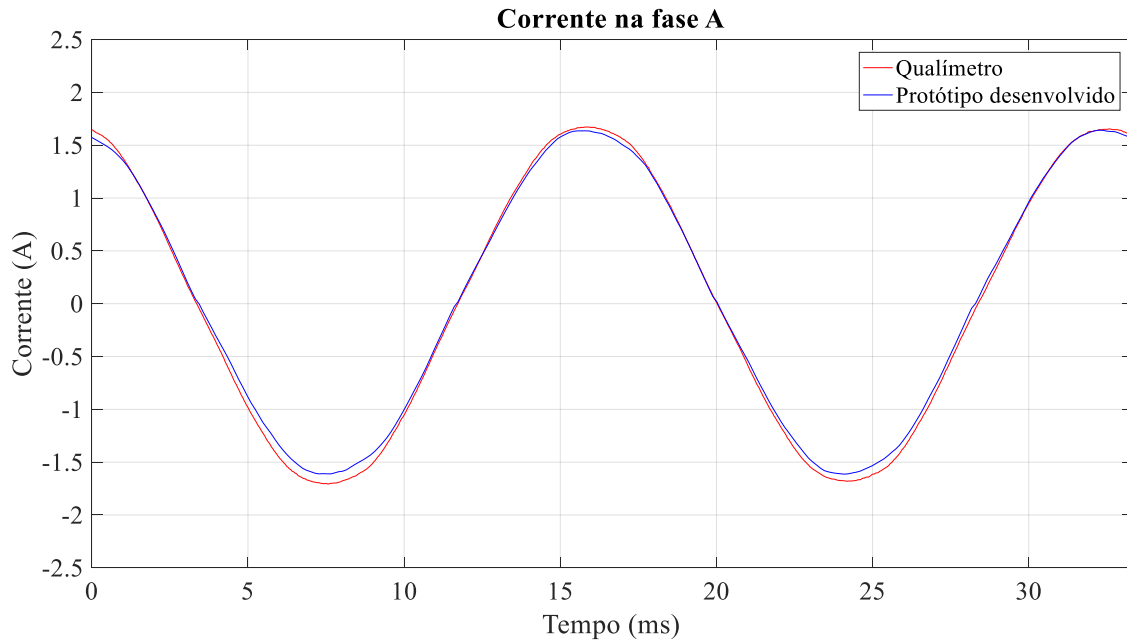
Tabela 6-Desvios percentuais e coeficientes de correlação inerentes às formas de onda de tensão.

	Grandeza	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Fase A	Tensão de Pico Positiva (V)	307,6250	306,8167	0,2628
	Tensão de Pico Negativa (V)	-307,7667	-305,8667	0,6174
	Coef. Correlação Formas de Onda		0,9991	
Fase B	Tensão de Pico Positiva (V)	313,0500	310,8333	0,7081
	Tensão de Pico Negativa (V)	-312,6683	-310,5500	0,6775
	Coef. Correlação Formas de Onda		0,9994	
Fase C	Tensão de Pico Positiva (V)	308,0667	306,6333	0,4653
	Tensão de Pico Negativa (V)	-308,7000	-306,4667	0,7235
	Coef. Correlação Formas de Onda		0,9993	

Fonte: Próprio autor.

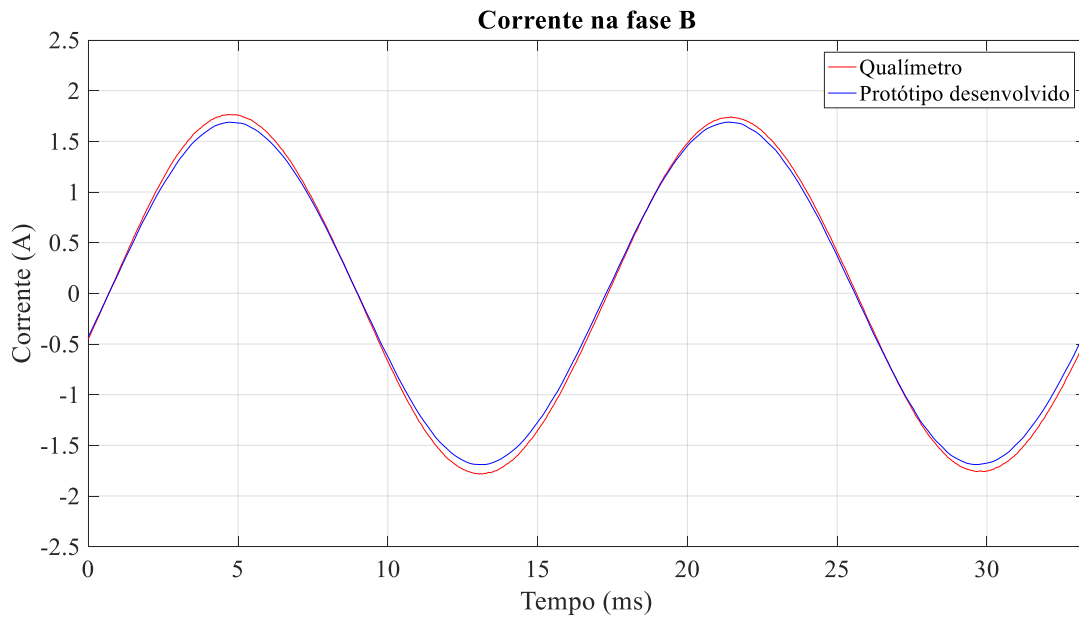
Analogamente, foram comparados os sinais de correntes adquiridos. Nos gráficos das Figuras 15 a 17, expõem-se as formas de onda de corrente obtidas com o protótipo desenvolvido e com o AQEE para as três fases analisadas.

Figura 15 – Formas de onda das correntes na fase A obtidas pelo protótipo e pelo qualímetro.



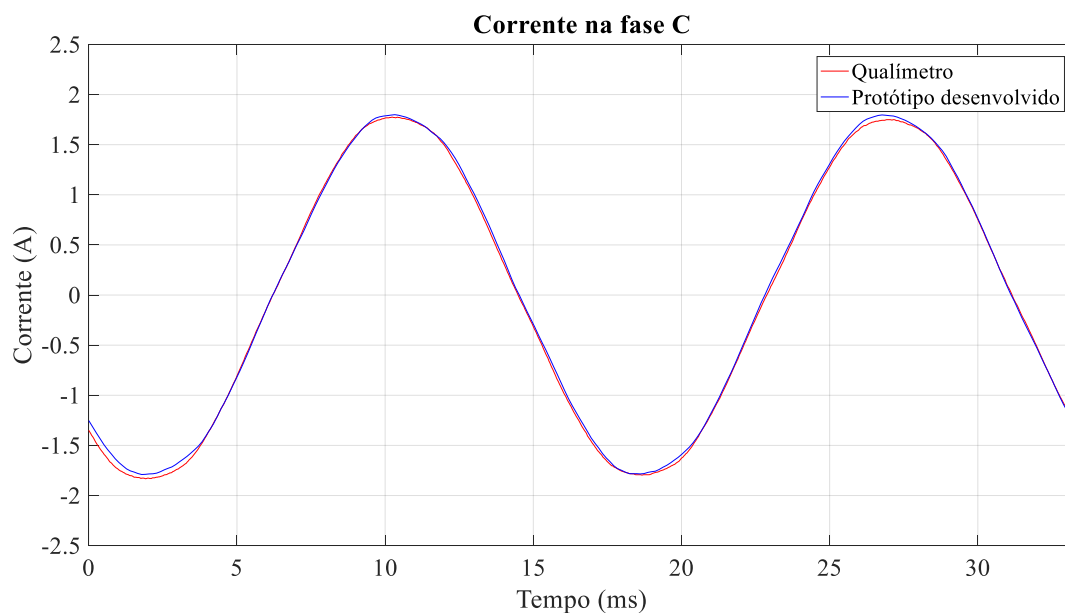
Fonte: Próprio autor.

Figura 16 – Formas de onda das correntes na fase B obtidas pelo protótipo e pelo qualímetro.



Fonte: Próprio autor.

Figura 17 – Formas de onda das correntes na fase C obtidas pelo protótipo e pelo qualímetro.



Fonte: Próprio autor.

Comparando-se os sinais de corrente adquiridos pelo protótipo em relação ao AQEE, foram obtidos desvios percentuais entre os valores de pico inferiores a 3,2% e coeficientes de correlação entre as formas de onda superiores a 0,997. Na Tabela 7, são expostos os desvios percentuais e os coeficientes de correlação entre as formas de onda obtidos na avaliação das formas de onda de corrente.

Tabela 7-Desvios percentuais e coeficientes de correlação inerentes às formas de onda das correntes medidas na fase A.

	Grandeza	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Fase A	Corrente de Pico Positiva (A)	1,6505	1,6407	0,5958
	Corrente de Pico Negativa (A)	-1,6643	-1,6125	3,1144
	Coef. Correlação Formas de Onda		0,9974	
	Grandeza	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Fase B	Corrente de Pico Positiva (A)	1,7057	1,6895	0,9478
	Corrente de Pico Negativa (A)	-1,7335	-1,6908	2,4661
	Coef. Correlação Formas de Onda		0,9973	
	Grandeza	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Fase C	Corrente de Pico Positiva (A)	1,7424	1,7970	3,1336
	Corrente de Pico Negativa (A)	-1,7575	-1,7845	1,5363
	Coef. Correlação Formas de Onda		0,9993	

Fonte: Próprio autor.

As serem comparados os resultados obtidos nas Tabela 5 e 6 se verifica que os desvios percentuais obtidos na medição dos sinais de corrente foram superiores aos obtidos para os sinais de tensão.

Na sequência, realizou-se uma análise comparativa entre os valores eficazes obtidos a partir do protótipo e do qualímetro. Para tanto, foram comparadas as médias dos valores eficazes obtidos em dez medições consecutivas. Os desvios percentuais calculados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8- Análise comparativa dos valores eficazes.

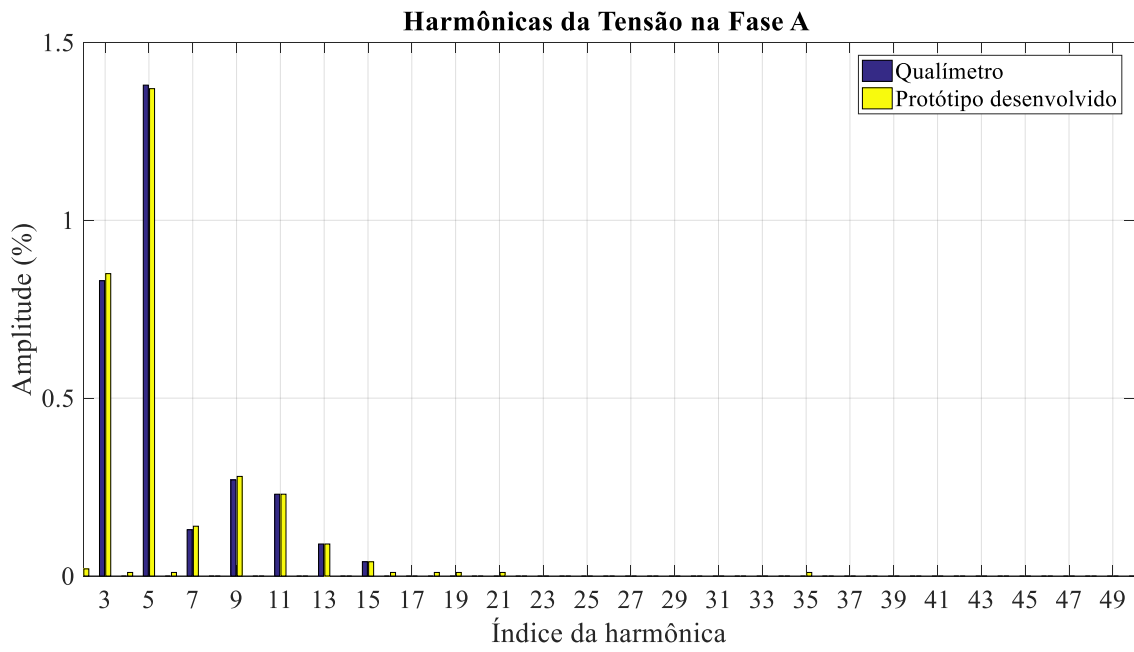
Grandeza	Fase (s)	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Tensão (V)	A	220,14	221,45	0,60
	B	220,20	221,37	0,53
	C	220,15	219,46	0,31
	AB	382,48	383,49	0,26
	BC	381,20	381,52	0,08
	CA	379,99	382,05	0,54
Corrente (A)	A	1,16	1,15	0,86
	B	1,20	1,18	1,67
	C	1,25	1,28	2,40

Fonte: Próprio autor.

Os desvios percentuais obtidos na medição de corrente, conforme apresentados na Tabela 8, mostraram-se superiores aos desvios obtidos para a medição de tensão. No entanto, em ambos os casos, os desvios calculados em relação ao medidor de referência foram inferiores a 2,50%.

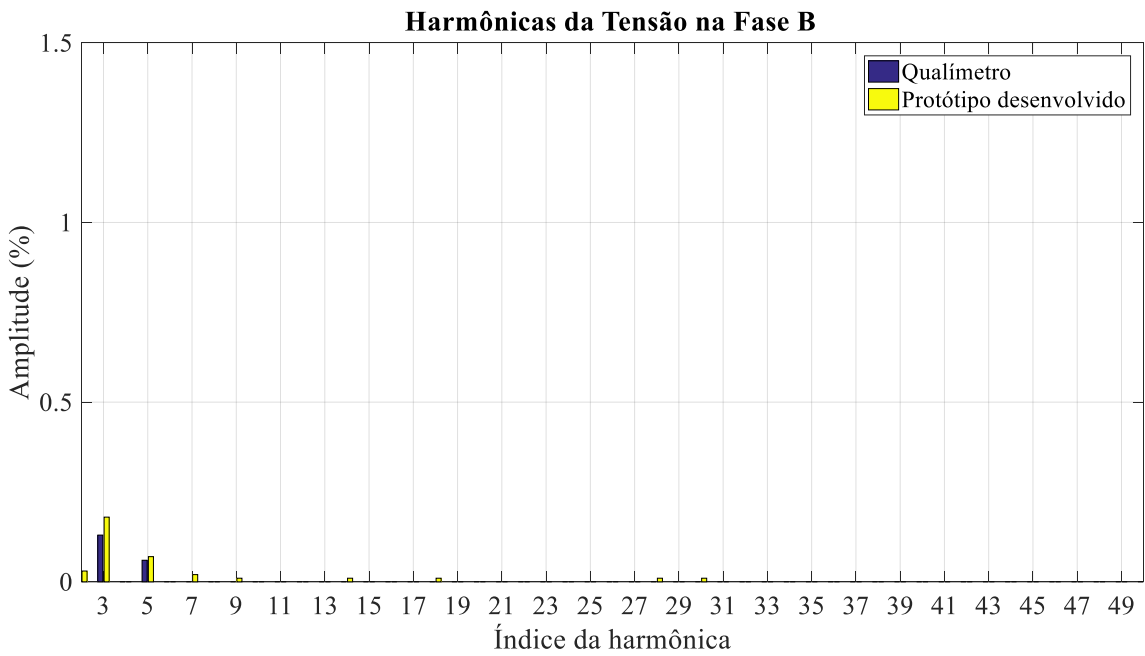
As medições das harmônicas individuais de corrente e de tensão e a distorção harmônica total em cada uma das fases foram comparadas. Atendendo à exigência da ANEEL para monitoramento de harmônicos na rede elétrica, foram consideradas as harmônicas até a 50ª ordem. Nas Figuras 18 a 23 são apresentados os gráficos com as amplitudes, em valores percentuais, das harmônicas das tensões e das correntes medidas.

Figura 18 – Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase A.



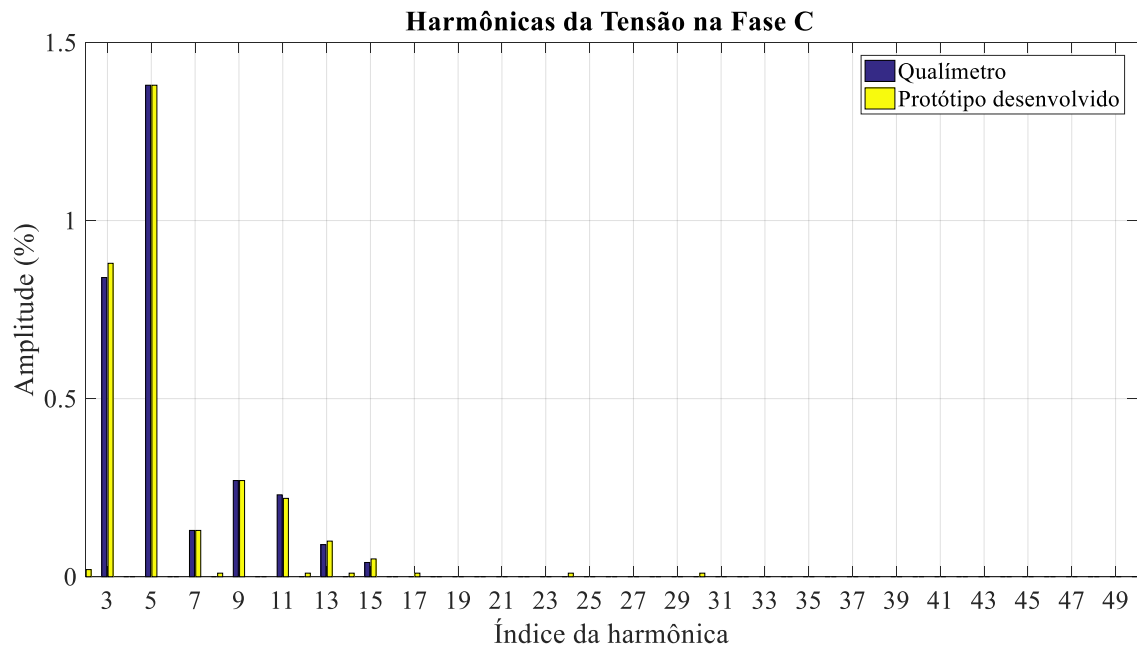
Fonte: Próprio autor.

Figura 19 – Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase B.



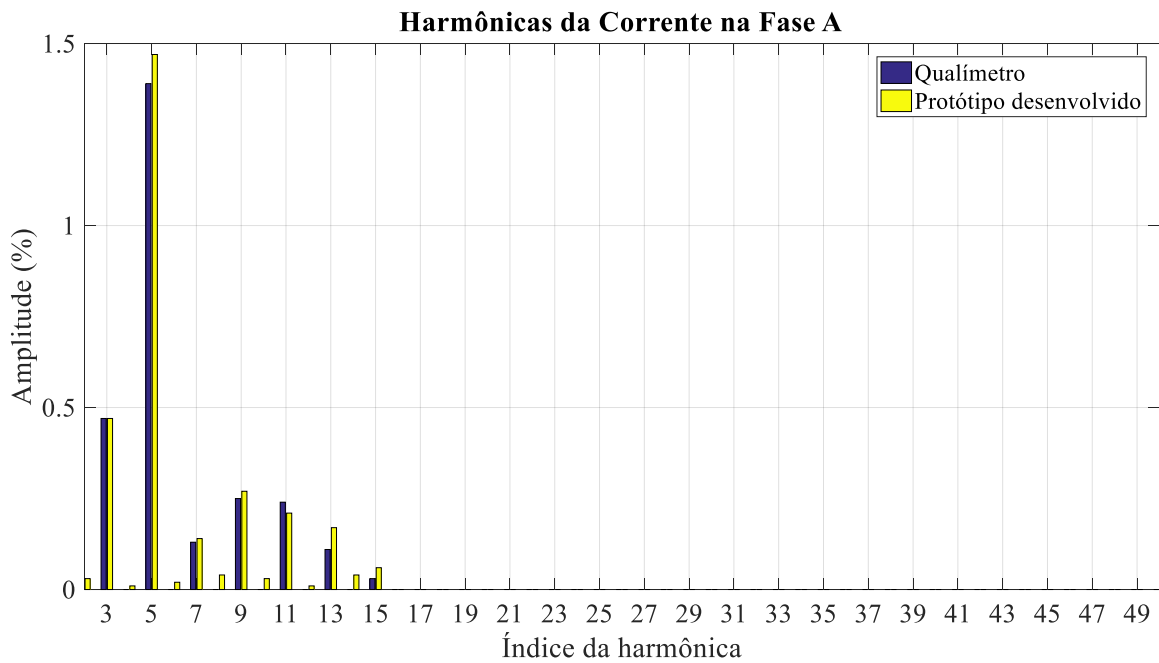
Fonte: Próprio autor.

Figura 20 – Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase C.



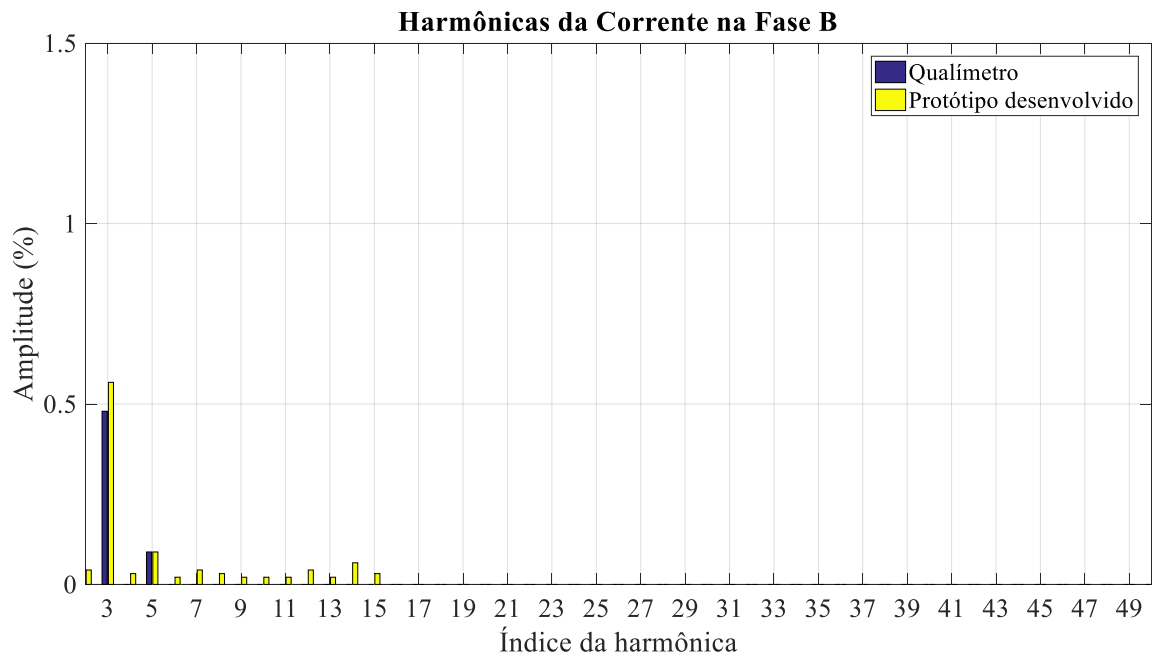
Fonte: Próprio autor.

Figura 21 – Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase A.



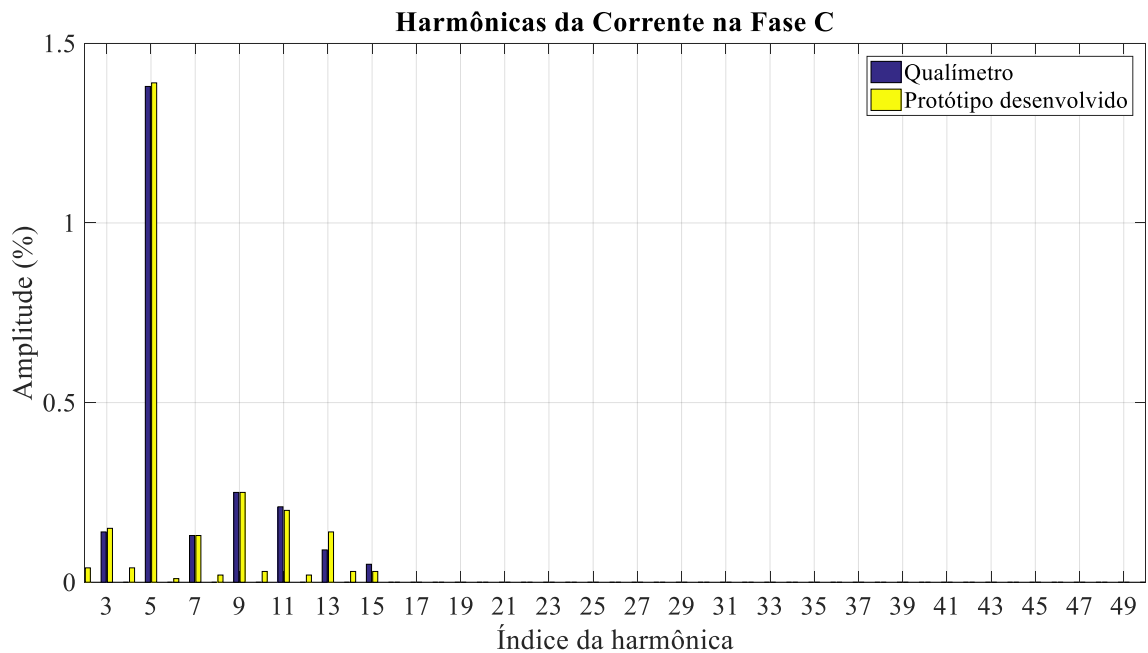
Fonte: Próprio autor.

Figura 22 – Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase B.



Fonte: Próprio autor.

Figura 23 – Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase C.



Fonte: Próprio autor.

Pelos gráficos dos harmônicos individuais apresentados nas Figuras 18 a 23 é possível verificar a similaridade dos resultados obtidos pelo protótipo e pelo Nexus 1500 para o teste com carga resistiva. As discrepâncias verificadas, sobretudo no que diz

respeito às componentes harmônicas ímpares, foram inferiores a 0,25%. Vale salientar, que em função da tabela de harmônicos utilizada na programação da fonte, os níveis de distorção harmônica verificados para as fases A e C são diferentes dos verificados na fase B.

As distorções harmônicas totais por fase obtidas a partir do protótipo também foram comparadas às medidas pelo medidor de referência, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9- Análise comparativa para a DHT.

Grandeza	Fase	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
DHT Tensão (%)	A	1,66	1,66	0,00
	B	0,16	0,20	0,04
	C	1,67	1,63	0,04
DHT Corrente (%)	A	1,53	1,69	0,16
	B	0,50	0,59	0,09
	C	1,45	1,46	0,01

Fonte: Próprio autor.

No que diz respeito às determinações das DHT, conforme pode-se verificar na Tabela 8, os desvios verificados entre os resultados obtidos a partir do protótipo e do qualímetro foram inferiores a 0,16%.

Os cálculos dos desvios percentuais referentes às medições de frequência e de desbalanceamento foram realizados, conforme apresentados, respectivamente, nas Tabelas 10 e 11. Para tanto, compararam-se as médias dos valores obtidos em dez medições consecutivas.

Tabela 10 – Frequência medida pelo protótipo e pelo Nexus 1500.

Grandeza	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Frequência (Hz)	60,004	60,034	0,050

Fonte: Próprio autor.

Tabela 11- Fator de desbalanceamento medido pelo protótipo e pelo Nexus 1500.

Grandeza	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Fator de desbalanceamento (%)	0,449	0,445	0,891

Fonte: Próprio autor.

A partir da Tabela 10 é possível constatar que o valor médio obtido pelo protótipo para frequência apresentou um desvio percentual de 0,050% em relação à média dos valores de frequência medidos pelo qualímetro. Já para o fator de desequilíbrio, o desvio verificado não foi superior a 0,9%.

Por último, foram comparadas as medições de potência ativa, reativa e aparente, além do fator de potência, respectivamente, para os métodos senoidal e Willems (1992), conforme exposto nas Tabela 12 e 13.

Tabela 12- Análise comparativa – método senoidal.

Grandeza	Fase	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Potência Ativa (W)	A	254,50	261,50	2,75
	B	263,82	260,91	1,10
	C	194,70	197,27	1,32
	Total	713,02	719,68	0,93
Potência Reativa (var)	A	3,19	5,54	73,67
	B	2,53	3,69	45,84
	C	2,85	6,01	110,87
	Total	8,57	15,24	77,83
Potência Aparente (VA)	A	254,52	261,56	2,76
	B	263,83	260,94	1,10
	C	194,72	197,36	1,36
	Total	713,07	719,86	0,95
Fator de potência	A	1,000	0,999	0,10
	B	1,000	0,999	0,10
	C	1,000	0,999	0,10
	Total	1,000	0,999	0,10

Fonte: Próprio autor.

Tabela 13- Análise comparativa – potência pelo método de Willems.

Grandeza	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Potência Ativa (W)	713,02	705,00	1,12
Potência Reativa (var)	8,57	65,67	666,28
Potência Aparente (VA)	713,07	705,96	1,00
Fator de Potência	1,000	0,999	0,10

Fonte: Próprio autor.

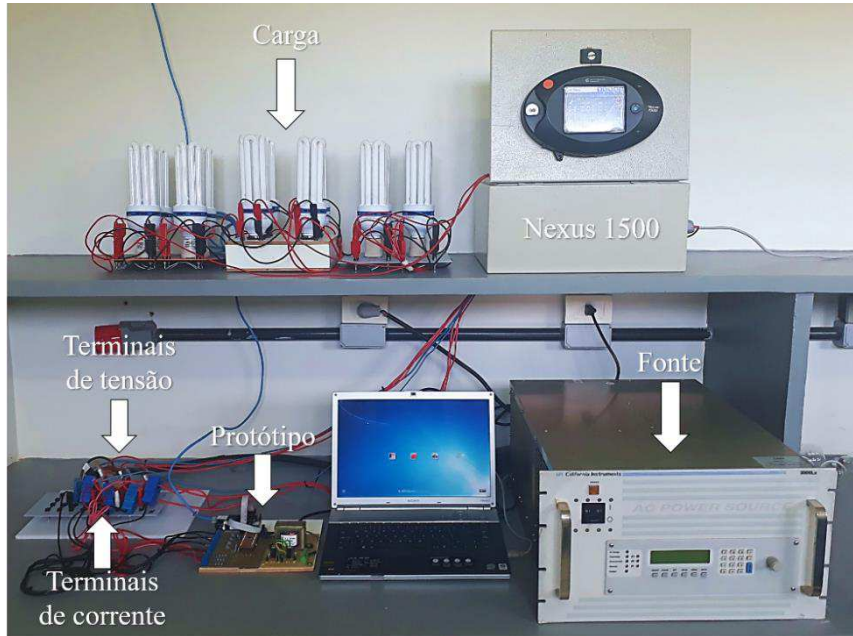
A partir dos dados apresentados na Tabela 12 é possível verificar que os desvios máximos obtidos para as medições de potência ativa, potência aparente e fator de potência não foram superiores a 2,80%. Já os valores de potência reativa medidos apresentaram desvios de até 110,87% (fase C). As discrepâncias verificadas na medição de potência reativa utilizando o método senoidal, método também empregado pelo Nexus 1500 (ELECTRO INDUSTRIES/GAUGETECH, 2016), podem ser atribuídas à acurácia das medições. O protótipo desenvolvido, realiza o cálculo da potência reativa a partir dos valores medidos de potência ativa e potência aparente. Assim, pequenos erros na medição destas podem gerar desvios consideráveis no cálculo da potência reativa, quando o fator de potência é significativamente elevado, no caso da situação experimentada.

Ao ser empregado o método de Willems (1992), conforme apresentado na Tabela 13, foram obtidos desvios percentuais inferiores a 1,15% para as medições de potência ativa e potência aparente. Já para a medição de potência reativa obteve-se um desvio de 666,28%. A elevada discrepância entre os valores obtidos, neste caso, pode ser atribuída à influência do elevado fator de potência e ao fato de o método de cálculo utilizado diferir do método empregado pelo qualímetro.

5.3 TESTES COM CARGA NÃO LINEAR

De forma análoga aos testes realizados com cargas lineares, foram realizadas medições, com o qualímetro e o protótipo desenvolvido, para cargas com fator de potência não superior a 0,95% e característica fortemente não linear. Para tanto, foram utilizadas lâmpadas fluorescentes compactas de 45W como carga. O arranjo experimental utilizado é ilustrado pela Figura 24.

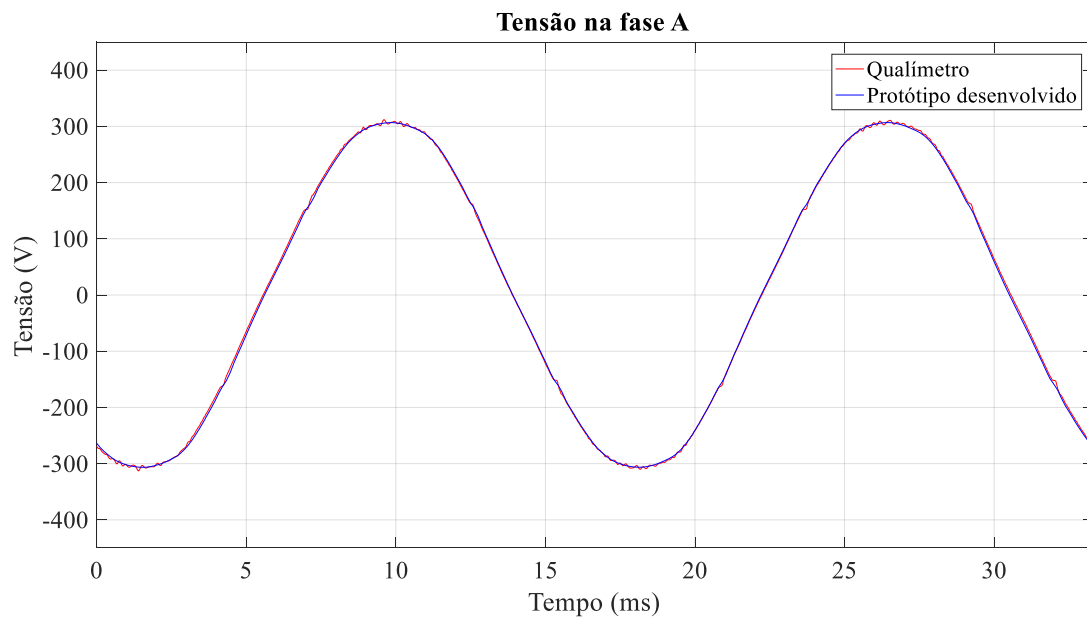
Figura 24 – Arranjo experimental com carga não linear.



Fonte: Próprio autor.

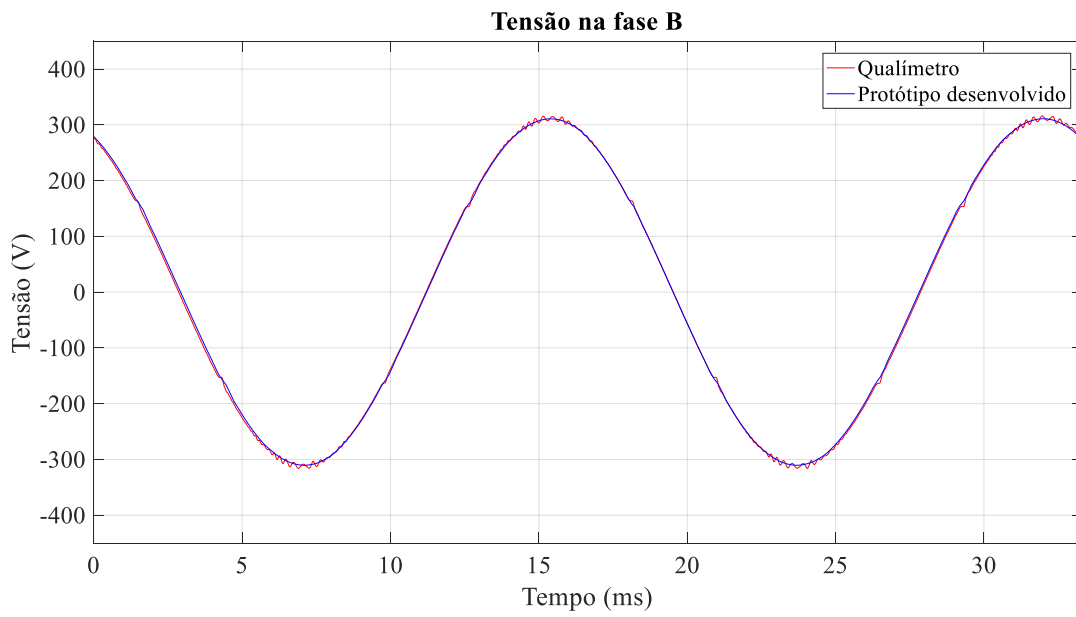
As formas de onda de tensão e de corrente foram adquiridas e exportadas para o *Matlab* para a realização das análises. Nas Figuras 25 a 27 são ilustradas as formas de onda de tensão adquiridas e sobrepostas para comparação.

Figura 25 – Formas de onda das tensões na fase A obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo Nexus 1500.



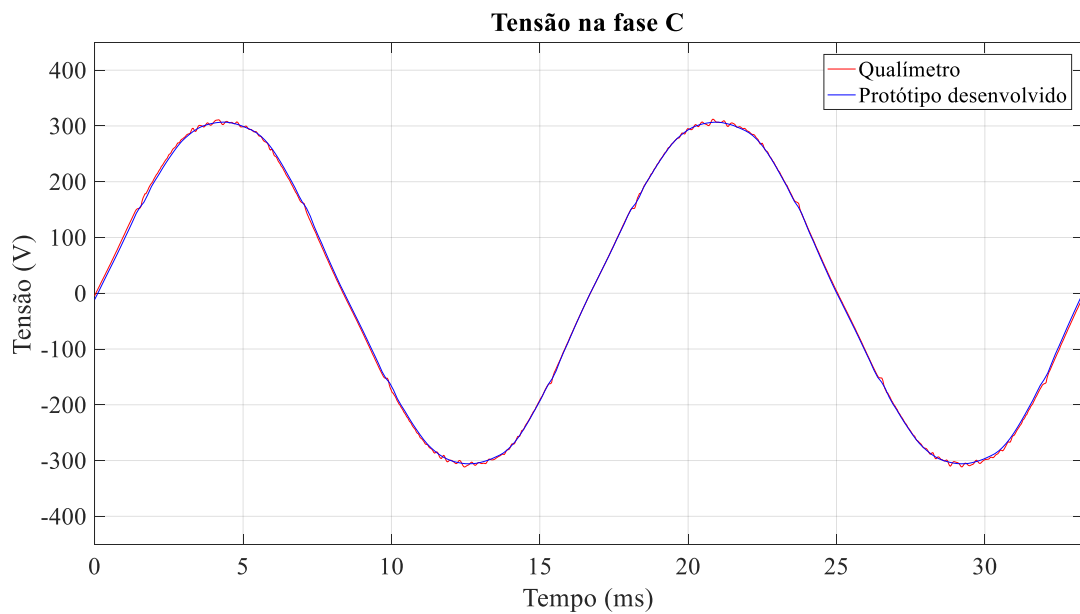
Fonte: Próprio autor.

Figura 26 – Formas de onda das tensões na fase B obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo Nexus 1500.



Fonte: Próprio autor.

Figura 27 – Formas de onda das tensões na fase C obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo Nexus 1500.



Fonte: Próprio autor.

Os desvios percentuais entre os valores de pico e os coeficientes de correlação entre as formas de onda calculados, são expressos na Tabela 14.

Tabela 14-Desvios percentuais e coeficientes de correlação inerentes às formas de onda de tensão.

	Grandeza	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Fase A	Tensão de Pico Positiva (V)	307,234	306,6726	0,183
	Tensão de Pico Negativa (V)	-307,336	-306,5267	0,263
	Coef. Correlação Formas de Onda		0,9996	
	Grandeza	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Fase B	Tensão de Pico Positiva (V)	312,0094	310,8950	0,357
	Tensão de Pico Negativa (V)	-312,4168	-310,5534	0,596
	Coef. Correlação Formas de Onda		0,9994	
	Grandeza	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Fase C	Tensão de Pico Positiva (V)	307,8047	306,8736	0,302
	Tensão de Pico Negativa (V)	-307,7954	-305,8870	0,620
	Coef. Correlação Formas de Onda		0,9996	

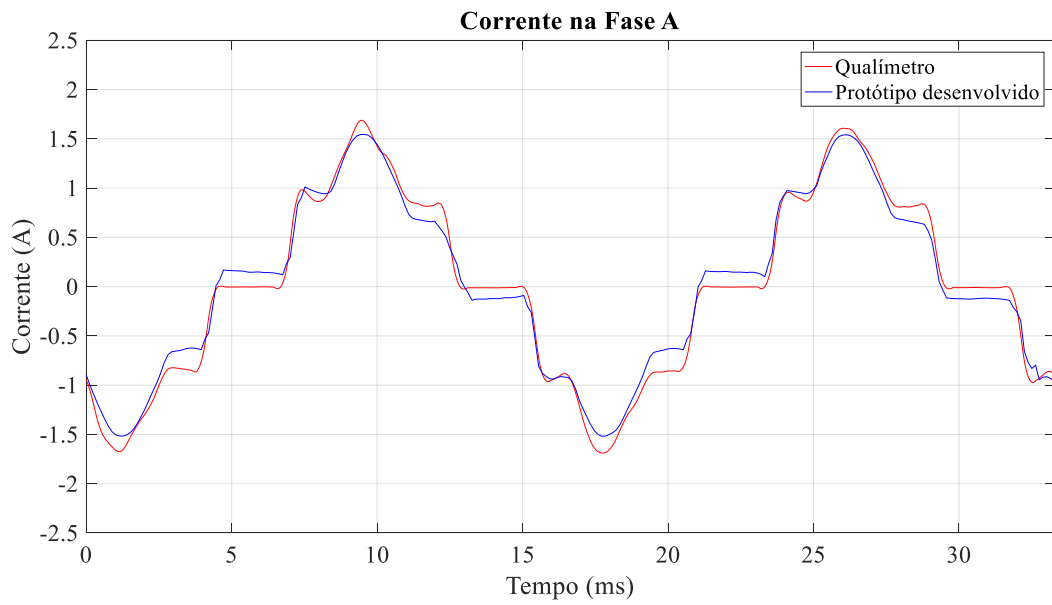
Fonte: Próprio autor.

Ao serem comparados os sinais de tensão adquiridos, foram obtidos desvios percentuais inferiores a 0,7% para os valores de pico e coeficientes de correlação entre as formas de onda superiores a 0,999.

Os desvios verificados, portanto, são semelhantes aos obtidos no teste com carga linear, conforme apresentado na Tabela 6. O objetivo principal do teste com cargas não-lineares foi, no entanto, avaliar o comportamento do protótipo ao medir formas de onda de corrente com componentes harmônicos significativos, isto é, formas de onda distorcidas, que pudessem impactar na exatidão da medição.

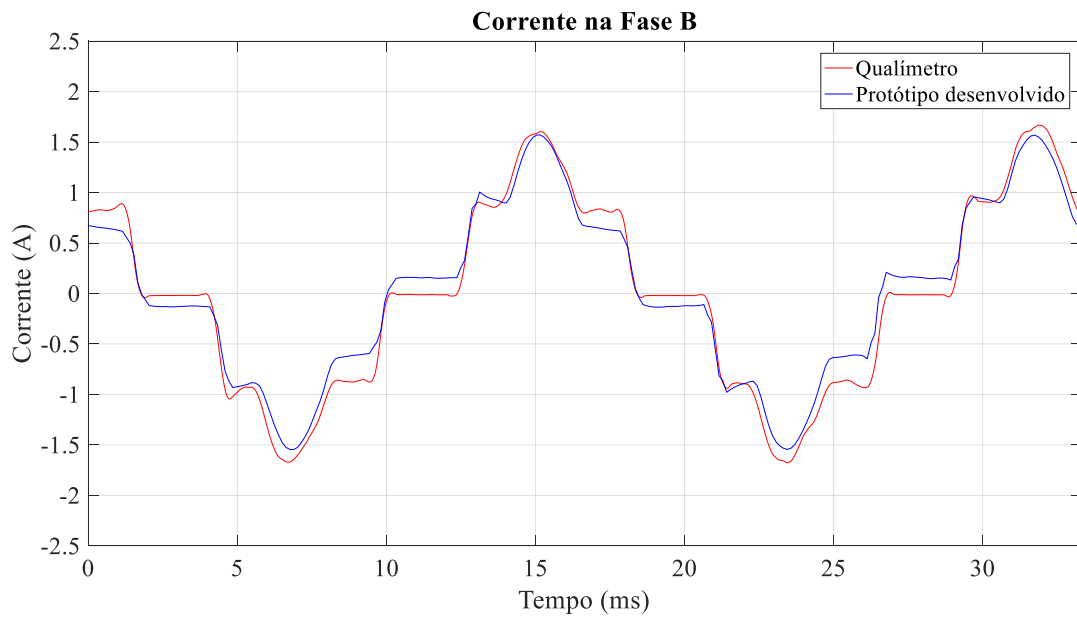
As formas de onda de corrente obtidas pelo qualímetro e pelo protótipo desenvolvido são apresentadas nas Figuras 28 a 30.

Figura 28 – Formas de onda das correntes na fase A obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo Nexus 1500.



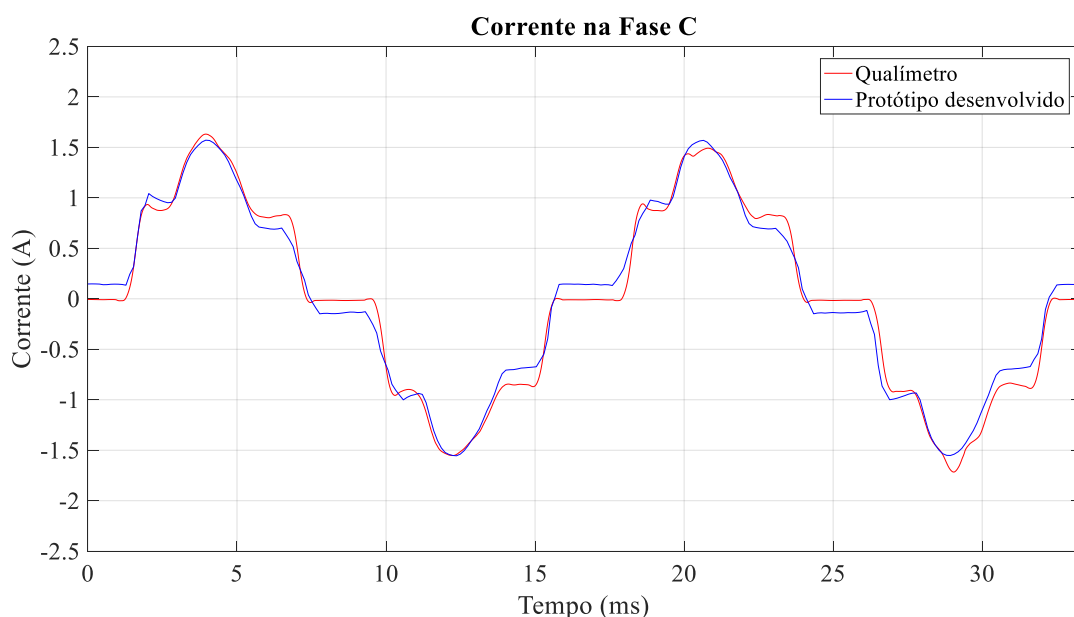
Fonte: Próprio autor.

Figura 29 – Formas de onda das correntes na fase B obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo Nexus 1500.



Fonte: Próprio autor.

Figura 30 – Formas de onda das correntes na fase C obtidas pelo protótipo desenvolvido e pelo Nexus 1500.



Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 15, são expostos os resultados obtidos na avaliação das formas de onda de corrente adquiridas.

Tabela 15-Desvios percentuais e coeficientes de correlação inerentes às formas de onda de corrente.

	Grandeza	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Fase A	Corrente de Pico Positiva (A)	1,5545	1,5445	0,643
	Corrente de Pico Negativa (A)	-1,5745	-1,5175	3,620
	Coef. Correlação Formas de Onda		0,9733	
Fase B	Corrente de Pico Positiva (A)	1,5595	1,5683	0,566
	Corrente de Pico Negativa (A)	-1,6007	-1,5595	3,499
	Coef. Correlação Formas de Onda		0,9543	
Fase C	Corrente de Pico Positiva (A)	1,5362	1,6535	1,779
	Corrente de Pico Negativa (A)	-1,5628	-1,5558	0,448
	Coef. Correlação Formas de Onda		0,9761	

Fonte: Próprio autor.

A partir dos dados apresentados na Tabela 15 é possível constatar que foram obtidos desvios percentuais inferiores a 3,7% para os valores de pico e coeficientes de correlação entre as formas de onda superiores a 0,954. Quando comparados com os

desvios obtidos durante o teste com carga linear, no entanto, é possível verificar um grau de similaridade inferior entre as formas de onda de corrente (Tabela 7).

Também foram calculados os desvios percentuais inerentes às medições dos valores eficazes de tensão e de corrente, os quais são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16- Análise comparativa valores eficazes.

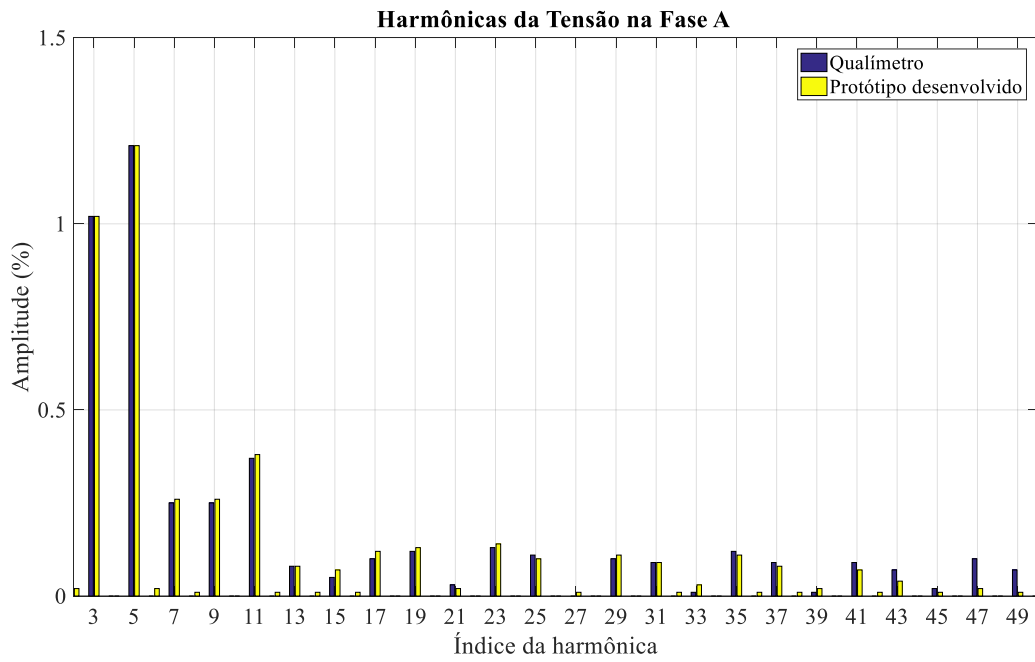
Grandeza	Fase (s)	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Tensão (V)	A	220,03	218,83	0,55
	B	220,18	221,99	0,82
	C	220,54	219,75	0,36
	AB	382,21	383,54	0,35
	BC	381,75	383,63	0,49
	CA	380,42	376,91	0,92
Corrente (A)	A	0,92	0,90	2,17
	B	0,89	0,91	2,25
	C	0,93	0,92	1,08

Fonte: Próprio autor.

Analisando a Tabela 16 é possível constatar que os desvios percentuais obtidos na medição de corrente novamente foram superiores aos obtidos para a medição de tensão. No entanto, os desvios calculados em relação ao medidor de referência são inferiores a 2,25%.

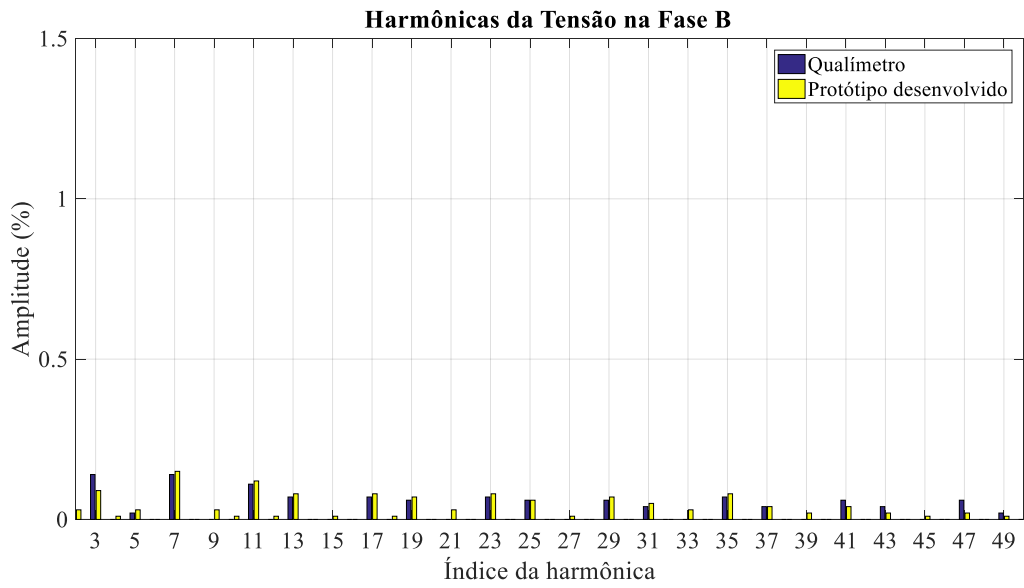
Também foram comparadas as medições das harmônicas individuais de corrente e de tensão e a distorção harmônica total em cada uma das fases. Os gráficos das componentes harmônicas das tensões e correntes, até a 50ª ordem, são expostos nas Figuras 31 a 36.

Figura 31 – Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase A.



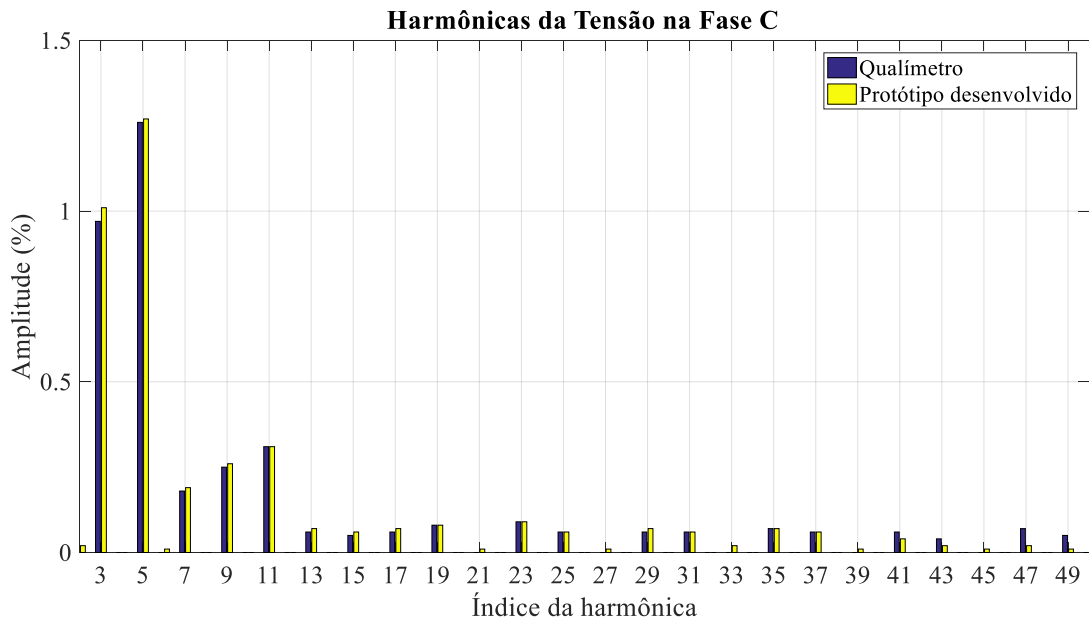
Fonte: Próprio autor.

Figura 32 – Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase B.



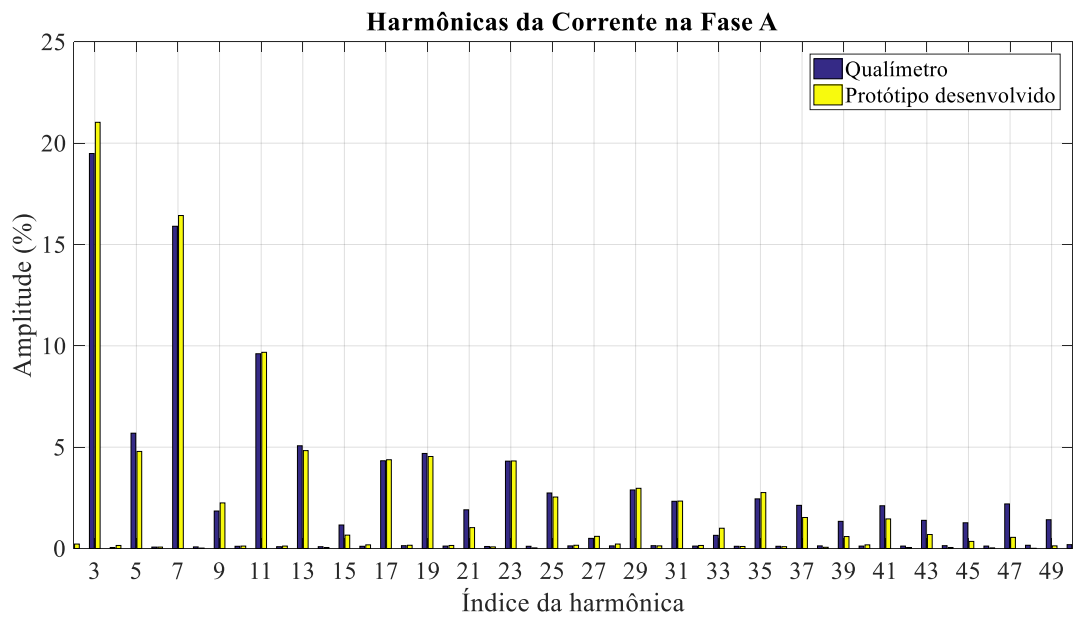
Fonte: Próprio autor.

Figura 33 – Gráfico de Harmônicas da Tensão na Fase C.



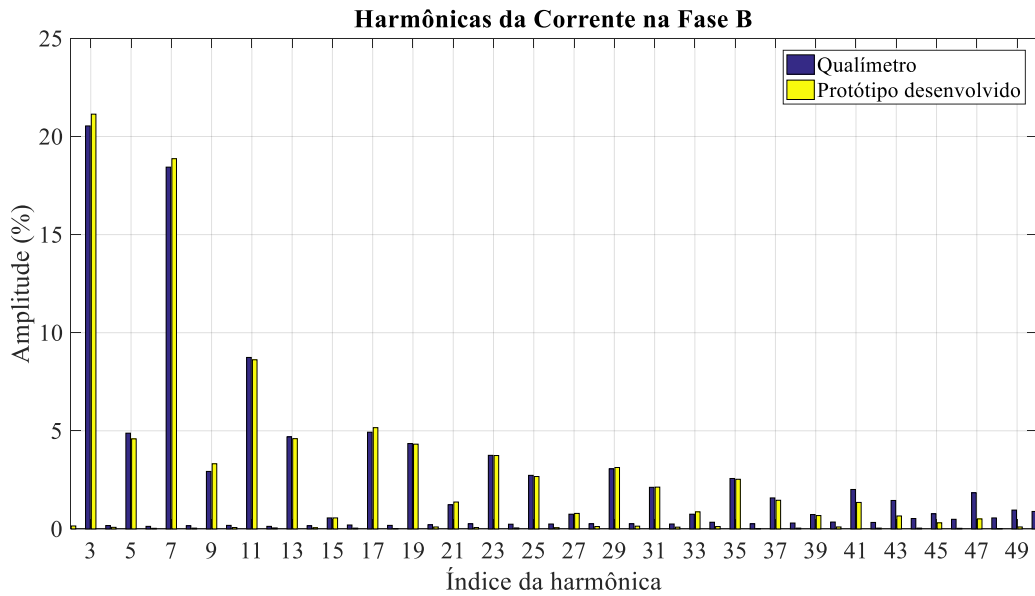
Fonte: Próprio autor.

Figura 34 – Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase A.



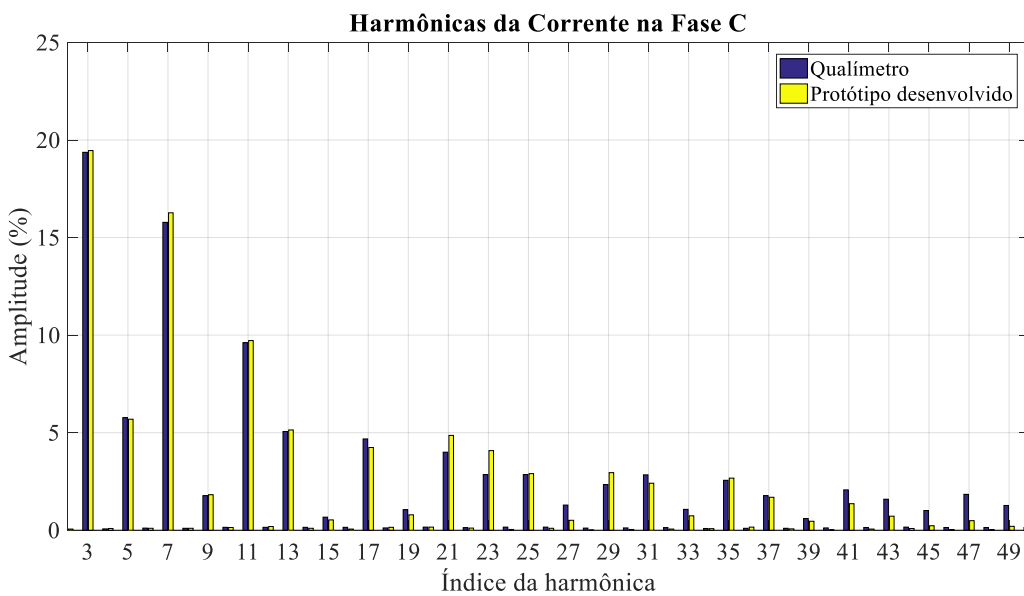
Fonte: Próprio autor.

Figura 35 – Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase B.



Fonte: Próprio autor.

Figura 36– Gráfico de Harmônicas da Corrente na Fase C.



Fonte: Próprio autor.

Pelos gráficos dos harmônicos apresentados nas Figuras 36 a 41 é possível verificar a aderência dos resultados obtidos para o teste com carga não linear. As discrepâncias verificadas nas medições das harmônicas individuais de tensão se mantiveram inferiores a 0,25%, conforme também verificado nos testes com carga linear. Na medição das componentes harmônica de corrente, no entanto, foram obtidos desvios percentuais superiores aos verificados nos testes com carga linear, sobretudo, para a 3ª harmônica da fase A (desvio de 0,47%).

As distorções harmônicas totais por fase obtidas a partir do protótipo também foram comparadas às medidas pelo medidor de referência, conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17- Análise comparativa para a DHT.

Grandeza	Fase	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
DHT Tensão (%)	A	1,69	1,68	0,01
	B	0,39	0,31	0,08
	C	1,69	1,70	0,01
DHT Corrente (%)	A	30,35	30,87	0,52
	B	31,96	32,05	0,09
	C	30,20	29,94	0,26

Fonte: Próprio autor.

Conforme pode-se verificar na Tabela 17, os desvios percentuais verificados entre os resultados obtidos a partir do protótipo e do qualímetro foram inferiores a 0,53%. Novamente, foram verificados aumentos dos desvios calculados quando comparados aos desvios obtidos para o teste com carga linear (Tabela 9).

Também foram calculados dos desvios percentuais para os resultados das medições de frequência e desbalanceamento, os quais são apresentados, respectivamente nas Tabelas 18 e 19.

Tabela 18- Frequência medida pelo protótipo e pelo Nexus 1500.

Grandeza	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Frequência (Hz)	60,005	60,031	0,043

Fonte: Próprio autor.

Tabela 19- Fator de desbalanceamento medido pelo protótipo e pelo Nexus 1500.

Grandeza	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Fator de desbalanceamento (%)	0,72	0,69	4,16

Fonte: Próprio autor.

Semelhantemente ao ocorrido nos testes com carga linear, a estimação de frequência realizada pelo protótipo apresentou um desvio percentual inferior a 0,051%. Ao ser considerado o cálculo do fator de desbalanceamento verificou-se, no entanto, um aumento no desvio calculado quando comparado ao caso com carga linear. Entretanto, o desvio percentual ainda permanece inferior a 4,20%.

Por último, foram comparadas as medições de potências e fator de potência, respectivamente, para os métodos senoidal e Willems (1992), conforme exposto nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20- Análise comparativa – Triângulo de potência.

Grandeza	Fase	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Potência Ativa (W)	A	176,12	182,98	3,90
	B	178,42	174,22	2,35
	C	188,69	186,28	1,28
	Total	543,84	543,48	0,07
Potência Reativa (var)	A	63,54	65,67	3,35
	B	66,92	60,82	9,11
	C	66,33	62,26	6,14
	Total	196,78	188,75	4,08
Potência Aparente (VA)	A	188,54	195,35	3,62
	B	189,86	184,53	2,81
	C	196,4	196,4	1,84
	Total	578,36	576,48	0,32
Fator de potência	A	0,934	0,937	0,273
	B	0,940	0,944	0,466
	C	0,961	0,948	1,277
	Total	0,940	0,943	0,260

Fonte: Próprio autor.

Tabela 21- Análise comparativa – potência pelo método de Willems.

Grandeza	Nexus 1500	Protótipo	Desvio (%)
Potência Ativa (W)	543,84	543,61	0,04
Potência Reativa (var)	196,78	165,68	15,81
Potência Aparente (VA)	578,36	568,30	1,74
Fator de Potência	0,940	0,956	1,73

Fonte: Próprio autor.

A partir dos dados apresentados na Tabela 20 é possível verificar que os desvios máximos obtidos para as medições de potência ativa, potência aparente e fator de potência não foram superiores a 3,90%. Já os valores de potência reativa medidos apresentaram desvios de até 9,11% (fase B). Quando comparados os resultados apresentados nas

Tabelas 13 e 20, considerando os valores obtidos para a potência reativa, verifica-se que a diminuição do fator de potência, ao se utilizar a carga não linear, contribuiu para a diminuição dos desvios calculados.

Quanto aos resultados obtidos a partir do método de Willems (1992), foi verificado um desvio inferior a 1,75% para as medições de potência ativa, potência aparente e fator de potência. Para a medição de potência reativa, verificou-se um desvio de 15,81%. Portanto, nos testes com carga não linear, também houve uma diminuição dos desvios ao ser empregado o método de Willems (1992) para o cálculo da potência reativa.

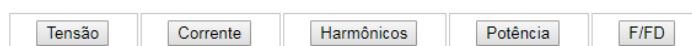
5.4 UNIDADE DE INTERFACE COM O USUÁRIO

Considerando que o propósito do medidor desenvolvido é possibilitar o monitoramento da energia consumida por parte do consumidor e da concessionária, a fim de possibilitar a visualização dos resultados gerados pelo protótipo, foi desenvolvida uma aplicação *web* para implementar a unidade de interface com o usuário.

A interface desenvolvida é composta basicamente por quatro páginas: tensão, corrente, harmônicas e potência.

No campo destinado aos parâmetros gerais, são apresentados os valores eficazes das tensões e correntes, inclusive com seus valores instantâneos, máximos e mínimos. Na Figura 37 é apresentada uma captura de tela principal da aplicação *web* desenvolvida, na qual se destacam os parâmetros gerais.

Figura 37– Captura de tela da página web desenvolvida – parâmetros gerais.

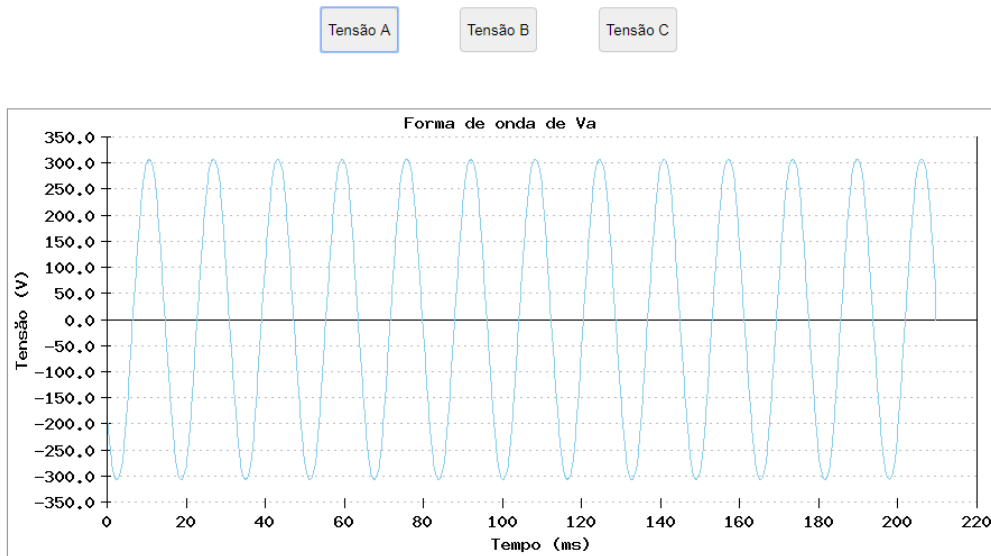


Tensão	RMS	Máximo	Mínimo
Van	218.99	309.70	-309.70
Vbn	221.46	313.19	-313.19
Vcn	220.33	311.59	-311.59
Vab	383.10	541.78	-541.78
Vbc	383.40	542.21	-542.21
Vca	377.94	534.49	-534.49

Fonte: Próprio autor.

Na página destinada à apresentação das formas de onda, pode-se escolher qual das fases terá sua forma de onda exibida. Tensões e correntes podem ser escolhidas independentemente. Na Figura 38 é apresentada uma captura de tela da página *web* desenvolvida, na qual se destaca a exibição da forma da tensão na fase A.

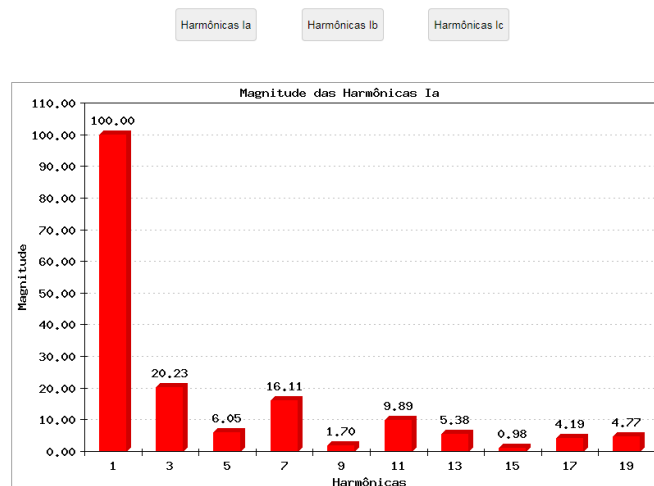
Figura 38– Captura de tela da página *web* desenvolvida – forma de onda da tensão.



Fonte: Próprio autor.

No que diz respeito ao monitoramento de harmônicos, é possível a visualização dos dados tanto por meio de uma tabela que relaciona as principais componentes espectrais do sinal, quanto por gráficos de barras. Na Figura 39 é apresentada uma captura de tela da página *web* desenvolvida, na qual se destaca a exibição das componentes harmônicas dos sinais.

Figura 39– Captura de tela da página *web* desenvolvida – harmônicas.



Fonte: Próprio autor.

Também foi desenvolvida uma página *web* destinada à visualização dos dados relacionados à potência elétrica medida. Nesta, os dados de potência ativa, reativa, aparente e fator de potência são apresentados na forma de uma tabela, conforme ilustrado na Figura 40.

Figura 40– Captura de tela da página *web* desenvolvida – potências.

Potência	Fase A	Fase B	Fase C	Total
P	187.58	189.37	189.35	566.30
Q	76.01	82.16	80.00	238.17
S	202.40	206.42	205.56	614.38
FP	0.93	0.92	0.92	0.92

Fonte: Próprio autor.

Por último, tem-se uma página destinada à visualização da frequência e do fator de desequilíbrio de tensão medidos, conforme apresentado na Figura 41.

Figura 41– Captura de tela da página *web* desenvolvida – potências.

Desequilíbrio de tensão	Frequência
0.46%	60.01Hz

Fonte: Próprio autor.

Vale salientar que, além de permitir a visualização dos dados por meio da interface com o usuário, o protótipo gera arquivos com as medições realizadas em formato de texto. Neste sentido, é possível exportar os dados para, eventualmente, processá-los externamente.

5.5 CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir de testes laboratoriais realizados no protótipo desenvolvido. Para tanto, foram analisados os níveis de similaridade das formas de onda de tensão e corrente adquiridas, bem como os valores de tensão e corrente, coeficientes harmônicos, potência, frequência e desbalanceamento medidos.

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões e contribuições do trabalho desenvolvido, além de propostas para trabalhos futuros.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi apresentada a concepção, desde o projeto aos testes comparativos, de um novo medidor de energia elétrica. Diferentemente dos medidores de energia disponíveis comercialmente, além de fornecer dados do consumo, o protótipo desenvolvido fornece parâmetros da qualidade da energia elétrica.

Os algoritmos computacionais dedicados à determinação de parâmetros relacionados à qualidade da energia elétrica: valor eficaz e valor de pico, frequência, desbalanceamento, distorção harmônica total e distorção harmônica individual foram desenvolvidos, implementados e testados.

Os testes realizados utilizando cargas de natureza linear e não linear permitiram realizar a análise comparativa do dispositivo desenvolvido frente a um analisador de energia comercial onde se constatou que:

- Os desvios percentuais verificados nas análises dos valores de pico dos sinais de tensão se mantiveram inferiores a 0,80%. Para os sinais de corrente, foram obtidos desvios de até 3,62% durante os testes com sinais distorcidos. Em relação ao grau de correlação das formas de ondas adquiridas, foram obtidos coeficientes de correlação superiores a 0,999 e 0,954, respectivamente, para os sinais de tensão e de corrente;
- Os desvios máximos verificados na medição de valores eficazes das correntes (2,40%) se mostraram superiores aos desvios verificados para as tensões (0,92%);
- As análises comparativas para as medições de frequência resultaram em desvios percentuais não superiores a 0,05% entre os valores medidos pelo protótipo e pelo qualímetro;
- Nas medições do fator de desbalanceamento foi verificado um desvio percentual de 4,16% durante os testes com carga não linear. O desvio verificado é, portanto, 3,27% maior que o desvio obtido nos testes com carga linear;
- Os desvios percentuais máximos verificados nas medições das componentes harmônicas individuais foram inferiores a 0,50%, mesmo durante os testes com sinais distorcidos;

- Nas análises das medições de DHT foram constatados desvios máximos inferiores a 0,52% nos testes com carga não linear e desvios não superiores a 0,16% nos testes com carga linear.

Em relação aos algoritmos computacionais dedicados à determinação de parâmetros relacionados ao consumo de energia elétrica: potências ativa, reativa e aparente e fator de potência, foi possível constatar:

- O método senoidal apresentou desvios percentuais não superiores a 3,91% para as medições de potência ativa, potência aparente e fator de potência, independentemente da carga utilizada no teste. Já as medições de potência reativa, utilizando o mesmo método, apresentaram desvios relativos significativos, sobretudo durante os testes com carga linear, contudo os desvios absolutos são pequenos;
- Ao ser utilizado o método de Willems, foram verificados desvios percentuais não superiores a 1,74% para as medições de potência ativa, potência aparente e fator de potência, independentemente da carga utilizada no teste. Entretanto, semelhantemente ao ocorrido para o método senoidal, foram verificados desvios elevados durante os testes com carga linear.

A interface gráfica foi desenvolvida e se mostrou intuitiva e de simples manuseio. Por ser intuitiva e de simples manuseio é possível acessar formas de onda, tabelas e gráficos relacionados aos parâmetros escolhidos pelo usuário para análise.

Os resultados obtidos permitem concluir que os objetivos do trabalho, que era a concepção, desde o projeto aos testes comparativos, de um medidor de energia elétrica para medição de consumo e de parâmetros da qualidade da energia elétrica, foram atingidos integralmente e que trabalhos futuros podem ser vislumbrados a partir do que foi desenvolvido.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como continuação deste trabalho, visando o aproveitamento da capacidade de detecção de harmônicas do protótipo desenvolvido e da infraestrutura de testes montada, propõe-se o estudo e o aprimoramento de técnicas que permitam a identificação e a classificação de cargas por meio do conteúdo harmônico. Ainda neste panorama, analisar a viabilidade do uso de inteligência artificial aplicada ao monitoramento de unidades consumidoras visando a desagregação do consumo de energia elétrica.

6.2 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Como resultado deste trabalho, foi produzido o seguinte artigo:

“Sistema de Monitoramento Online de Harmônicos Baseado na Plataforma BeagleBone Black.”

Autores: BARBOSA, L. A.; COSTA, E. G.; LIRA, G. R. S.; MELO, J. V. J.

Submetido ao Congresso Brasileiro da Qualidade da Energia Elétrica 2019 (CBQEE 2019).

REFERÊNCIAS

- ANANTH, I.; MORCOS, M. M. A power quality monitoring system: a case study in DSP-based solutions for electric power industry. *IEEE Power Engineering Review*, v. 19, n. 7, p. 47-50, 1999.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica: *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional* – PRODIST. Módulo 8, Rev.9 (2017) - Qualidade da Energia Elétrica.
- ARÃO, L. F. L. *Avaliação Comparativa Entre Métodos Para Atribuição De Responsabilidades Devido Ao Desequilíbrio De Tensão*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Brasília - UNB, Brasília, 2014.
- ARAÚJO, J. F.; LIRA, G. R. S.; FERREIRA, T. V. *Comparação de Técnicas de Estimação de Harmônicos em Sistemas de Potência*. In: IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Goiania, 2012.
- ARRUDA, E. F. *Análise de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica utilizando a transformada Wavelet*. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- ATMEL, Application Note 90E36A. Disponível em: <<http://www.atmel.com/Images/Atmel-46104-SE-90E36A-%20ApplicationNote%20.pdf>>, acesso em: 10/10/2017.
- ATMEL, Datasheet 90E36A. Disponível em: <http://www.atmel.com/Images/Atmel-46104-SE-90E36A-%20ApplicationNote%20.pdf>. Acesso em: 04/06/2017.
- BEAGLEBOARD.ORG, BeagleBone Black. Disponível em: <<http://beagleboard.org/black>>, acesso em: 04/11/2017
- BOLLEN, M. H. J. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. New York, USA: IEEE Press, 2000.
- BRONZEADO, H. et al. *Uma Proposta de Nomenclatura Nacional de Termos e Definições Associados à Qualidade de Energia Elétrica*. In: Anais II SBQEE-Seminário Brasileiro da Qualidade da Energia Elétrica, Itajubá, Brasil, Nov. 1997.
- COELHO, R. A. *Análise Comparativa de Métodos para Cálculo de Potência Elétrica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas grande, Campina Grande, 2018.
- CHEN, S.; ZHANG, C.L.; LIU, Y. Z., *A multi-channel monitoring system for system-wide power quality measurements*, Proceedings of International Conference on Power System Technology, 2000. PowerCon 2000, vol.2, pp.953-958 vol.2, 2000 - DOI: 10.1109/ICPST.2000.897149.
- CESÁRIO JÚNIOR, J. M. *Um medidor de energia elétrica integrado em redes de comunicações*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.
- COLNAGO, G. P.; VIEIRA, J. L. F.; SOUSA, G. C. D.; MACEDO, J. R. e MACIEIRA, L. B. B. *Desenvolvimento e implementação de um sistema de monitoramento em tempo real da tensão da rede com acesso remoto*, Congresso Brasileiro de Automática, 2010.
- DECKMANN, S. M. e POMILIO, J. A., *Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica*, UNICAMP, julho de 2010.
- DOMMEL, H. W. *EMTP Theory Book*, 2nd ed. Vancouver, British Columbia, Canada:Microtran Power System Analysis Corporation, 1996.
- DUGAN, R. C.; McGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. *Electrical power systems quality*. New York: McGraw-Hill, 2ª Edição, 2004.

FILIFELOP, Sensor de corrente não invasivo SCT013. Disponível em: <https://www.filieflop.com/produto/sensor-de-corrente-nao-invasivo-100a-sct-013/>. Acesso em: 09/09/2017.

FONSÊCA, N. S. S. M. *Sistema de aquisição de dados para monitoramento de transformadores de distribuição*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

FUGITA, S. D. *Smart Meter Integrado a Analisador de Qualidade de Energia Para Propósitos de Identificação de Cargas Residenciais*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

GALHARDO, M. A. B; PINHO, J. T. *Avaliação da qualidade da energia fornecida por sistemas renováveis isolados de pequeno porte*. Proceeding softhe 5th Encontro de Energia no Meio Rural, 2004.

GAO, X.; ZHOU, Q. *A Low Consumption DSP Based Power Analyzer*, 2nd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), pp.164-168, 15-17 de novembro de 2014 - DOI: 10.1109/ICSAI.2014.7009279.

GOERTZEL, G., *An algorithm for the evaluation of finite trigonometric series*, American Mathematics Monthly, vol. 65, pp. 34 – 35, 1958.

HAFNER, A; LIMA, C. R. E.; LOPES, H. S. *Implementação de um medidor de qualidade de energia usando computação reconfigurável por hardware*. VII SBAI/II IEEE LARS, 2005.

HE, H. e ZHANG, H. *A New Power Quality Monitoring System Based on ARM and SOPC*. ISECS International Colloquium on CCCM, IEEE. Pág. 24 – 27, Guangzhou, China, agosto de 2008.

HE, H.; WANG, Q.; HE, M., *Design of Power Quality Monitoring System Based on DSP*, Second International Symposium on Computational Intelligence and Design, 2009. ISCID '09. vol.2, pp.345-348, 12-14 de dezembro de 2009 - DOI: 10.1109/ISCID.2009.232.

IEC 60255-3, *Electrical relays - Part 3: Single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time*, 1989.

IEC 61000-3-2, *Limits for harmonic current emissions (equipment input current < 16A per phase)*, 2000.

IEC 61000-4-30, *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*, 2015.

IEEE STANDARD 1459-2010. *IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced or unbalanced conditions*, 2010. ISBN 0-7381-1963-6.

IEEE Std. 1159 TM-2009, *IEEE Recommended Practices for Monitoring Electric Power Quality*. Nova Iorque, Edição Jun. 2009. ISBN 978-0-7381-5939-3.

LAKSHMIKANTH, A.; MORCOS, Medhat M. A power quality monitoring system: a case study in DSP-based solutions for power electronics. *IEEE transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 50, n. 3, p. 724-731, 2001.

LANDI, C; MEROLA, P; IANNIELLO, G. *ARM-Based Energy Management System using Smart Meter and Web Server*, 2011. *IEEE transactions*. ISBN 978-1-4244-7935-1.

LI, Z. e LIANPING, B., *Research about Bi-directional Electronic Energy Meter and Power Quality Analyzers*, 2013 Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), pp.1323-1327, 21-23 de setembro de 2013 - DOI: 10.1109/IMCCC.2013.294

LIMA, A. R. *Análise da aplicabilidade do filtro digital de Goertzel na medição de desequilíbrios de tensão*. Holos ISSN 1807-1600, 2017.

- LIRA, J. G. A.; FREIRE, R. C. S.; COSTA, E. G.; MACEDO, E. C. T.; LUCIANO, B. A. *Sistema de avaliação espectral para sistemas elétricos baseado em microcontrolador*. In: 6º Encuentro de Potencia, Instrumentación y Medidas, 2005, Montevideo. 6 EPIM, 2005. v. 1.
- MAY, M. *Avaliação da qualidade da energia elétrica em um sistema fotovoltaico conectado à rede*. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2016.
- MEDEIROS, E. L. *Sistema flexível de aquisição de sinais de grandezas elétricas aplicado à qualidade de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- MOLLOY, D. *Exploring BeagleBone: Tools and Techniques for Building with Embedded Linux*. John Wiley & Sons, 2015.
- MORTENSEN, A. N.; JOHNSON, G. L. A power system digital harmonic analyzer. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, v. 37, n. 4, p. 537-540, 1988.
- NILSSON, J. W. e RIEDEL, S. A. *Circuitos Elétricos*, 8ª edição, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. ISBN 978-85-7605-159-6.
- PAULILLO, G. *Um compensador de desequilíbrios de tensão*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 1996.
- PEREIRA, P. S. et al. *Estudo, projeto e construção de um registrador e analisador portátil de qualidade de energia elétrica*, 2003.
- PIETROSANTO, A. et al. *Smart Power Meter for the IoT*, IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2018.
- REZENDE, P. H. O.; SAMESIMA, M. I. (2012). Efeito do Desequilíbrio de Tensões de Suprimento nos Motores de Indução trifásicos. *Horizonte Científico*, 6(2).
- SOUZA, M. E. M. de. *Inserção de Microgeração Distribuída nas Redes de Baixa Tensão: Implantação de Telhados Solares - Estudo de caso Real*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- STEINMETZ, C. P. *Findet eine Phasenverschiebung im Wechselstromlichtbogen statt*, *Elektrotechnische Zeitschrift*, Ed. 42, p. 567-568, 1892.
- SU, CHUN-LIEN et al. *Evaluation of power-quality field measurements of an electric bus charging station using remote monitoring systems*. In: *Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, 2016 10th International Conference on. IEEE, 2016. p. 58-63.
- WEI, K.; YAN, X.; LI, H.; ZHANG, L., Design and Realization of Power Quality Monitoring System Based on DSP and PCI Technique, 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPEPEMC 2006. pp.420-424.
- XAVIER, M. V. E. *Sistema de monitoramento de alto desempenho da qualidade de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- YANG, J. Z.; YU, C. S. e LIU, C. W. A new method for power signal harmonic analysis. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pt. 2, pp. 1235–1239, abril de 2005.
- ZHANG, M; LI, K. *A power quality monitoring system over the internet*. In: *Information Science and Engineering (ICISE)*, 2009 1st International Conference on. IEEE, 2009. p. 1577-1580.