



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

EDDY LOPES MEDEIROS

**SISTEMA FLEXÍVEL DE AQUISIÇÃO DE SINAIS DE GRANDEZAS
ELÉTRICAS APLICADO À QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

Campina Grande, Paraíba
Agosto de 2016

EDDY LOPES MEDEIROS

SISTEMA FLEXÍVEL DE AQUISIÇÃO DE SINAIS DE GRANDEZAS
ELÉTRICAS APLICADO À QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

*Dissertação de Mestrado de Engenharia Elétrica
apresentada ao 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 da Energia

Orientadores:

Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Agosto de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M488s Medeiros, Eddy Lopes.
 Sistema flexível de aquisição de sinais de grandezas elétricas aplicado à
 qualidade da energia elétrica / Eddy Lopes Medeiros. – Campina Grande, 2016.
 58 f. : il. color.

 Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de
Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2016.
"Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa.
Referências.

 1. Engenharia Elétrica - Qualidade. 2. Acesso Remoto - Sistema. 3. Analisador
de Potência. 4. Qualímetro. I. Costa, Edson Guedes da. II. Universidade Federal de
Campina Grande, Campina Grande (PB). III. Título.

CDU 621.317(043)

**"SISTEMA FLEXÍVEL DE AQUISIÇÃO DE SINAIS DE GRANDEZAS ELÉTRICAS
APLICADO À QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA"**

EDDY LOPES MEDEIROS

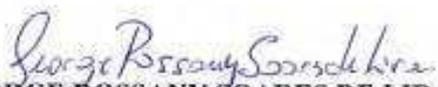
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 19/08/2016



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



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



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



GUTEMBERG GONÇALVES DOS SANTOS JÚNIOR, Dr., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por me dar saúde para seguir os caminhos que me levaram até aqui. Aos meus pais, Maria Luiza Lopes e José Edilson Medeiros, juntamente com meus irmãos: Elouise, Júnior e Mariah pelos sacrifícios feitos para me manter em uma cidade sozinho e por toda a força necessária para que eu continuasse em frente.

Agradeço também, a todos os meus amigos que fizeram presente durante o tempo que estive batalhando para conseguir terminar este trabalho de dissertação e que de alguma forma contribuíram para seu sucesso. Alguns deles merecem especial atenção como Ayslan Caisson, Victor “Vitrola”, Edgard Luiz, Gutemberg e os demais Leiamboys; Luciana Joviniano, Renata Garcia e os demais do meu segundo período, 2010.1; meus amigos que sempre estão presentes e que me escutam e me aconselham em todos os momentos: Victor Araújo, Luiza Pinheiro, Lucas Simões e Gibbran; e por último, mas não menos importantes, os meus amigos e colegas de profissão: Ceíça, Clayton, Daguia, Leandro e Roandson.

Agradeço ao meu orientador, Edson Guedes da Costa, pela paciência e tempo que me foram oferecidos. E ao professor George Lira que, mesmo não sendo oficialmente meu orientador, me sugeriu o tema, me acompanhou e me ajudou sempre que necessário para a realização desse trabalho.

Finalmente, agradeço a todos aqueles que contribuíram de alguma forma na concepção do sistema de aquisição, em especial a Alex Carlos.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de aquisição de dados de grandezas elétricas que seja adaptável para monitoramento e determinação de diversos parâmetros utilizados nos sistemas elétricos. Como uma forma de validação da adaptabilidade do dispositivo, neste trabalho é proposto um medidor de qualidade de energia trifásico de baixo custo. Devido as suas características, o medidor pode ser utilizado para uso residencial ou em pequenas empresas. O dispositivo proposto utiliza as definições de potência do IEEE Standard 1459-2010, além disso faz o cálculo das tensões e correntes eficazes, da taxa de distorção harmônica individual e total, além do fator de desequilíbrio das tensões. São apresentados resultados de simulação dos algoritmos de cálculos e resultados experimentais para a validação do medidor em diversas condições de alimentação e de carga. Os resultados são apresentados em uma página web que pode ser acessada por qualquer dispositivo com acesso à internet. Ao final do trabalho é constatado que a maior parte dos objetivos foram alcançados com sucesso, inclusive foi alcançado um baixo custo na concepção do sistema.

Palavras-Chaves: Acesso remoto; Analisador de potência; Aquisição de sinais de grandezas elétricas; Qualidade de energia elétrica; Qualímetro.

ABSTRACT

This work aims to develop an electrical data quantity acquisition system that is adaptable for monitoring and determining several parameters used in electrical systems. To validate the device's adaptability this paper proposes a low cost three-phase power quality meter. Due to its characteristics, the meter can be applied to residential or small businesses use. The proposed device is based on the power definitions from IEEE Standard 1459-2010. It calculates the rms voltage and current values, the total and individual harmonic distortion, besides the voltage unbalance factor. In order to evaluate algorithm of the power quality simulations results are presented and to evaluate the meter under various conditions and power loading experimental results are presented. The results are shown on a web page that can be accessed by any device with internet access. This work achieved successfully almost all the initial objectives including the low cost system's design.

Keywords: Electrical data quantity acquisition; Low cost meter, Power analyzer, Power quality, Remote access.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fig. 1: Nexus 1500.	33
Fig. 2: PowerXplores - PX5.	35
Fig. 3: Transitório impulsivo de corrente em consequência de um raio.....	39
Fig. 4: Transitório impulsivo – forma de onda da tensão.....	40
Fig. 5: Transitório oscilatório na corrente causado pela energização de capacitores <i>back-to-back</i>	40
Fig. 6: Transitório oscilatório na tensão causado pela energização de capacitores <i>back-to-back</i>	41
Fig. 7: Interrupção momentânea de tensão.....	43
Fig. 8: Afundamento de tensão.....	43
Fig. 9: Elevação de tensão.....	44
Fig. 10: Tensões desequilibradas em magnitude e fase.....	46
Fig. 11: Forma de onda e o espectro de frequência da corrente em um regulador de velocidade.....	48
Fig. 12: <i>Notching</i> de tensão causado pela operação de um conversor.....	51
Fig. 13: Ruído no sinal de tensão.....	52
Fig. 14: Flutuação de tensão.....	53
Fig. 15: BeagleBone Black.....	56
Fig. 16: Vistas de cima e de baixo da BBB identificando seus componentes.....	56
Fig. 17: <i>Cape LCD</i> para a BBB.....	59
Fig. 18: Conjuntos de pinos P9/P8.....	61
Fig. 19: Etapas para implantação de um programa na PRU-ICSS.....	62
Fig. 20: Decomposição da potência aparente pelo método IEEE std. 1459-2010.....	73
Fig. 21: Diagrama básico do qualímetro proposto.....	74
Fig. 22: Transdutor de corrente ACS712.....	74
Fig. 23: Circuito de aquisição para as tensões.....	75
Fig. 24: Circuito subtrator para o condicionamento da tensão de saída do transdutor de corrente.....	76
Fig. 25: Filtro passa baixas de primeira ordem.....	77
Fig. 26: Diagrama de blocos do MCP3008.....	77
Fig. 27: Arranjo experimental utilizado para a validação do medidor proposto.....	81
Fig. 28: Formas de onda das tensões adquiridas pelo MPBC – Experimento 1.....	84
Fig. 29: Formas de onda das tensões adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 1.....	84
Fig. 30: Formas de onda das correntes adquiridas pelo MPBC – Experimento 1.....	84
Fig. 31: Formas de onda das correntes adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 1.....	84
Fig. 32: Formas de onda de tensão e corrente na fase A adquirida pelo MPBC e pelo osciloscópio – Experimento 1.....	85
Fig. 33: Formas de onda das tensões adquiridas pelo MPBC – Experimento 2.....	89
Fig. 34: Formas de onda das correntes adquiridas pelo MPBC – Experimento 2.....	89

Fig. 35: Formas de onda das tensões adquiridas pelo MPBC – Experimento 3.	90
Fig. 36: Formas de onda das tensões adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 3.	90
Fig. 37: Formas de onda das correntes adquiridas pelo MPBC – Experimento 3.	90
Fig. 38: Formas de onda das correntes adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 3.	90
Fig. 39: Formas de onda de tensão e corrente na fase A adquirida pelo MPBC e pelo osciloscópio – Experimento 3.	91
Fig. 40: Formas de onda das tensões adquiridas pelo MPBC – Experimento 4.	93
Fig. 41: Formas de onda das tensões adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 4.	93
Fig. 42: Formas de onda das correntes adquiridas pelo MPBC – Experimento 4.	94
Fig. 43: Formas de onda das correntes adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 4.	94
Fig. 44: Formas de onda de tensão e corrente na fase A adquirida pelo MPBC e pelo osciloscópio – Experimento 4.	94
Fig. 45: Formas de onda das tensões adquiridas pelo MPBC – Experimento 5.	96
Fig. 46: Formas de onda das tensões adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 5.	96
Fig. 47: Formas de onda das correntes adquiridas pelo MPBC – Experimento 5.	97
Fig. 48: Formas de onda das correntes adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 5.	97
Fig. 49: Formas de onda de tensão e corrente na fase A adquirida pelo MPBC e pelo osciloscópio – Experimento 5.	97
Fig. 50: Formas de onda das tensões adquiridas pelo MPBC – Experimento 6.	99
Fig. 51: Formas de onda das tensões adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 6.	99
Fig. 52: Formas de onda das correntes adquiridas pelo MPBC – Experimento 6.	100
Fig. 53: Formas de onda das correntes adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 6.	100
Fig. 54: Amostras de sinais da tensão e da corrente na fase A adquiridos pelo osciloscópio e pelo medidor proposto – Experimento 6.	100
Fig. 55: Interface acessível pela Internet do medidor proposto.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Trabalhos que abordam as metodologias de cálculo de potência.....	26
Tabela 2: Resumo das características dos analisadores de energia encontrados na literatura..	29
Tabela 3: Categoria e características típicas dos distúrbios da QEE.....	38
Tabela 4: Classificação das VTCD segundo a ANEEL por meio do PRODIST módulo 8.	42
Tabela 5: VTLD segundo o IEEE.	44
Tabela 6: Valores de referências globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental).....	49
Tabela 7: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental).	49
Tabela 8: Níveis de tensão estabelecidos pela ANEEL para uma tensão contratada de 380/220 V.	52
Tabela 9: Componentes da BBB.	57
Tabela 10: Características dos pinos dos <i>headers</i> P8 e P9.....	58
Tabela 11: Configuração do pino GPIO.	60
Tabela 12: Parâmetros retirados de Will <i>et al.</i> (2011).....	82
Tabela 13: Parâmetros calculados pelo programa do MPBC.....	83
Tabela 14: Valores eficazes das tensões e correntes do experimento 1.	86
Tabela 15: Parâmetros calculados pelo MPBC no experimento 1.	87
Tabela 16: Parâmetros calculados com o algoritmo do Nexus 1500 no experimento 1.....	87
Tabela 17: Valores eficazes das tensões e correntes do experimento 2.	88
Tabela 18: Parâmetros calculados pelo MPBC no experimento 2.	88
Tabela 19: Parâmetros calculados com o algoritmo do Nexus 1500 no experimento 2.....	88
Tabela 20: Valores eficazes das tensões e correntes do experimento 3.	91
Tabela 21: Parâmetros calculados pelo MPBC no experimento 3.	92
Tabela 22: Parâmetros calculados com o algoritmo do Nexus 1500 no experimento 3.....	92
Tabela 23: Componentes harmônicas das tensões geradas pela fonte programável.	92
Tabela 24: Amplitude e fase das componentes harmônicas de tensão e corrente determinadas pelo MPBC no experimento 4.	93
Tabela 25: Valores eficazes das tensões e correntes do experimento 4.	95
Tabela 26: Parâmetros calculados pelo MPBC no experimento 4.	95
Tabela 27: Parâmetros calculados com o algoritmo do Nexus 1500 no experimento 4.....	95
Tabela 28: Valores eficazes das tensões e correntes do experimento 5.	96
Tabela 29: Parâmetros calculados pelo MPBC no experimento 5.	98
Tabela 30: Parâmetros calculados com o algoritmo do Nexus 1500 no experimento 5.....	98
Tabela 31: Componentes harmônicas das tensões geradas pela fonte programável.	99
Tabela 32: Amplitude das componentes harmônicas de tensão e corrente determinadas pelo MPBC no experimento 6.	101
Tabela 33: Valores RMS das tensões e correntes do experimento 6.....	101

Tabela 34: Parâmetros Calculados pelo MPBC no experimento 6.....	102
Tabela 35: Parâmetros calculados com o algoritmo do Nexus 1500 no experimento 6.	102
Tabela 36: Estimação financeira dos materiais utilizado no trabalho.....	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analog to Digital Converter.</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
ASD	<i>Adjustable-Speed Drive.</i>
BBB	<i>BeagleBone Black.</i>
CA	Corrente Alternada.
CC	Corrente Contínua.
CBQEE	Conferência Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica.
CCSv6	<i>Code Composer Studio v6.</i>
CGT	<i>Code Generation Tools.</i>
CI	Circuito Integrado.
CLP	Controlador Lógico Programável.
DFT	<i>Discrete Fourier Transform.</i>
DHI	Distorção Harmônica Individual.
DHT	Distorção Harmônica Total.
DTO	<i>Device Tree Overlay.</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor.</i>
E/S	Entrada/Saída.
EUA	Estados Unidos da América.
FD	Fator de Desequilíbrio.
FFT	<i>Fast Fourier Transform.</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Services.</i>
ICHQP	<i>International Conference on Harmonics and Quality of Power.</i>
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos.
LCD	<i>Liquid Crystal Display.</i>
MPBC	Medidor Proposto de Baixo Custo.
PC	<i>Personal Computer.</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>
PWM	<i>Pulse Width Modulated.</i>
QEE	Qualidade da Energia Elétrica.
RAM	<i>Random Access Memory.</i>
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer.</i>
RMS	<i>Root Mean Square.</i>
SBC	<i>Single Board Computer.</i>
SO	Sistema Operacional.
SOC	<i>System On Chip.</i>
TC	Transformador de Corrente.
USB	<i>Universal Serial Bus.</i>
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração.
VTLD	Variação de Tensão de Longa Duração.

SUMÁRIO

1	Introdução	19
1.1	Relevância do Tema.....	19
1.2	Motivação	21
1.3	Objetivo	21
1.4	Contribuições	22
1.5	Organização do Trabalho	22
2	Estado da Arte.....	25
2.1	Metodologias de Cálculos de Potência	25
2.2	Analísadores de Energia na Literatura.....	28
2.3	Analísadores de Energia no Mercado	31
2.4	<i>Single Board Computer</i>	35
3	Definições dos Parâmetros de QEE.....	37
3.1	Transitório.....	37
3.2	Variações de Tensão de Curta Duração	41
3.3	Variações de Tensão de Longa Duração.....	44
3.4	Desequilíbrio de Tensão	45
3.5	Distorção da Forma de Onda	46
3.6	Flutuação de Tensão	52
3.7	Variações de Frequência	53
4	<i>BeagleBone Black</i>	55
4.1	Características Gerais	55
4.2	<i>Device Tree Overlay</i>	59
4.3	PRU-ICSS	60
4.4	<i>Web Server</i>	62
5	Analísador de Energia Proposto.....	65
5.1	Cálculo do Valor Eficaz.....	65
5.2	Estimação da Frequência	66
5.3	Análise Harmônica	67
5.4	Estimação de Potência	68
5.5	Sistema de Aquisição de Dados.....	73
5.6	Monitoramento <i>On Line</i>	78
6	Resultados Experimentais	81

6.1	Arranjo experimental.....	81
6.2	Validação do Algoritmo de Cálculo.....	82
6.3	Resultados e Discussões.....	83
6.4	Discussões gerais.....	103
7	Estimação financeira.....	105
8	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	107
8.1	Conclusão.....	107
8.2	Trabalhos Futuros.....	108
	Referências Bibliográficas.....	109

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

Na conjuntura do mundo atual, com políticas voltadas à redução ou não implantação de usinas nucleares, o apelo ecológico e quase saturação de hidrelétricas, torna-se essencial o aumento da geração alternativa na matriz energética. No presente momento, a situação no Brasil é ainda mais crítica, que tem a sua matriz energética baseada na geração hídrica e tem vivenciado uma grande crise hídrica nos últimos anos.

A necessidade da promoção de uma política de incentivo à microgeração distribuída é uma alternativa inteligente às, poluentes e caras, termoelétricas. Porém, a geração individual, com placas fotovoltaicas ou mesmo microgeradores eólicos, para que seja mais eficiente e proveitosa tem que ser conectada à rede elétrica. Pelo exposto, torna-se necessário a aplicação de um aparelho especial que realize, no mínimo, o monitoramento da potência gerada versus consumida. O aparelho em questão é conhecido como medidor de energia eletrônico bidirecional, e se ele agregar outras funções, recebe o nome de medidor inteligente. Um medidor inteligente é caracterizado por ter funções de comunicação com centrais de gerenciamento das concessionárias; tarifação horo-sazonal; conexão ou desconexão em função de sistema de pré-pagamento de conta; dentre outras funções para permitir um melhor controle e monitoramento da rede.

No entanto, a cada dia que passa, os consumidores, também, estão interessados em ter informações sobre o que eles estão comprando e consumindo. Ademais, a utilização da microgeração pode impactar na qualidade da energia consumida devido, por exemplo, à irregularidade da potência gerada por conta da variação da incidência solar, intensidade dos ventos, etc. Diante de informações sobre a qualidade da energia elétrica (QEE) utilizada, o consumidor pode analisar e corrigir seu sistema de microgeração ou, então, exigir ressarcimentos por interrupções, quedas de energia, parâmetros fora dos limites contratados ou algum outro distúrbio da energia, se a responsabilidade for da concessionária.

Um distúrbio na qualidade da energia elétrica pode ser definido como qualquer perturbação encontrada na tensão, na corrente ou na frequência que resulta na falha, má operação ou redução da vida útil de um equipamento (DUGAN *et al.*, 2004).

Além das cogerações que geram potências variáveis, outros responsáveis que afetam a QEE são os equipamentos eletrônicos, tais como os reguladores de velocidade, controladores lógicos programáveis (CLP) e outros dispositivos que possuem fontes chaveadas, devido as suas características elétricas não-lineares. Além de serem grandes causadores, eles também são as maiores vítimas dos problemas na qualidade de energia.

Pesquisas desenvolvidas por Lineweber e McNulty (2001) estimam que os consumidores dos Estados Unidos da América (EUA) perdem entre 119 e 188 bilhões de dólares por ano devido a distúrbios na energia elétrica. Em alguns ramos de atividade, como as indústrias têxtil, siderúrgica e petroquímica, uma interrupção elétrica de até um minuto pode ocasionar prejuízos de até US\$ 500 mil (FRANCO, 2014).

Alguns dos prejuízos econômicos advêm da perda de produtividade, devido aos funcionários e aos equipamentos ociosos; dos dados perdidos; das transações perdidas; dos consumidores insatisfeitos; das horas-extras para compensar as horas de trabalho perdidas; dos equipamentos danificados; da perda de material e do tempo de espera para reinício da operação do sistema. Estes dois últimos podem ocorrer em empresas onde os processos produtivos são contínuos e que uma interrupção no processo resulta, frequentemente, no descarte do material e no reinício do processo. O descarte do material também pode acontecer devido ao mau funcionamento de equipamentos, decorrente de uma baixa qualidade da energia.

Por outro lado, o monitoramento pode ajudar a identificar a causa dos distúrbios no sistema de potência e até mesmo identificar condições de problemas antes que causem interrupções ou distúrbios (HE e ZHANG, 2008). Os responsáveis pela análise e monitoramento da QEE são os analisadores de energia, também conhecidos como qualímetro. Qualímetros são dispositivos que medem no ponto de estudo do sistema elétrico as correntes e tensões de fase e de neutro, quando existir, e com estas calculam certos parâmetros (níveis de tensão, distorção harmônica, fator de potência, frequência, dentre outros) que são usados para qualificar a energia elétrica.

Nesta perspectiva, aparentemente, torna-se pertinente o desenvolvimento de um sistema de aquisição de propósito geral que possa ser aplicado/adaptado às mais diversas especificidades dos sistemas residenciais e industriais para efeitos de medição e monitoramento. Para fácil adaptação às demais áreas, o sistema proposto deverá possuir um sistema de aquisição completo, com amostragem de quatro sinais de tensões e quatro sinais de correntes, o que permite a medição da tensão e corrente de neutro além das tensões e correntes de fase. Outro ponto importante para a versatilidade é a utilização de *softwares* de código aberto e de fácil atualização de seus programas de processamento dos dados coletados.

1.2 MOTIVAÇÃO

Atualmente, os sistemas de aquisição de dados e monitoramento de grandezas elétricas são destinados a funções específicas, tais como: monitoramento da qualidade da energia elétrica, medição de energia, detecção de faltas, medição de impedância, etc. Isso muitas vezes dificulta o monitoramento do sistema elétrico como um todo (seja residencial ou industrial), uma vez que seria necessário integrar diversas soluções fechadas para se poder realizar uma análise completa do estado operativo do sistema. Além do mais, um dispositivo capaz de integrar todas as funções supracitadas teria um valor no mercado inacessível para consumidores residenciais e pequenos empresários.

Sendo assim, torna-se necessário o desenvolvimento de um dispositivo, com custo acessível, que seja capaz de integrar as funcionalidades de atuação, monitoração e medição da energia elétrica que o usuário desejar, sem alteração do *hardware* e com fácil possibilidade de alteração no *software*.

1.3 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados de grandezas elétricas que seja adaptável para monitoramento e determinação de diversos parâmetros utilizados nos sistemas elétricos. Para validação, foi escolhido adequar o sistema para a medição e monitoramento de parâmetros que determinam a qualidade da energia elétrica.

Dentre os objetivos específicos deste trabalho destaca-se:

- Desenvolver rotinas para determinar: potência ativa, reativa e aparente, fator de potência, frequência de operação e valor RMS, valor de pico, distorção harmônica total (DHT) e distorção harmônica individual (DHI) de até a 50ª ordem para as tensões e correntes;
- Desenvolver meios para disponibilizar os resultados em uma página *web* através de uma conexão ethernet ou wifi, e desse modo poderem ser acessados com qualquer aparelho conectado à internet ou intranet (PC, *tablet* ou *smartphone*);
- Comparar o sistema proposto com os discutidos na literatura e com alguns dos encontrados no mercado.

1.4 CONTRIBUIÇÕES

A principal contribuição é desenvolver um dispositivo de aquisição de dados de grandezas elétricas aplicável a diversas áreas de medição e monitoramento da energia elétrica.

Os maiores diferenciais do sistema proposto são: flexibilidade na atuação (medidor de espectro amplo); medição e monitoramento em tempo real (agilidade nos diagnósticos e ações corretivas); acesso remoto; baixo custo (pode permitir maior difusão), possui saídas digitais (podem ser ligados a relés e servir para atuação em sistemas), etc.

O fato do sistema ser programável para alteração das rotinas de cálculos se torna uma vantagem na aplicação na QEE, pois ainda há uma discussão na literatura sobre qual o melhor e mais adequado método de cálculo de potência (FAZIO JUNIOR, 2011). O método utilizado neste trabalho é o método especificado pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE, 2010), por ser uma instituição reconhecida mundialmente por suas padronizações. Porém, caso seja encontrado um método mais adequado, o sistema poderá ser atualizado sem que seja necessário implantar ou substituir algum *hardware*.

O baixo custo é alcançado pelo fato de utilizar apenas componentes essenciais. Uma das consequências dessa escolha é a não utilização de *display* físico conectado ao dispositivo. Contudo, isso não se caracterizou como uma depreciação e sim como uma valorização devido à solução encontrada. A solução é a criação de um sistema de monitoração remoto *online*, o dispositivo cria uma página *web* para o acesso às informações pelo usuário que esteja conectado à mesma rede do sistema.

Com relação às publicações, foi publicado um artigo para o XI Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE) intitulado “Simulação e Medição de Distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica”. A conferência ocorreu entre os dias 7 e 10 de julho de 2015 na cidade de Campina Grande/PB. Outro artigo intitulado “A *Low Cost Power Quality Meter over the Internet*” foi aceito para publicação na 17ª *International Conference on Harmonics and Quality of Power* (17 IEEE PES ICHQP), que será realizada em Belo Horizonte – MG, nos dias 16 – 19 de outubro de 2016.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 2 é apresentado um levantamento do estado da arte, começando com o levantamento das metodologias de cálculo de potência, na sequência são apresentados e

discutidos os analisadores de energia encontrados na literatura e no mercado e, por fim realizada uma discussão dos avanços tecnológicos encontrados no processamento dos dados.

O Capítulo 3 introduz a teoria referente à Qualidade de Energia Elétrica, apresentando os distúrbios que influenciam na QEE.

No Capítulo 4 é descrito o computador de placa única utilizado no projeto.

Em seguida, a proposta do analisador de energia é apresentada no Capítulo 5, em que são descritos os métodos de cálculos dos parâmetros de qualidade de energia e aqueles necessários à aquisição dos dados.

O Capítulo 6 é reservado para apresentar os resultados experimentais.

No Capítulo 7 são descritos os custos dos componentes utilizados para a realização do sistema de aquisição.

As conclusões e propostas de trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 8.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 METODOLOGIAS DE CÁLCULOS DE POTÊNCIA

Em 1882 a história da energia elétrica foi marcada por uma descoberta que alterou significativamente a vida das pessoas. O inventor sérvio-americano, Nikola Tesla, descobriu o princípio de campo magnético rotativo, base das máquinas de corrente alternada. Ele provou que a melhor maneira de gerar, transmitir e distribuir energia elétrica aos consumidores seria usando circuitos trifásicos de tensão alternada.

Neste período e até há algumas décadas, as cargas ligadas à rede de distribuição eram predominantemente lineares (resistivas, indutivas e capacitivas): motores e lâmpadas incandescentes. A medição do consumo da energia era feita de forma adequada por medidores de energia eletromecânicos. Estes medidores calculavam a potência ativa e/ou reativa fundamental a partir dos valores eficazes fundamentais de tensão e corrente, juntamente com o ângulo de defasagem entre os mesmos (SOLON, 1980).

No entanto, as cargas foram se tornando cada dia mais não lineares, isto é, causam a circulação de correntes não senoidais, algumas devido a um processamento eletrônico da energia elétrica. Essas cargas trouxeram a vantagem de uma maior eficiência energética, porém, injetam harmônicas na rede de distribuição, resultando em distorções de corrente de neutro, superaquecimento de transformadores, entre outros problemas (FRAZIO JUNIOR, 2012).

Em condições não senoidais da tensão e da corrente além das condições de desequilíbrio das tensões, o método de cálculo de potências previamente citado se torna inexato, acarretando em erros de leitura dos medidores convencionais.

Com o objetivo de suprir as deficiências encontradas na metodologia convencional, a comunidade científica tem se esforçado para criar uma nova metodologia que contemple todos os fenômenos elétricos para o cálculo das potências.

Apesar dos muitos trabalhos realizados, expostos de forma cronológica na Tabela 1, ainda não foi consolidada uma metodologia que se adequasse a qualquer condição do sistema elétrico. Cada uma possui seus pontos fortes e fracos referentes aos tipos de aplicações. 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) e Alves (2015) elaboraram o resumo das características e equacionamentos das principais teorias.

Tabela 1: Trabalhos que abordam as metodologias de cálculo de potência.

	Autores	Título	Ano
1	C Budeanu	Budeanu's power theory	1927
2	S Fryze	Orthogonal currents	1931
3	E. W. Kimbark	Direct current transmission	1971
4	W Shepherd & P Zakikhani	Definition of reactive power	1972
5	D Sharon	Reactive power definitions	1973
6	H Depenbrock	The first harmonic of voltage and current	1979
7	N L Kuster's & M J M Moore	Definition of reactive power	1980
8	C H Page	Reactive power definition	1980
9	G Nomowesjki	Generalised theory of electrical power	1981
10	Akagi & Nabae	Original p-q theory	1983
11	LS Czarnecki	CPC Theory	1988
12	M D Slonim & J D Van Wyck	Definition of active, reactive and apparent powers with clear physical interpretation	1988
13	J H Enslin & J D Van Wyck	Load related time domain generalized definitions	1988
14	I Takahashi	Instantaneous Vectors	1988
15	M J Robinson & P H G Allen	Power factor and quadergy definitions	1989
16	T Furuhasi	Theory of instantaneous reactive power	1990
17	Ferrero e Superti-Furga	The Park power theory	1991
18	P S Fillipski	Elucidation of apparent power and power factor	1991
19	A Ferrero & G Superti-Furga	Power using Park's transform	1991
20	M. Depenbrock	The fdb-method, a generally applicable tool for analyzing power relations	1992
21	Willems	Generalized Akagi's and Ferrero's p-q power theories	1992
22	Willems	Instantaneous voltage and current vectors	1993
23	E H Watanabe	Generalised theory of instantaneous power α - β -0 transformation	1993
24	Rossetto e Tenti	Instantaneous orthogonal currents	1994
25	Akagi & Nabae	Modified p-q theory	1994
26	IEEE Working Group	Practical power definitions	1995
27	F Z Peng & J S Lai	Generalised instantaneous reactive power theory	1996
28	D Sharon	Power factor definitions	1996
29	A Nabae & T Tanaka	Power based on instantaneous space vector	1996
30	L M Dalgerti	Concepts based on instantaneous complex power approach	1996
31	H Akagi & K Hyosung	Instantaneous power theory based on mapping matrices	1996
32	Nils & Marja	Vector space decomposition of reactive power	1997
33	A E Emanuel	Definitions of apparent power	1998
34	K Hyusong & H Akagi	Instantaneous p-q-r power theory	1999
35	J Cohen, F Keon & K M Hernandez	Time domain representation of powers	1999
36	F Ghassemi	Definition of apparent power based on modified voltage	2000

	Autores	Título	Ano
37	F Z Peng & L M Tolbert	Definitions of nonactive power from compensation standpoint	2000
38	S K Chen & G W Chang	Instantaneous power theory based on active filter	2000
39	IEEE Std 1459	Definitions for the measurement of electric power quantities	2000
40	H Lev-Ari & A M Stankivic	Reactive power definition via local Fourier transform	2002
41	M Depenbrock	FBD Method	2003
42	P Tenti & P Mattaveli	A time-domain approach to power term definitions under non-sinusoidal conditions	2003
43	A Menti T Zacharias & J Milians-Argitis	Introduced the framework of Geometric Algebra to non-sinusoidal power theory	2007
44	M Castilla <i>et al.</i>	Extended the use of Geometric Algebra in non-sinusoidal power theory	2009
45	IEEE Std 1459	Definitions for the measurement of electric power quantities	2010

Fonte: Lima (2014), adaptado pelo autor.

Em resumo, as metodologias para o cálculo de potência podem ser divididas em duas vertentes, a primeira forma uma classe cujas definições e equacionamentos são realizados no domínio da frequência. Os principais trabalhos dessa classe são Budeanu (1927); Kimbark (1971); Shepherd e Zakikhani (1972); Czarnecki (1988); IEEE Standard 1459 (2000) e (2010). A abordagem é baseada no espectro harmônico da tensão e corrente. A motivação principal é a definição de grandezas que possam ser aplicadas a sistemas de medição e tarifação de energia. A segunda vertente forma a classe daquelas definidas no domínio do tempo. De uma maneira evolutiva, os principais trabalhos são Fryze (1932); Akagi, Kanazawa e Nabae (1983); Depenbrock (1979); Depenbrock (1992); Rossetto e Tenti (1994); Willems (1992); Tenti e Mattaveli (2003). Esses trabalhos eram motivados pela compensação de distúrbios. Atualmente ambos os domínios podem ser aplicados tanto para medição quanto para compensação.

O IEEE Standard 1459 - 2010 define a medição de potência em condições senoidais, não senoidais, balanceado e não balanceado. Sua primeira publicação foi em janeiro de 2000. Depois de sua publicação, várias discussões sobre suas definições foram feitas por Hughes (2002); Segui-Chilet *et al.* (2007); Morsi e El-Hawary (2008); Orts-Grau *et al.* (2011), e em março de 2010 uma revisão do padrão foi lançada. Na nova versão, correções e modificações foram feitas com o intuito de reger ou definir novos parâmetros elétricos.

No IEEE 1459 tem-se a definição da potência medida quando a tensão e a corrente são não senoidais, quando a carga é desbalanceada ou a tensão é assimétrica e quando a energia dissipada pelo neutro é substancial. As definições foram desenvolvidas para guiar quais parâmetros devem ser medidos e monitorados para tarifação, decisões econômicas e

determinação dos maiores poluidores harmônicos. Ele inclui os cálculos das potências aparente, ativa e reativa, além do fator de potência.

2.2 ANALISADORES DE ENERGIA NA LITERATURA

A importância de analisar a qualidade da energia é indiscutível. Diversas pesquisas já demonstraram o benefício de um monitoramento contínuo da qualidade da energia para identificar futuras falhas de equipamentos (JONES, 1998). A poluição harmônica, por exemplo, é responsável por muitos problemas, tais quais: maiores perdas nas linhas de transmissão, sobreaquecimento de máquinas, funcionamento inadequado de relés e disjuntores, etc. (YANG, 2005). Tais problemas advêm das correntes harmônicas que não geram energias úteis aos dispositivos. Em relação aos relés e disjuntores é devido a estes considerarem as harmônicas como uma sobretensão ou sobrecorrente, levando-os às suas atuações inadvertidamente.

Um dos primeiros trabalhos encontrados na literatura sobre o desenvolvimento de um dispositivo para monitorar a energia foi o de Montensen e Johnson (1988). Nele, eram medidos e armazenados os sinais de tensão e corrente, em seguida os dados eram transferidos para um computador, onde era realizada a análise espectral de 63 harmônicas.

Com o passar do tempo, os dispositivos desenvolvidos começaram a calcular mais parâmetros de qualidade de energia como análise de *sags*, *swells*, interrupções, *flicker*, desbalanceamento e cálculos de valores eficazes verdadeiros (*true RMS*), DHT, DHI, frequência, fator de potência e potências aparente, ativa e reativa. Na Tabela 2 é apresentado um resumo com os parâmetros calculados corresponde a cada autor, além de outras características relevantes.

A partir da Tabela 2, constata-se que muitos autores optaram por fazer a aquisição dos dados e no máximo pequenos cálculos em um dispositivo composto por um DSP (*Digital Signal Processor*, em português: processador de sinais digitais), deixando o processamento maior, além da disponibilização dos resultados, em um computador pessoal. Outros autores fizeram seus dispositivos mais independentes, centralizando o processamento dos dados no próprio dispositivo. Alguns destes, utilizaram um Circuito Integrado (CI) encarregado pelos cálculos de alguns dos parâmetros de QEE, necessitando apenas das entradas dos sinais de tensão e corrente. Uma desvantagem da utilização de tais circuitos é a impossibilidade de alterar os métodos de cálculos dos parâmetros, visto que não há um método consolidado e exato para todas as situações.

Quando se analisa os dispositivos desenvolvidos em termo de disponibilização dos dados foi visto que a maioria utiliza o computador, poucos possuem um *display* próprio devido ao custo financeiro e à necessidade de um maior processamento. Para a transmissão dos dados foi visto que possuem várias formas: USB (*Universal Serial Bus*, em português: barramento serial universal), GPRS (*General Packet Radio Services*, em português: serviços gerais de pacote por rádio), *ZigBee*, ethernet e outros. Os dispositivos que fazem a comunicação via ethernet, do modo que foram desenvolvidos, ficam restritos a se comunicar apenas com um receptor específico, pois funcionam como cliente no padrão TCP/IP.

Os únicos que se preocuparam em medir a corrente de neutro foram Will *et al.* (2011) e Souza *et al.* (2015), os quais poderiam ser implantados em sistemas 4 fios e medir uma possível corrente de fuga. Além da corrente, em Souza *et al.* (2015), também é medida a tensão de neutro.

Tabela 2: Resumo das características dos analisadores de energia encontrados na literatura.

Autor e ano	Grandezas medidas	Parâmetros calculados	Cálculo dos parâmetros onboard	Apresentação dos dados	Obs.
Mortensen e Johnson (1988)	Tensão e corrente	63 harmônicas	No PC	PC	Armazena até 1 semana de dados
Chen <i>et al.</i> (2000)	Tensões e correntes	Análise harmônica e análise de <i>sags</i>	DSP para aquisição.	PC + ethernet	Utiliza um dsp para melhorar a performance do PC
Lakshmikanth (2001)	1 tensão	Forma de onda, <i>true RMS</i> , fundamental, DHT e índice de distorção	DSP para aquisição	PC	Objetivo principal é mostrar o uso do DSP para várias aplicações
Nam <i>et al.</i> (2004)	1 a 3 tensões	Tensão, tempo e forma de onda em eventos de harmônicas, <i>sag</i> , <i>swell</i> , <i>flicker</i> , interrupção, desbalanceamento e surtos.	DSP	PC via RS232 ou ethernet	Possui uma bateria

Autor e ano	Grandezas medidas	Parâmetros calculados	Cálculo dos parâmetros onboard	Apresentação dos dados	Obs.
Wei et al. (2006)	3 tensões e 3 correntes	Valor RMS, harmônicas, flicker, desequilíbrio, f , DHT, P e Q.	DSP (FFT e RMS) + PC	PC via interface PCI	
Yingkayun et al. (2009)	3 tensões e 3 correntes	Tensões e correntes RMS, forma de onda, detecção de <i>sags</i> , <i>swells</i> e interrupções	CI (ADE7758)	LCD e ethernet	Armazena os dados no formato CSV em um cartão SD
Zhang e Li (2009)	Tensão e corrente	Valores RMS, DHT, P, S, FP, harmônicas	No PC	PC via ethernet	Utiliza <i>wavelet</i>
Colnago et al. (2010)	3 tensões	Tensão RMS, DHT e DHI até a 25ª, flutuação, desequilíbrio, VTCD e interrupção da tensão	Sim	Servidor remoto via GPRS e internet	Segue as normas brasileiras e possui bateria.
Gao et al. (2011)	3 tensões e 3 correntes	Harmônicas	Sim	LCD	Propõe um rastreamento da frequência.
Will et al. (2011)	3 tensões e 4 correntes	Valores RMS, S, P, Q, FP, DHT.	No PC	PC via <i>USB</i>	Utiliza o IEEE std. 1459
Abidullah et al. (2013)	1 tensão e 1 corrente	RMS, DHT, DNHT, S, P, Q, FP e f	PC	PC	Utiliza transdutores de corrente e de tensão e um cartão de aquisição para o PC.
Li e Lianping (2013)	1 tensão e 1 corrente	Análise harmônica, f , P e Q	Sim	PC via RS485	

Autor e ano	Grandezas medidas	Parâmetros calculados	Cálculo dos parâmetros onboard	Apresentação dos dados	Obs.
Gao e Zhou (2014)	1 tensão e 1 corrente	Tensão, corrente, análise harmônica, S, P, Q, f e θ .	DSP + PC	LCD, Mini impressora ou computador	Propõe um cálculo mais preciso para FFT.
Souza <i>et al.</i> (2015)	4 tensões, 4 correntes e 4 temperaturas	S, P, Q, FP	Sim	PC via <i>wifi</i> (ad-hoc)	Utiliza o método CPT para o cálculo das potências
Fonsêca (2015)	3 tensões, 3 correntes e 1 temperatura	Valores RMS, DHI, DHT, S, FP e temperatura	CI (ADE7880)	PC via <i>ZigBee</i>	Foi desenvolvido para monitorar transformadores trifásicos.

S = potência aparente; P = potência ativa; Q = potência reativa; FP = fator de potência; f = frequência; θ = ângulo de fase; VTCD = variação de tensão de curta duração; DHT = distorção harmônica total; DHI = distorção harmônica individual.

2.3 ANALISADORES DE ENERGIA NO MERCADO

Em Instrumart (2016) foram encontrados alguns qualímetros de alguns milhares a algumas dezenas de milhares de dólares, no Brasil seriam no mínimo duas vezes mais caros devido ao transporte e impostos de importação. Estes qualímetros são mais completos, contudo dependendo de sua aplicação eles podem vir com mais ou menos funções. Isto é, caso o dispositivo seja portátil para uso em situações variadas, como o caso de manutenção, não é necessário possuir alarmes nem saídas para atuações de relés, por exemplo. Já no caso de o dispositivo possuir local fixo, para um monitoramento geral, como na entrada de um sistema, seria útil possuir tais funções (BINGHAM, 2008).

Dois qualímetros de alto desempenho, conseqüentemente alto custo (dezenas de milhares de reais) são o *NEXUS 1500* da *Electro Industries* e o *PowerXplorer - PX5* da *Dranetz*. O Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande, local de desenvolvimento deste trabalho de mestrado possui ambos qualímetros. Suas principais características são apresentadas a seguir.

2.3.1 NEXUS 1500

O Nexus faz parte de uma nova geração de medidores de qualidade de energia. Ele é um dos mais completos encontrados no mercado, possui até mesmo auto calibração em função da temperatura e do tempo. A seguir são apresentadas suas principais características (ELECTRO INDUSTRIES, 2014):

- 4 entradas de correntes (até 5 A nominal);
- 4 entradas de tensões: 5-347 V_{AC}, tensão de fase ou 10-600 V_{AC}, tensão de linha;
- Frequências de 45-69,9 Hz;
- 8 entradas rápidas de status (medir temperatura, pressão, etc.);
- Tela LCD (*Liquid Crystal Display*, em português: *display* de cristal líquido) touchscreen;
- Até 1024 amostras por ciclo (programável);
- Até 1 Gb de memória;
- 16 *bits* de resolução;
- USB;
- Porta RJ45 ethernet;
- 2ª porta ethernet opcional RJ45 ou fibra ótica;
- 2 portas RS485 opcionais;
- Exatidão de 0,1% do valor de leitura;
- Entradas (analógicas) e saídas (analógicas, a relé ou pulso de estado sólido) em módulos externos;
- Massa de 2,3 kg.

As suas principais funções são expostas abaixo (ELECTRO INDUSTRIES, 2014):

- Compensação de perdas do transformador ou da linha;
- Cálculo do consumo e da demanda de forma bidirecional, calendário de 20 anos;
- Predição de demanda – o medidor prediz o pico de demanda do próximo intervalo de demanda;
- Gravação das formas de onda e as faltas – grava as tensões e correntes com análise pré ou pós evento. Pode programar para gravar os eventos de transitórios, elevação e afundamento de tensão;
- Medição de *Flicker* segundo a norma IEC 61000-4-15;

- Geração de relatórios das condições de qualidade de energia elétrica usando a metodologia do IEC 61000-4-30 Class A;
- Visualização da magnitude das harmônicas até a 512ª ordem para cada canal de tensão e corrente;
- Magnitudes em tempo real das harmônicas até a 128ª ordem;
- Cálculo do DHT e do fator K;
- Gravação de transitórios de até 10 MHz \pm 1,8 kV;
- Análise fasorial – mostra a defasagem entre as correntes e as tensões em formato fasorial;
- Alarmes de ultrapassagem de limites de tensão;
- Cálculo das energias ativa, reativa e aparente;
- Cálculo das potências ativa, reativa e aparente;
- Cálculo do fator de potência;
- Cálculo do valor eficaz verdadeiro.

As inúmeras funções descritas classificam o qualímetro Nexus 1500 como de última geração. Porém, algumas desvantagens foram observadas: é necessário possuir um programa de código fechado para programá-lo e visualizar os dados sem a utilização do seu LCD; é projetado para ser alocado em um painel, ou seja, grande, pesado e de difícil manuseio; tem que ser acoplado a TC (transformadores de corrente) por possuir uma entrada de corrente de 5 A nominal; é alimentado pela rede e não possui nenhum tipo de bateria ficando sensível à distúrbios na rede de alimentação e por último o seu alto custo (superior a R\$ 50 mil reais). Na Fig. 1 é mostrado uma imagem do Nexus 1500.

Fig. 1: Nexus 1500.



Fonte: Electro Industries (2014).

2.3.2 POWERXPLORER - PX5

O PX5 é um modelo já utilizado há algum tempo no laboratório. Suas características são mostradas abaixo (DRANETZ, 2014):

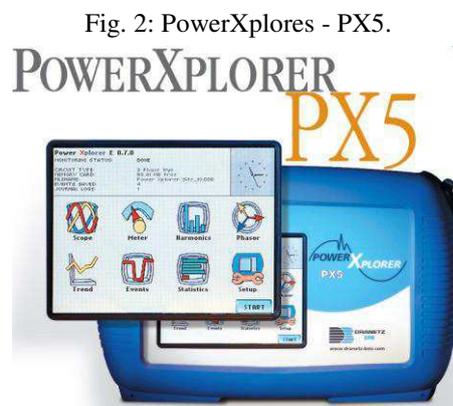
- 4 entradas diferenciais de tensões (1-600 V_{RMS}), CA/CC;
- 4 entradas de correntes com TC;
- 256 amostras por ciclo;
- 16 *bits* de resolução;
- 1 MHz de amostragem rápida com 14 *bits* de resolução;
- Variação de frequência com 10 mHz de resolução: 15-20 Hz, 45-65 Hz ou 350-450 Hz;
- Tela LCD *touchscreen*;
- Memória removível de 32-128 MB;
- Massa de 1,9 kg;
- Bateria.

As suas principais funções são exibidas abaixo (DRANETZ, 2014):

- Calcula potência ativa, reativa e aparente;
- Calcula energia ativa, reativa e aparente;
- Calcula demanda;
- Calcula fator de potência total e de deslocamento;
- Mede parâmetros de distorção e desequilíbrio do IEEE 1459;
- Calcula as harmônicas e inter-harmônicas pelo IEC 61000-4-7;
- Calcula a DHT até a 63^a ordem;
- Calcula a DHI até a 63^a;
- Calcula o *Flicker* pelo IEC 61000-4-15 (Pst, Plt, *Sliding Plt*);
- Calcula o fator de crista, fator k e fator de interferência telefônica;
- Mede o desequilíbrio e as componentes de sequência;
- Grava a forma de onda de distúrbios: elevação, afundamento, interrupções, transitórios de baixa e média frequência;
- Amostra em 32 amostras/ciclo, com um passo de ciclo a 400 Hz, transitórios de alta frequência, utilizando o modelo PX5-400.

Este qualímetro comparado ao Nexus 1500 possui menos funções e contém algumas características inferiores de aquisição de dados (número de amostras por ciclo e registro de transitórios com máxima frequência inferior). Porém, continua sendo um qualímetro de alto desempenho. Outra vantagem é a presença de uma bateria que o torna menos sensível a distúrbios presentes na rede de alimentação. Suas desvantagens são a necessidade de o operador se deslocar até a localização do dispositivo para adquirir os dados e seu alto custo (US\$ 15 mil na época da aquisição nos Estados Unidos). Na Fig. 2 é mostrada uma imagem do PX5.

Uma desvantagem comum aos qualímetros encontrados no mercado é a utilização de *softwares* fechados, impossibilitando a mudança dos métodos de cálculos e outras funções sem depender do fabricante.



Fonte: Dranetz (2014).

2.4 SINGLE BOARD COMPUTER

Single Board Computer (SBC) é traduzido para o português como computador de placa única, ou seja, é um computador completo construído em uma única placa de circuito. Ele é composto por um microprocessador com memória, entradas/saídas (E/S) e todas as outras características necessárias para ser um computador funcional em uma placa.

O *dyna-micro*, lançado em 1976, foi o primeiro verdadeiro SBC. Ele foi renomeado pela *E&L Instruments* como o *MMD-1 (Mini-Micro Designer 1)*. O SBC difere das tradicionais placas-mães produzidas em massa pois estas possuíam *slots* de expansão para muitos periféricos adicionais como placas de áudio, de vídeo e de rede. Hoje, algumas placas-mães poderiam ser consideradas SBC nas mais necessárias funcionalidades existentes em uma placa-mãe simples, com o benefício de ser aprimorada por meio do uso de placas adicionais.

Basicamente, os SBC surgiram como um *kit* de desenvolvimento para os engenheiros dos fabricantes testarem novos produtos lançados, especialmente microcontroladores. Porém,

há, aproximadamente, dez anos em Ivrea na Itália, um time de desenvolvedores estava procurando desenvolver um *kit* de desenvolvimento de baixo custo que permitisse as pessoas de todos os níveis de conhecimento fazerem seus próprios projetos microcontrolados. Isto marcou o começo da plataforma *Arduino*TM.

Devido à rápida aceitação dessa plataforma de prototipagem pelo mercado, fez o custo dos microprocessadores e dos SOC (*System On Chip*, em português: sistemas em *chip*) reduzir drasticamente.

Em julho de 2008 nasceu a organização sem fins lucrativos *BeagleBoard.org*. Ela foi formada para trazer modernos microprocessadores às mãos de engenheiros e desenvolvedores a baixo custo, uma plataforma de desenvolvimento *open source* conhecida como *BeagleBoard*.

Com o sucesso do *Arduino*TM e da *BeagleBoard*, foram surgindo outros SBC, como o *Raspberry Pi*. Ele surgiu endereçado a possibilitar crianças a aprenderem programação sem a necessidade de um completo computador pessoal. O *Raspberry Pi* e outros concorrentes, excetuando o *Arduino*TM, possuem uma vantagem enorme que é a possibilidade de instalar um Sistema Operacional (SO) para facilitar a programação de tarefas mais complexas.

Com o passar do tempo surgiram novos SBC e novas versões dos já existentes, como é o caso da *BeagleBone Black* (BBB), lançado em 2013. Algumas mudanças foram incorporadas como o aumento da memória RAM (*Random Access Memory*, em português: memória de acesso aleatório) para 512 MB, o *clock* do processador de 1 GHz, foi acrescentado uma saída de vídeo HDMI e 2 GB de eMMC de memória *flash*. Levando em conta o custo-benefício, a BBB se sobressaiu em um comparativo entre vários SBC disponíveis na época de projeto deste trabalho (WIKIPEDIA, 2014). Em especial, o poder de processamento, os periféricos disponíveis (entrada USB, ethernet, número de pinos de E/S e memória) e o preço são fatores a serem considerados.

Neste capítulo foram abordados sistemas que já existem ou que vêm sendo desenvolvidos com a finalidade de medir e monitorar os parâmetros de qualidade de energia elétrica. Assim como técnicas em estudo para o cálculo de parâmetros de potência e os dispositivos que estão surgindo para facilitar o desenvolvimento de projetos microcontrolados. Todos esses assuntos servirão de base no desenvolvimento do dispositivo proposto. No próximo capítulo será abordado o tema de qualidade de energia abordando os principais distúrbios que afetam os sistemas elétricos.

3 DEFINIÇÕES DOS PARÂMETROS DE QEE

A crescente utilização de cargas sensíveis faz com que haja uma maior atenção para a qualidade da energia elétrica dos sistemas em que elas estão conectadas. As cargas sensíveis são dispositivos que seu funcionamento é afetado na presença de variações de tensão de curta duração, tais como: fontes de alimentação chaveada, CLP, contadores, solenoides, acionamentos a velocidade variável (em inglês, *Adjustable-Speed Drive* - ASD), retificadores, computadores, entre outros.

Os distúrbios da QEE podem surgir devido a inúmeras fontes incluindo faltas, descargas atmosféricas, chaveamento de capacitores, ressonância harmônica, entrada de grandes cargas, equipamentos desbalanceados ou sobrecarregados, conexões de alta impedância e aterramento mal projetado (DUNGAN *et al.*, 2004). Na Tabela 3 estão resumidos os distúrbios com suas características típicas segundo o IEEE (2009).

Para facilitar o entendimento, a seguir serão descritas as características, as principais fontes e consequências das principais perturbações que podem surgir nos sistemas elétricos.

3.1 TRANSITÓRIO

Transitório eletromagnético pode ser caracterizado como uma perturbação na forma de onda alternada, de tensão ou de corrente, evidenciada por uma acentuada descontinuidade no sinal. Pode ser de ambas as polaridades e pode ser aditiva ou subtrativa da forma de onda nominal. Ele também é caracterizado por ser de curta duração e alta amplitude e suas características são predominantemente determinadas pela resistência, indutância e capacitância da rede de potência no ponto de interesse. Os transitórios podem provocar a atuação da proteção ou produzir esforços elétricos, mecânicos e térmicos nos equipamentos.

Tabela 3: Categoria e características típicas dos distúrbios da QEE.

Categoria	Conteúdo espectral típico	Duração típica	Magnitude de tensão típica
1.0 Transitório			
1.1 Impulsivo			
1.1.1 Nanosegundo	5 ns subida	< 50 ns	
1.1.2 Microsegundo	1 µs subida	50 ns – 1 ms	
1.1.3 Milissegundo	0,1 ms subida	> 1 ms	
1.2 Oscilatório			
1.2.1 Baixa frequência	< 5 kHz	0,3-50 ms	0-4 p.u.
1.2.2 Média frequência	5-500 kHz	20 µs	0-8 p.u.
1.2.3 Alta frequência	0,5-5 MHz	5 µs	0-4 p.u.
2.0 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			
2.1.1 Interrupção		0,5 ciclos – 3 s	< 0,1 p.u.
2.1.2 Afundamento		30 ciclos – 3 s	0,1-0,9 p.u.
2.1.3 Elevação		30 ciclos – 3 s	1,1-1,4 p.u.
2.3 Temporário			
2.1.1 Interrupção		>3 s – 1 min	< 0,1 p.u.
2.1.2 Afundamento		>3 s – 1 min	0,1-0,9 p.u.
2.1.3 Elevação		>3 s – 1 min	1,1-1,2 p.u.
3.0 Variação de tensão de longa-duração			
3.1 Interrupção sustentada		> 1 min	0,0 p.u.
3.2 Subtensão		> 1 min	0,8-0,9 p.u.
3.3 Sobretensão		> 1 min	1,1-1,2 p.u.
3.4 Sobrecarga de corrente		> 1 min	
4.0 Desequilíbrio			
4.1 Tensão		Regime permanente	0,5-2%
4.2 Corrente		Regime permanente	1,0-30%
5.0 Distorção da forma de onda			
5.1 Nível CC		Regime permanente	0-0,1%
5.2 Harmônicas	0-9 kHz	Regime permanente	0-20%
5.3 Inter-harmônicas	0-9 kHz	Regime permanente	0-2%
5.4 <i>Notching</i>		Regime permanente	
5.5 Ruído	Banda larga	Regime permanente	0-1%
6.0 Flutuação de tensão	< 25 Hz	Intermitente	0,1-7%
7.0 Variações de frequência		< 10 s	± 0,10 Hz

Fonte: IEEE (2009), adaptado pelo autor.

Quando se analisa os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), verifica-se que não existe classificação para eventos transitórios com duração menor ou igual a um ciclo da tensão da rede elétrica (ANEEL, 2013). Os PRODIST são documentos elaborados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica)

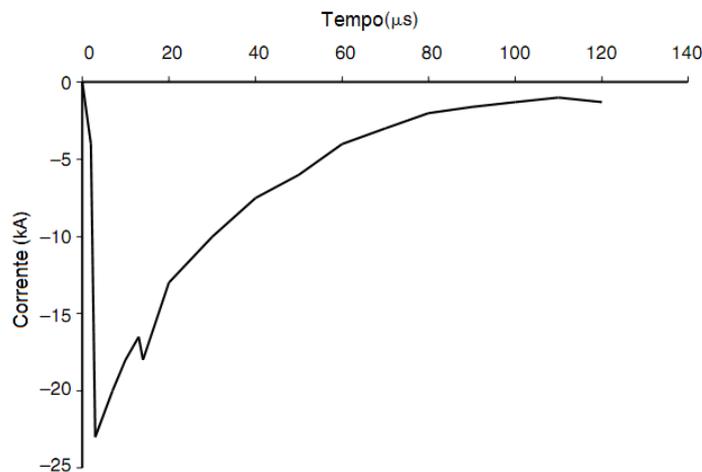
que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica no Brasil. Contudo, pela norma americana (IEEE, 2009) os transitórios de tensão são classificados em impulsivos e oscilatórios.

3.1.1 TRANSITÓRIO IMPULSIVO

Um transitório impulsivo é uma súbita mudança na tensão, na corrente ou em ambas de forma unidirecional em polaridade (positiva ou negativa), em uma frequência diferente da frequência fundamental do sistema. Ele é caracterizado pelo seu tempo de subida e descida, por exemplo: um transitório impulsivo 1,2/50 μs 2000 volt dura 1,2 μs para atingir seu pico de 2 kV e decai a metade de seu valor em 50 μs , após a crista. As descargas atmosféricas são suas causas mais comuns. Na Fig. 3 é ilustrado um transitório impulsivo de corrente causado por um raio.

Os transitórios impulsivos são classificados em nanossegundos, microssegundos e milissegundos como apresentado na Tabela 3, como também, são apresentadas as características típicas para o conteúdo espectral e duração.

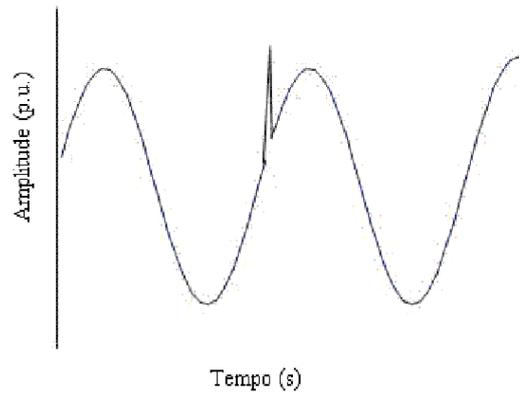
Fig. 3: Transitório impulsivo de corrente em consequência de um raio.



Fonte: IEEE (2009), adaptado pelo autor.

Como consequência da variação brusca do sinal de corrente, surgem sobretensões transitórias pelo sistema elétrico. Na Fig. 4 é exemplificado o efeito da variação de tensão decorrente de uma descarga atmosférica.

Fig. 4: Transitório impulsivo – forma de onda da tensão.

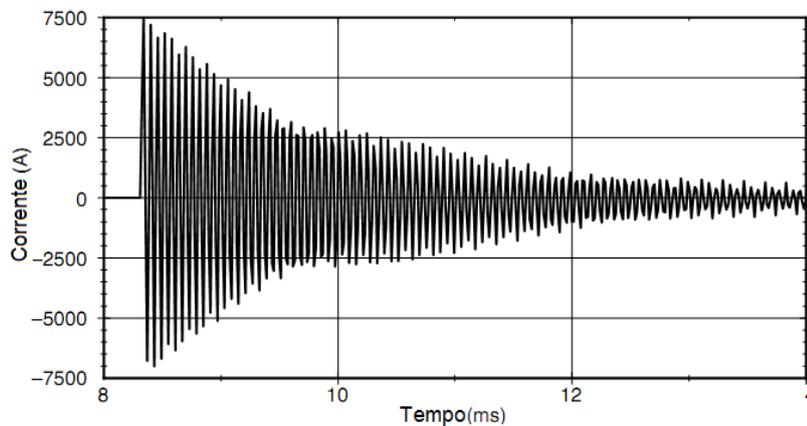


Fonte: Araújo e Neves (2005).

3.1.2 TRANSITÓRIO OSCILATÓRIO

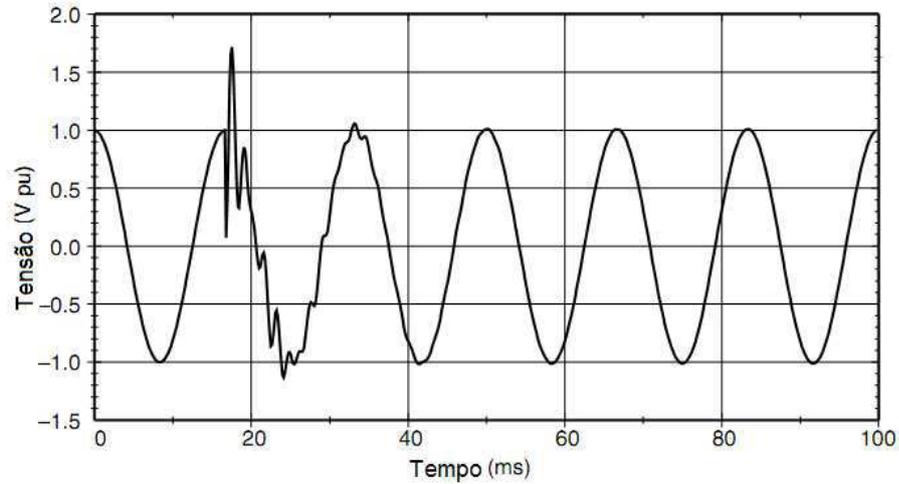
Um transitório oscilatório é uma súbita mudança na tensão, na corrente ou em ambas que inclui as polaridades positiva e negativa em uma frequência diferente da fundamental do sistema.

Um transitório oscilatório consiste em uma tensão ou corrente no qual seu valor instantâneo inverte a polaridade rapidamente. Ele é descrito por seu conteúdo espectral, duração e magnitude, e é classificado em alta, média e baixa frequência como apresentado na Tabela 3. Os transitórios oscilatórios podem ser resultados de uma resposta do sistema local a um transitório impulsivo, também podem ser causados pela energização de capacitores *back-to-back* (Figs. 5 e 6) ou por comutação de grandes linhas de transmissão.

Fig. 5: Transitório oscilatório na corrente causado pela energização de capacitores *back-to-back*.

Fonte: IEEE (2009), adaptado pelo autor.

Fig. 6: Transitório oscilatório na tensão causado pela energização de capacitores *back-to-back*.



Fonte: Dugan *et al.*(2004), adaptado pelo autor.

3.2 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

As variações de tensão de curta duração (VTCD) são variações no valor eficaz da tensão em um curto intervalo de tempo, de no máximo um minuto. Tais variações de tensões são, geralmente, causadas por energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida, ou por intermitentes falhas nas conexões dos cabos do sistema. Dependendo da localização da falta e das condições do sistema, a falta pode causar temporariamente tanto a queda, a elevação ou até a perda completa de tensão.

No PRODIST as VTCD são classificadas e caracterizadas de acordo com a Tabela 4. Comparando com as características presentes na Tabela 3, constata-se uma diferença referente às elevações de tensão. No PRODIST não há limite no valor da tensão eficaz, enquanto que o IEEE define um limite superior diferente para cada classificação (momentânea/temporária). Outra diferença é que no primeiro não existe a classificação para variação instantânea de tensão, sendo englobada em variação momentânea de tensão.

O tempo de uma VTCD no sistema trifásico deve ser caracterizado pelo início do primeiro evento que transpõe determinado limite até o instante em que o último dos eventos retorna para dentro do limite. Assim, eventos simultâneos são agregados compondo um único evento.

Tabela 4: Classificação das VTCD segundo a ANEEL por meio do PRODIST módulo 8.

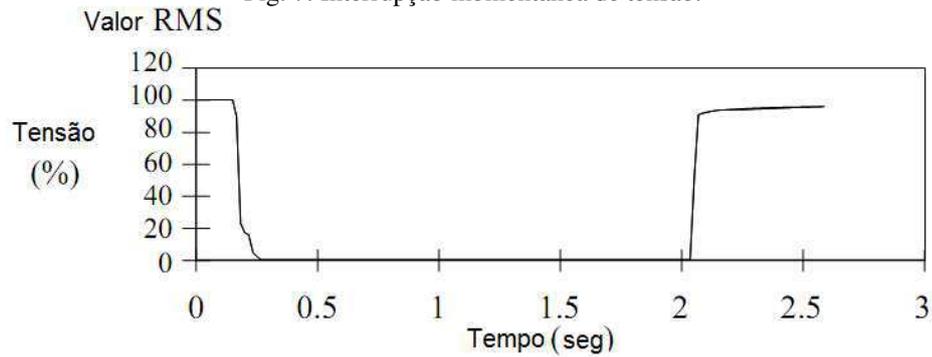
Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u.
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u.
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u.
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u.
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u.
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u.

Fonte: ANEEL (2015).

3.2.1 INTERRUPÇÃO DE TENSÃO

Uma interrupção ocorre quando o suprimento de tensão ou a corrente de carga é inferior a 0,1 p.u. por um período de tempo não maior que um minuto pelo IEEE (2009) e não maior que três minutos pela ANEEL (2015). Interrupções podem ser resultadas de faltas no sistema de potência, falhas de equipamentos e mau funcionamento de controles. Na Fig. 7 pode ser visualizada uma representação de uma interrupção de tensão. Ela pode causar falha de equipamentos sensíveis e perdas em processos produtivos.

Fig. 7: Interrupção momentânea de tensão.

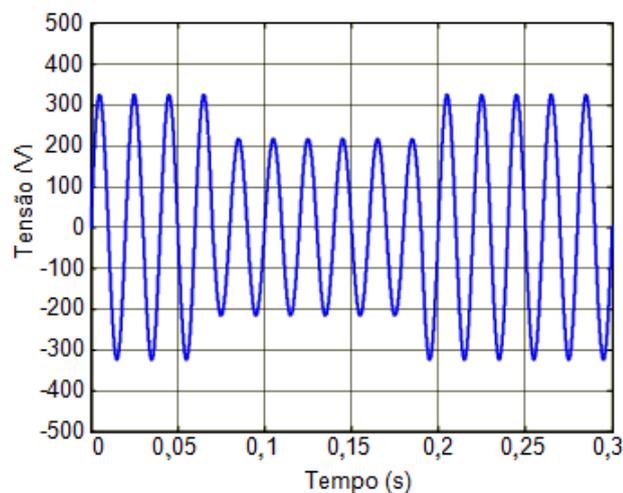


Fonte: IEEE (2009), adaptado pelo autor.

3.2.2 AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Afundamento de tensão é a queda brusca do valor eficaz da tensão (*sag*) para um valor entre 0,1 p.u. e 0,9 p.u. na frequência fundamental, com duração entre 0,5 ciclo a um minuto (IEEE, 2009). O afundamento é provocado tipicamente pela entrada de uma carga temporária, de porte significativo em relação ao nível de curto-circuito local. Ele pode ainda ser provocado pela ocorrência de um curto-circuito próximo do local observado. Em geral, seu efeito desaparece depois que a causa direta é removida. Ele pode ocasionar a perda de potência e a falha de operação nos equipamentos. Na Fig. 8 é ilustrado um afundamento de tensão.

Fig. 8: Afundamento de tensão.



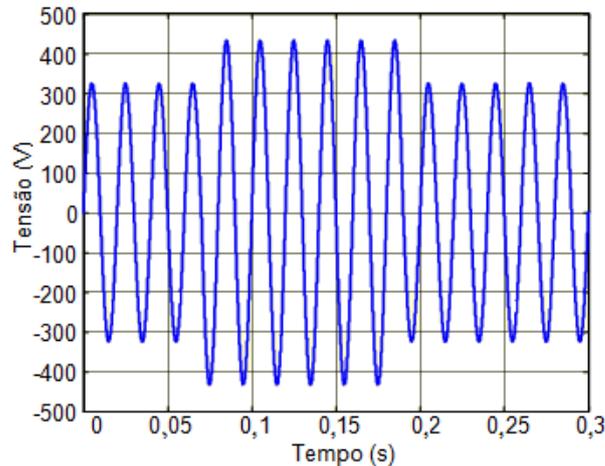
Fonte: Sinus (2014).

3.2.3 ELEVAÇÃO DE TENSÃO

Elevação de tensão é caracterizada por elevação no valor eficaz da tensão (*swell*) acima de 1,1 p.u. com duração entre 0,5 ciclo e um minuto (IEEE, 2009). Trata-se do efeito contrário

ao do afundamento, sendo as principais causas as saídas temporárias de cargas ou a conexão de um banco de capacitores. A elevação de tensão causa estresse nos isolamentos elétricos e sobrecarga de equipamentos ou sistemas. Na Fig. 9 é exemplificada uma elevação de tensão.

Fig. 9: Elevação de tensão.



Fonte: Sinus (2014).

3.3 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE LONGA DURAÇÃO

As Variações de Tensão de Longa Duração (VTLD) são caracterizadas como elevações na tensão com duração superior a um minuto. Não há referências para as VTLD no PRODIST. As classificações e características segundo o IEEE foram apresentadas na Tabela 3 e são separadas e resumidas na Tabela 5.

Tabela 5: VTLD segundo o IEEE.

Classificação	Denominação	Duração do Evento	Magnitude da Tensão
Variação de Tensão de Longa Duração	Interrupção Sustentada da Tensão	Maior que 1 minuto	0 p.u.
	Subtensão Sustentada	Maior que 1 minuto	Superior ou igual a 0,8 p.u. e inferior ou igual a 0,9 p.u.
	Sobretensão Sustentada	Maior que 1 minuto	Superior ou igual a 1,1 p.u. e inferior ou igual a 1,2 p.u.

Fonte: IEEE (2009), adaptado pelo autor.

3.3.1 INTERRUPÇÃO SUSTENTADA

A Interrupção Sustentada é a ausência de tensão com duração maior que um minuto. As interrupções de tensão maiores que um minuto são no geral permanentes e requerem uma

intervenção humana para reparar o sistema e restabelecer as condições normais de operação. Ela causa o desligamento de equipamentos.

3.3.2 SUBTENSÃO SUSTENTADA

Subtensão (*undervoltage*) é a redução do valor eficaz da tensão para valores entre 0,8 p.u. e 0,9 p.u. com duração maior que um minuto. Ela é resultada de eventos de chaveamentos, como exemplo, a entrada de grandes cargas ou saídas de bancos de capacitores. Circuitos sobrecarregados também podem causar uma subtensão. A Subtensão pode causar o desligamento ou um mau funcionamento de equipamentos, assim como, o sobreaquecimento de motores e lâmpadas de descargas.

3.3.3 SOBRETENSÃO SUSTENTADA

Sobretensão (*overvoltage*) é a elevação do valor eficaz da tensão para valores entre 1,1 p.u. e 1,2 p.u. com duração maior que um minuto. Sobretensões são causadas por chaveamentos, como por exemplo, a saída de grandes cargas ou a energização de banco de capacitores. A configuração incorreta do *tap* de transformadores também resulta em sobretensões. Ela pode causar danos aos equipamentos e a redução da vida útil ou eficiência.

3.4 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Desequilíbrio de tensão é definido frequentemente como o máximo desvio da média das tensões ou correntes trifásicas, dividido pela média das tensões ou correntes trifásicas, expresso em porcentagem (ANSI C84.1-2006). O desequilíbrio também pode ser definido como a razão da magnitude da componente de sequência negativa com a magnitude da componente de sequência positiva, expressão (1) (ANEEL, 2015). É ilustrado na Fig. 10 o desequilíbrio de tensão em magnitude e fase.

$$\%FD = \frac{|V_{neg}|}{|V_{pos}|} \times 100\%. \quad (1)$$

Alternativamente, pode-se utilizar a expressão (2), que conduz a resultados em consonância com a formulação anterior (ANEEL, 2015):

$$\%FD = 100 \times \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2)$$

sendo:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (3)$$

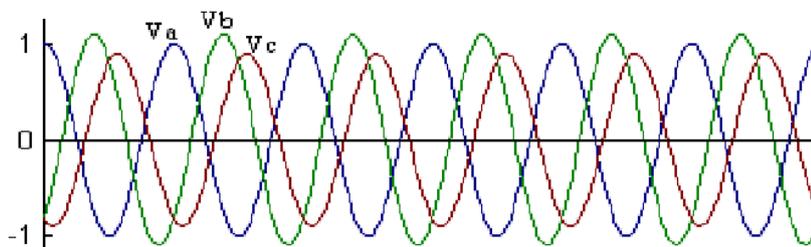
V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} são as tensões de linha do sistema.

As principais fontes de tensões com desbalanceamentos menores que 2% são cargas monofásicas em circuitos trifásicos. Tensões desbalanceadas também podem resultar da queima de fusíveis em uma fase de um banco de capacitores trifásicos e de curto circuito entre fases.

O valor de referência para o desbalanceamento nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da baixa tensão, deve ser igual ou inferior a 2%. Esse valor serve para referência do planejamento elétrico em termos de QEE.

Os desequilíbrios podem causar sobretensão, sobrecorrente e vibração em máquinas.

Fig. 10: Tensões desequilibradas em magnitude e fase.



Fonte: Deckmann e Pomilio (2010).

3.5 DISTORÇÃO DA FORMA DE ONDA

A distorção da forma de onda é definida como uma deformação em regime permanente de uma onda senoidal ideal na frequência da rede, podendo ocorrer na tensão ou na corrente.

Há cinco tipos principais de desvios da forma de onda:

- Nível CC;
- Harmônicos;
- Inter-harmônicos;
- *Notching*;
- Ruído.

As cinco principais distorções que podem ocorrer na forma de onda da tensão ou da corrente serão discutidas separadamente a seguir.

3.5.1 NÍVEL CC

Nível CC é a presença de uma tensão ou uma corrente CC em um sistema de potência alternado. Pode ocorrer devido a um distúrbio geomagnético ou a assimetria dos conversores eletrônicos de potência. Correntes contínuas em uma rede CA pode ter um efeito prejudicial por polarizar o núcleo do transformador e assim, causar a saturação em operação normal.

3.5.2 HARMÔNICOS

Harmônicas são sinais senoidais possuindo frequências que são múltiplas inteiras da frequência fundamental. A frequência fundamental do sistema de potência é de 60 Hz para o Brasil. Combinadas com a tensão ou corrente fundamental, as harmônicas causam distorções na forma de onda. Elas se originam das características não lineares de dispositivos e cargas ligados à rede elétrica.

Os dispositivos eletrônicos de potência são os principais contribuintes para a injeção de harmônicos na rede. Esses dispositivos, devido às suas características não lineares, causam a circulação de correntes não lineares, quando estas percorrem as impedâncias do sistema, causam a distorção na tensão.

Os níveis de distorção harmônica podem ser caracterizados pelo espectro harmônico completo com magnitudes 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 magnitude da distorção harmônica. Segundo a ANEEL (2015), a distorção harmônica total de tensão (DHT) e a distorção harmônica individual de tensão de ordem h (DHI_h) são calculadas pelas seguintes expressões:

$$DHI_h = \frac{V_h}{V_1} \times 100\%, \quad (4)$$

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100\%, \quad (5)$$

onde, V_h é a tensão harmônica de ordem h , $h_{máx}$ é a ordem harmônica máxima e V_1 é a tensão fundamental medida.

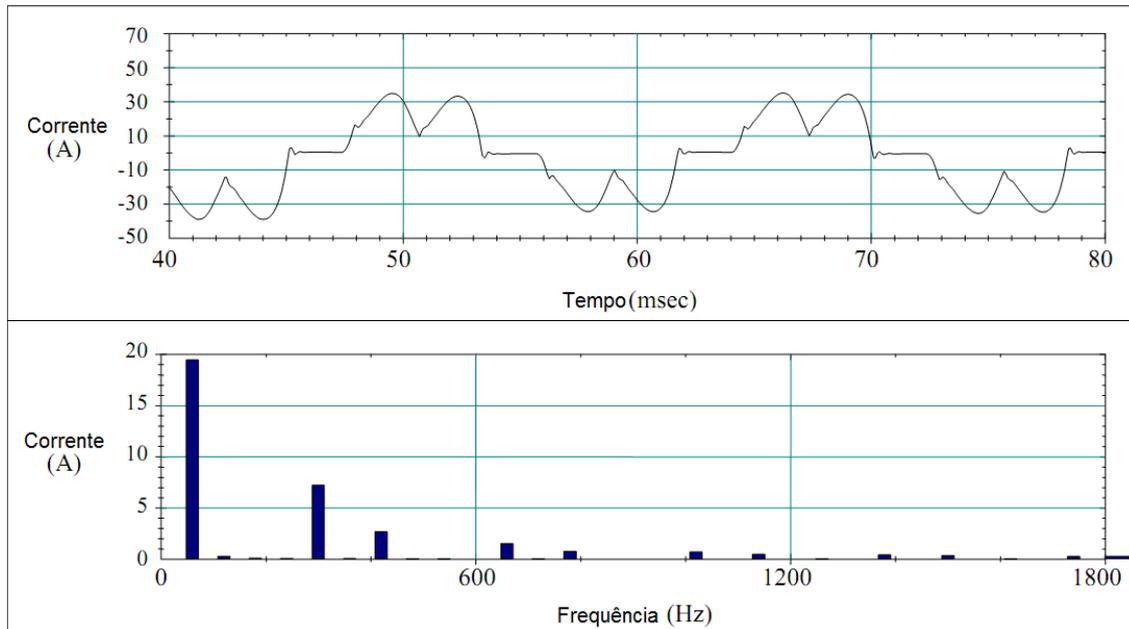
O cálculo da distorção harmônica total deve-se considerar desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica ($h_{min} = 25$) para resultar em um valor aceitável para a fiscalização (ANEEL, 2015).

Um sinal pode ser decomposto em suas componentes de frequência utilizando a decomposição em Série de Fourier. Em sistemas digitais há um algoritmo eficiente para a determinação do espectro de frequências, a *FFT* (*Fast Fourier Transform*, em português: transformada rápida de Fourier).

Na Fig. 11 é ilustrada a forma de onda e o espectro harmônico de corrente de um regulador de velocidade típico. Nota-se pelo conteúdo espectral a existência de harmônicos, em especial os de 5ª e 7ª ordem.

Os valores de referência para as DTT estão indicados na Tabela 6 e para as DIT_h na Tabela 7 retiradas do PRODIST (ANEEL, 2015). Estes valores serão em um futuro próximo utilizados como referência do planejamento elétrico em termos de QEE pela ANEEL.

Fig. 11: Forma de onda e o espectro de frequência da corrente em um regulador de velocidade.



Fonte: IEEE (2009), adaptado pelo autor.

Tabela 6: Valores de referências globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental).

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT)	
	[%]	
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	10	
$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	8	
$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	6	
$69 \text{ kV} < V_N < 230 \text{ kV}$	3	

Fonte: ANEEL (2015).

Tabela 7: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental).

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
>25	1,5	1	1	0,5	
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: ANEEL (2015).

Principais fontes de harmônicos são: circuito de iluminação com lâmpadas de descargas; fornos a arco; componentes estáticos tipo reator saturado; motores de corrente contínua controlados por retificadores; motores de indução controlados por inversores com comutação forçada; processos de eletrólise através de retificadores não controlados; motores síncronos controlados por ciclo conversores; fornos de indução de alta frequência; fornos de indução

controlados por reatores saturados; cargas de aquecimentos controladas por tiristores; velocidade dos motores CA controlados por tensão de estator; reguladores de tensão a núcleo saturado; computadores; eletrodomésticos com fontes chaveadas (FRANCO, 2014).

Os principais dispositivos e equipamentos afetados pelas harmônicas e os, respectivos, efeitos são (ALMEIDA, 2013; DUNGAN *et al.*, 2004):

- Capacitores: queima de fusíveis e redução da vida útil;
- Motores: redução da vida útil, e impossibilidade de atingir a potência máxima;
- Fusíveis/Disjuntores: operação falsa/errônea, e componentes danificados;
- Transformadores: aumento de perdas, causando redução de capacidade e diminuição de vida útil;
- Medidores: possibilidade de medições errôneas;
- Telefones: interferências;
- Maquinas síncrona: sobreaquecimento das sapatas polares, causado pela circulação de corrente harmônicas nos enrolamentos amortecedores;
- Acionamentos/fontes: operações errôneas devido à múltipla passagem por zero, e falha na comutação de circuitos;
- Bancos de capacitores: podem originar condições de ressonância, caracterizando uma sobretensão nos terminais das unidades capacitivas.

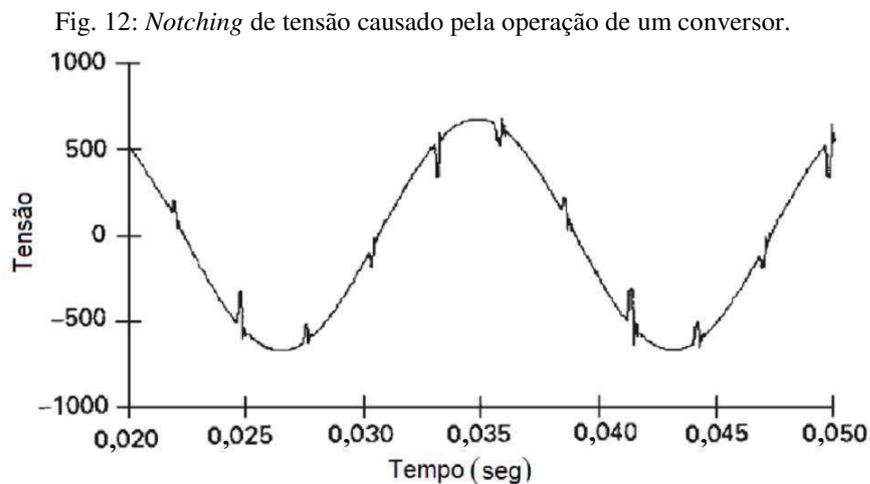
3.5.3 INTER-HARMÔNICO

Os inter-harmônicos são sinais de tensões ou correntes possuindo componentes de frequências não múltiplas inteiras da tensão fundamental da rede. Podem surgir como frequências discretas ou como espectro de banda larga. Combinadas com a tensão ou corrente fundamental, as inter-harmônicas causam distorção na forma de onda.

As principais fontes de inter-harmônicos são os conversores estáticos de frequência, ciclo conversores, fornos indutivos, dispositivos a arco (fornos a arco, por exemplo) e especialmente os dispositivos cujo controle é assíncrono com a frequência fundamental da rede. Os seus efeitos não são bem conhecidos, mas se admite que os mesmos podem induzir *flicker* visual no *display* de equipamentos como tubo de raios catódicos. Modulação harmônica e interferências são outros efeitos detectados.

3.5.4 NOTCHING

Os conversores trifásicos que produzem tensões CC contínuas são os principais causadores das tensões *notching*. *Notching* é um distúrbio de tensão periódico causado pela operação normal de dispositivos eletrônicos de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Durante este período, há um curto circuito momentâneo entre duas fases. Eles são caracterizados como fontes de ruídos e interferências indesejáveis e de difícil tratamento. Na Fig. 12 são mostrados *notching* de tensão causados pela operação de um conversor.

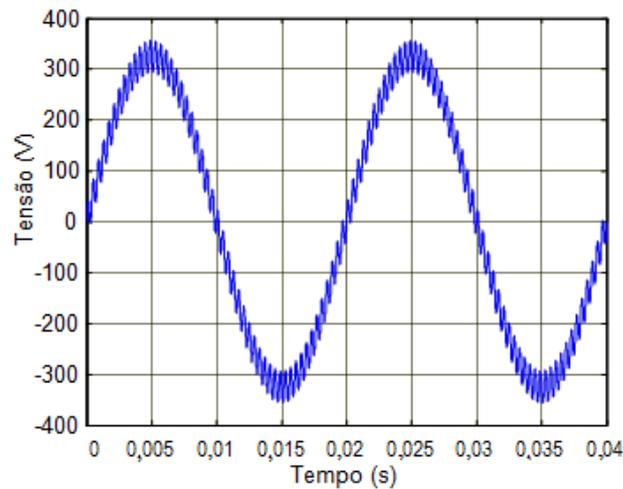


3.5.5 RUÍDO

No contexto de qualidade da energia o livro de Dugan *et al.* (2004) descreve que o ruído é definido como um sinal elétrico indesejado, contendo uma larga faixa espectral com frequências menores que 200 kHz, as quais são superpostas às tensões ou às correntes de fase, ou encontradas em condutores de neutro ou linhas de sinais. Os ruídos em sistemas de potência podem ser causados por arcos elétricos, retificadores em estado sólido e fontes chaveadas, e normalmente estão relacionados com aterramentos impróprios. Eles também podem ser relacionados com o acoplamento magnético entre circuitos previstos para operar em diferentes faixas de frequência, por exemplo, o efeito da rádio interferência. O ruído pode causar interferências e falhas de sistemas digitais.

Na Fig. 13 pode ser visualizada uma distorção na forma de onda da tensão causada pelo ruído.

Fig. 13: Ruído no sinal de tensão.



Fonte: Sinus (2014).

3.6 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

Flutuações de tensão são caracterizados por mudanças sustentadas da amplitude da tensão fundamental sem, em geral, ultrapassar os limites de tensão (adequados) normatizados pela ANEEL (2015). Na Tabela 8 é mostrado um exemplo para os níveis de tensão estabelecidos no PRODIST para uma tensão contratada de 380/220 V. As flutuações de tensão, em geral, são provocadas por variações de cargas como fornos a arco, elevadores, bombas e compressores, ou seja, qualquer carga que possua uma variação rápida e continuada na magnitude da corrente de carga. O efeito principal é o fenômeno de *flicker* (cintilação luminosa), embora os efeitos das flutuações de tensão também podem ocasionar oscilações de potência nas linhas de transmissão, levando os geradores a oscilar entre si (oscilações eletromecânicas) ou com a turbina (ressonância subsíncrona).

Tabela 8: Níveis de tensão estabelecidos pela ANEEL para uma tensão contratada de 380/220 V.

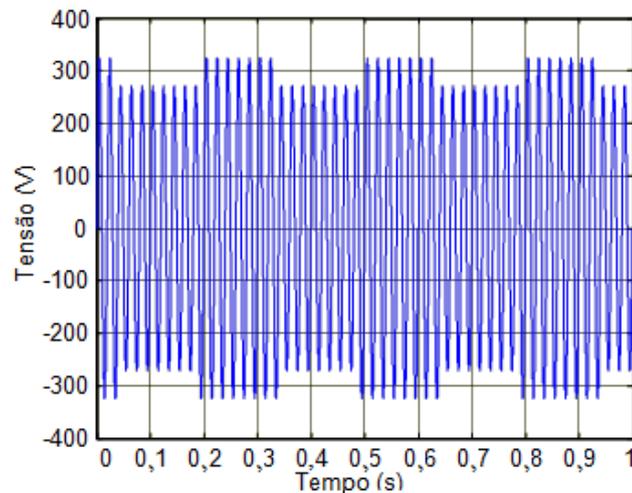
Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403) / (191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 191 \text{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

Fonte: ANEEL (2015).

A determinação da flutuação de tensão tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa (*flicker*) no consumidor, que tenha em sua unidade consumidora pontos de iluminação alimentados em baixa tensão.

Segundo o (IEC 61000-4-15, 2010), *flicker* é a sensação de instabilidade visual provocada por um estímulo luminoso, cuja luminância varia no tempo. O evento se torna mais crítico em lâmpadas incandescentes e quando a frequência da flutuação é próxima de 8,8 Hz. Por isso, a medição do fenômeno de flutuação de tensão utiliza como referência o efeito causado em uma lâmpada incandescente de 60 W. Um exemplo da forma de onda da tensão com a flutuação de tensão é mostrado na Fig. 14.

Fig. 14: Flutuação de tensão.



Fonte: Sinus (2014).

3.7 VARIAÇÕES DE FREQUÊNCIA

Variações na frequência de um sistema elétrico são definidas como sendo desvios do valor da frequência fundamental da rede (60 Hz para o Brasil). A frequência do sistema de potência está diretamente associada à velocidade de rotação dos geradores que suprem o sistema. Pequenas variações de frequências podem ser observadas quando os geradores são forçados a balancear a produção com a demanda da energia pelas cargas. A frequência fundamental em condições normais de operação deve operar dentro dos limites de frequência estabelecidas pela ANEEL (2015) ($59,9 \text{ Hz} \leq \text{frequência fundamental} \leq 60,1 \text{ Hz}$).

Na ocorrência de um distúrbio no sistema de distribuição, as instalações de geração conectadas ao sistema devem garantir que a frequência retorne para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, no prazo de 30 (trinta) segundos após sair deste intervalo. Isso é necessário para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração.

As grandes variações na frequência podem ser causadas por falhas em sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de carga ou pela saída de operação de uma grande fonte de geração.

As variações na frequência podem afetar a operação de máquinas girantes ou processos que possuem sua temporização derivada da frequência da rede.

Neste capítulo foi discutida a qualidade da energia elétrica abordando alguns dos seus principais distúrbios e parâmetros, além de abordar alguns limites e definições das normas estabelecidas pelo IEEE e pela ANEEL. O próximo capítulo abordará o SBC utilizado neste trabalho para o desenvolvimento do dispositivo proposto.

4 BEAGLEBONE BLACK

4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

A *BeagleBone Black* é um potente computador de placa única (SBC, do inglês, *Single-Board Computer*) que possui seu *hardware* e *software* totalmente *open source*, isto é, que todos os seus códigos, *designs* e componentes são disponibilizados e podem ser alterados sem precisar de permissão do desenvolvedor. A sua placa, por si só, é muito complexa para ser utilizada, porém, o que a torna acessível, adaptável e potente é que ela roda um sistema Linux embarcado.

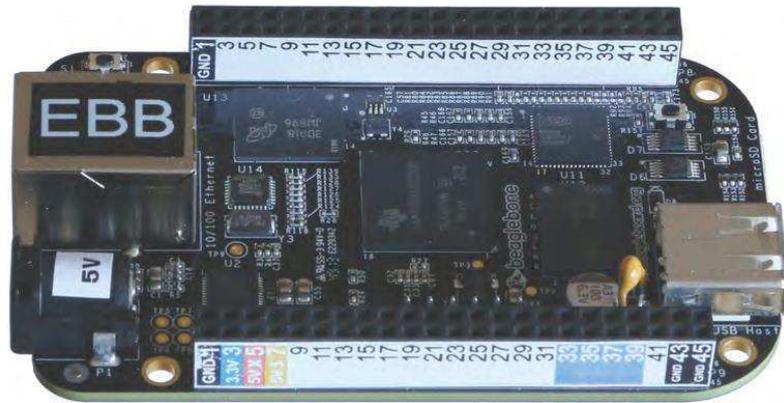
Uma diferença chave da BBB para os demais SBC disponíveis no mercado como a *Raspberry PI* e a *Intel Galileo* é que ela também foi feita para ser interfaceada. A BBB tem dois microcontroladores adicionais que podem servir para uma interface de tempo-real, os demais SBC com Linux possuem uma grande dificuldade nessas aplicações.

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

- É potente, contém um processador que pode realizar até dois bilhões de instruções por segundo;
- É de baixo-custo, podendo ser adquirida por 45 – 55 Dólares;
- Suporta muitos padrões de interface para dispositivos eletrônicos;
- Usa pouca potência, rodando entre 1 e 2,3 W;
- É expansível por meio de *capas* (*daughter boards*, em português, placas filhas) e dispositivos USB;
- É suportada por uma grande comunidade de inovadores e entusiastas; e
- É *open-hardware* e suporta ferramentas e aplicações *open-software*.

Na Fig. 15 é ilustrada a BBB com os *headers* P8 e P9 (as duas fileiras pretas de conectores 2x23) com as entradas numeradas. As *capas* são facilmente conectadas nesses *headers*.

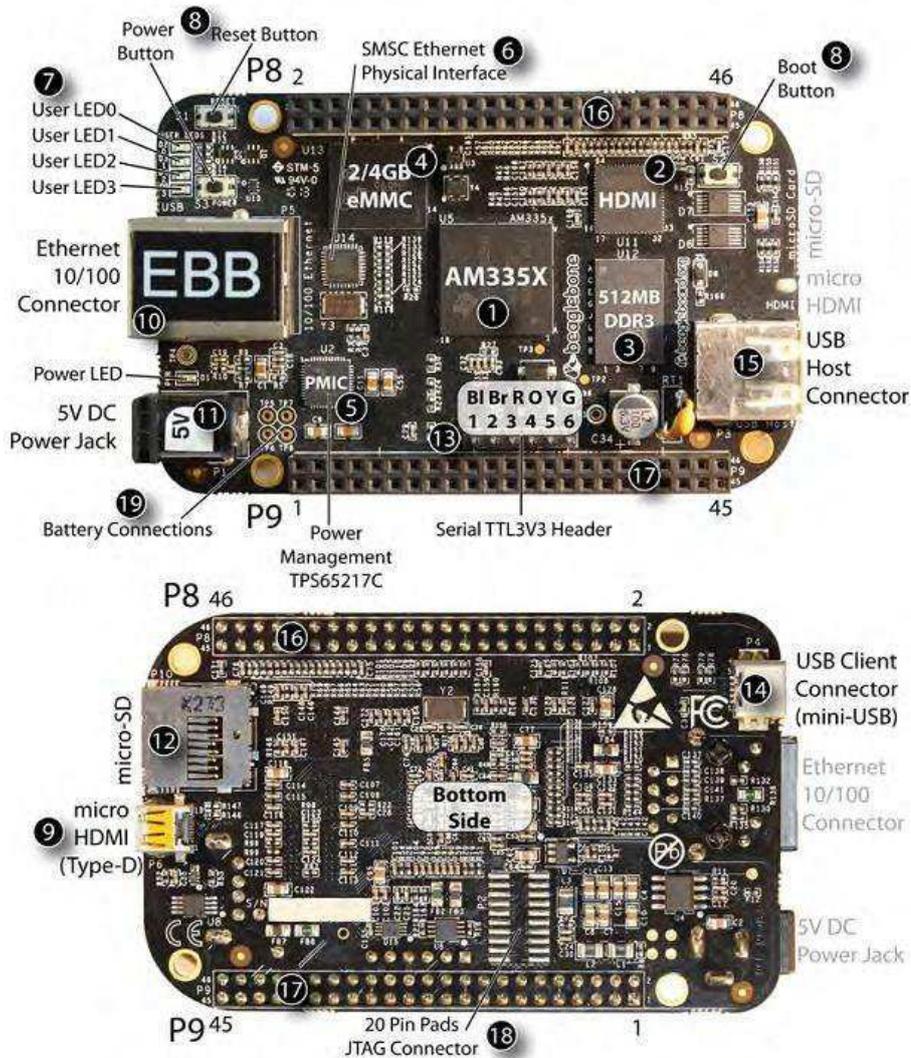
Fig. 15: BeagleBone Black.



Fonte: Molloy (2015).

Os principais componentes da BBB são apresentados na Tabela 9 e ilustrados na Fig. 16.

Fig. 16: Vistas de cima e de baixo da BBB identificando seus componentes.



Fonte: Molloy (2015).

Tabela 9: Componentes da BBB.

Função	Componente	Detalhes
1	Processador	Um poderoso processador Texas Instruments Sitara de 1 GHz ARM-A8 capaz de realizar 2 bilhões de instruções por segundo.
	2 x PRU	Unidades programáveis de tempo-real. Microcontroladores que permitem um interfaceamento em tempo-real.
2	Gráficos	HDMI <i>Framer</i> O <i>Framer</i> converte a interface LCD disponível no processador para um sinal HDMI.
3	Memória	512 MB DDR3 O tamanho da memória do sistema afeta a performance e o tipo de aplicação que pode ser rodada.
4	Armazenamento	eMMC Um cartão multimídia embarcado <i>onboard</i> de 2/4 GB – um cartão SD no <i>chip</i> .
5	Gerenciamento de potência	TPS65217C CI de gerenciamento de potência.
6	Processor Ethernet	Ethernet PHY (10/100) Pode ser imediatamente conectado na rede. A interface física LAN8710A conecta o conector físico RJ45 ao processador ARM.
7	LED	7 x LED 1 LED de energia, 4 LED de usuário e 2 LED no <i>socket</i> de ethernet RJ45.
8	Botões	3 x botões Botão de energia, ligar/desligar; botão para resetar a placa; e o botão para escolher entre <i>boot</i> pelo eMMC ou pelo cartão SD.
9	Saída de vídeo	micro-HDMI Para conectar a monitores e televisões. Suporta resoluções de até 1080x1024 em 60 Hz.
10	Rede	<i>Ethernet</i> (RJ45) 10/100 ethernet via conector RJ45.
11	Potência CC	Alimentação CC de 5 V Para conectar a alimentação 5 V.
12	Cartão SD	<i>Slot</i> de cartão (micro-SD) <i>Slot</i> de cartão micro-SD 3,3 V. A BBB pode ser inicializada por este <i>slot</i> ou usada para armazenamento adicional quando a BBB for inicializada pelo eMMC.
13	Debug serial	6 conectores Usado com um cabo serial TTL3V3 para conectar ao <i>console</i> serial da BBB.
14	USB	1 x USB 2.0 (mini-USB) Conecta ao computador e pode energizar a BBB diretamente e/ou se comunicar com ela.
15	USB	1 x USB 2.0 Pode conectar periféricos USB na BBB.

Função	Componente	Detalhes
16 e 17	P8 e P9 <i>headers</i> de Expansão	Dois 2x23 <i>headers</i> fêmea
18	Outro Debug	JTAG
19	Outra Potência	Conectores para Bateria

92 pinos divididos em 2 *headers* que são multiplexados para prover acesso às características da Tabela 10. Nem todas as funcionalidades são disponíveis ao mesmo tempo. Pode conectar *capas*.

É possível soldar pinos e usar para conectar uma bateria para a alimentação.

Fonte: Molloy (2015), adaptado pelo autor.

Tabela 10: Características dos pinos dos *headers* P8 e P9.

P8 e P9 <i>Headers</i> de expansão		Há 92 pinos, que são multiplexados, divididos em 2 header de expansão
GPIO	65 x GPIO	Número máximo de 65 GPIO. Todas são de 3,3 V.
Saídas Analógicas	8 x PWM	Saídas PWM (<i>Pulse Width Modulated</i> , em português, modulação por largura de pulsos) que permitem enviar um tipo de saída variável analógica de 0 a 3,3 V.
Entradas Analógicas	7 x Entradas Analógicas	7 entradas analógicas de 12-bit, 1,8 V. São sempre disponíveis nos <i>headers</i> .
Saídas de energia	5 V, 3,3 V e 1,8 V	Fornecimento de tensão de 5 e 3,3 V e uma referência de 1,8 V para as entradas analógicas. Oito pinos no <i>header</i> são ligados ao GND.
Temporizadores	4 temporizadores	Podem ser usados para gerar um <i>clock</i> externo para interfaceamento com outros dispositivos.
Barramentos	2 x I ² C	I ² C é um barramento digital que permite conectar vários módulos apenas com dois fios.
	4 x UART	Usado para comunicação serial entre dois dispositivos.
	2 x CAN	Barramento CAN.
	2 x SPI	Interface de periférico serial, possibilita um <i>link</i> de transferência de dados serial síncrona.
	GPMC	Controlador de memória de uso geral, é usado para conectar dispositivos de memória externa.
	2 x MMC	Barramento de interface usado para conectar o cartão micro-SD e o eMMC no processador.
	LCD	Utilizado para telas de LCD. Esta interface tem conflito com o <i>Framer</i> HDMI (apenas uma pode ser usada de cada vez).
2 x McASP	Porta serial de áudio de uso geral.	

Fonte: Molloy (2015), adaptado pelo autor.

4.2 DEVICE TREE OVERLAY

Um *Device Tree* é essencialmente um arquivo texto que descreve o *hardware* para o *kernel* de um sistema. Isto é uma forma externa de ajuda para o *kernel* entender o sistema em que ele está sendo rodado. *Device trees* são bastante comuns no mundo Linux (CORBET, 2014).

As *overlays* permitem que o *Device Tree* inicial que foi descrita na inicialização do sistema seja alterada em tempo de execução no *userspace*. Isto é útil para habilitar qualquer dispositivo sem ter que recompilar o *kernel* e/ou reiniciar o sistema (COOPER, 2016).

Resumindo, tem-se que um *Device Tree Overlay* (DTO) é uma forma de descrever o *hardware* em um sistema em tempo de execução sem que seja necessário alterar o *kernel* do sistema. Ou seja, pode-se, por exemplo, configurar os pinos dos *headers* P8 e P9 para que sejam compatíveis com uma *cape* (como a ilustrada na Fig. 17) que se quer conectar à BBB.

Fig. 17: *Cape* LCD para a BBB.



Fonte: Element14 (2016).

Os pinos da *BeagleBone Black* (BBB) possuem oito diferentes modos, o que se chama de modo multiplexador para o pino. Para configurar o pino de acordo com o modo desejado, utiliza-se um número binário de três dígitos, como é apresentado na primeira linha da Tabela 11. Estes três *bits* são utilizados, em conjunto com outros quatro *bits* (formando um número binário de sete *bits*), para configurar o comportamento exato de um pino GPIO usando *Device Tree Overlays* (MOLLOY, 2015).

Em Coley (2014) podem ser encontrados os diferentes modos que os pinos da BBB podem ser configurados.

Tabela 11: Configuração do pino GPIO.

BIT	Campo do AM335x	Descrição
0,1,2	mmode	Modo Multiplexador: os <i>bits</i> menos significativos podem ser usados para selecionar entre 0 (000 ₂) e 7 (111 ₂). Deste modo, cada pino pode ter até 8 modos diferentes.
3	puden	0 ativa o resistor de <i>pull-up/pull-down</i> e 1 desativa.
4	putypesel	0 seleciona o resistor de <i>pull-down</i> . 1 seleciona o resistor de <i>pull-up</i> .
5	rxactive	Quando este pino está selecionado em nível alto, o pino se comporta como uma entrada. Quando em nível baixo, o pino se comporta como uma saída.
6	slewctrl	Fornece controle ao tempo subida/descida de uma saída. Rápido = 0, Devagar = 1.

Fonte: Texas Instruments (2013), adaptado pelo autor.

4.3 PRU-ICSS

O processador AM335x da BBB possui duas Unidades Programáveis em Tempo Real (PRU0 e PRU1) – *Programmable Real-Time Units* (PRU). A PRU é um processador de 32 *bits* e 200 MHz (arquitetura RISC - *Reduced Instruction Set Computer*, em português: computador com um conjunto reduzido de instruções) com acesso completo à memória interna e periféricos do processador AM335x. Estas unidades fazem parte do *Programmable Real-time Unit Industrial Control Subsystem* (PRU-ICSS) e podem ser usadas para interfaces que necessitam de operações em tempo real.

As PRU são capazes de ativar interrupções e compartilhar memória com o servidor Linux do dispositivo. Além disso, podem também usar os conjuntos de pinos P9/P8 da BBB (MOLLOY, 2015). Na Fig. 18 é possível identificar os conjuntos de pinos utilizados pelo subsistema da PRU e os demais pinos de uso específico presentes nos *headers* P8/P9.

Fig. 18: Conjuntos de pinos P9/P8.

P9				P8			
DGND	1	2	DGND	DGND	1	2	DGND
VDD_3V3	3	4	VDD_3V3	GPIO_38	3	4	GPIO_39
VDD_5V	5	6	VDD_5V	GPIO_34	5	6	GPIO_35
SYS_5V	7	8	SYS_5V	GPIO_66	7	8	GPIO_67
PWR_BTN	9	10	SYS_RESETN	GPIO_69	9	10	GPIO_68
GPIO_30	11	12	GPIO_60	PRUO_15 OUT	11	12	PRUO_14 OUT
GPIO_31	13	14	GPIO_50	GPIO_23	13	14	GPIO_26
GPIO_48	15	16	GPIO_51	GPIO_47	15	16	GPIO_46
GPIO_5	17	18	GPIO_4	GPIO_27	17	18	GPIO_65
I2C2_SCL	19	20	I2C2_SDA	GPIO_22	19	20	PRU1_13
GPIO_3	21	22	GPIO_2	PRU1_12	21	22	GPIO_37
GPIO_49	23	24	GPIO_15	GPIO_36	23	24	GPIO_33
PRUO_7	25	26	PRU1_16 IN	GPIO_32	25	26	GPIO_61
PRUO_5	27	28	PRUO_3	PRU1_8	27	28	PRU1_10
PRUO_1	29	30	PRUO_2	PRU1_9	29	30	PRU1_11
PRUO_0	31	32	VDD_ADC	GPIO_10	31	32	GPIO_11
AIN4	33	34	GND_ADC	GPIO_9	33	34	GPIO_81
AIN6	35	36	AIN5	GPIO_8	35	36	GPIO_80
AIN2	37	38	AIN3	GPIO_78	37	38	GPIO_79
AIN0	39	40	AIN1	PRU1_6	39	40	PRU1_7
PRUO_6	41	42	PRUO_4	PRU1_4	41	42	PRU1_5
DGND	43	44	DGND	PRU1_2	43	44	PRU1_3
DGND	45	46	DGND	PRU1_0	45	46	PRU1_1

Fonte: Beagleboard.org (2016), adaptado pelo autor.

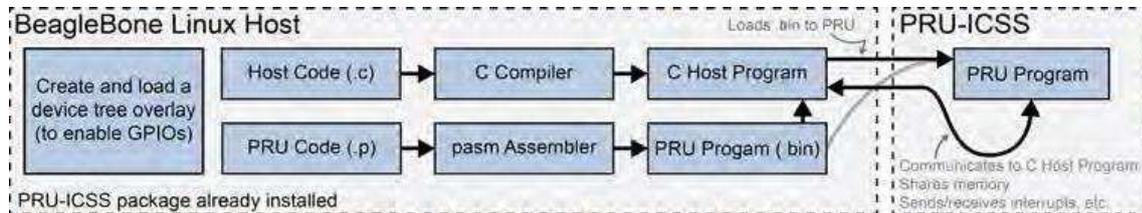
Observa-se que 10 pinos estão disponíveis para PRU0 e 15 pinos estão disponíveis para a PRU1. Estes pinos precisam ser configurados utilizando um *Device Tree Overlay* e alguns deles já se encontram alocados e não devem ser usados a menos que a funcionalidade a que se encontram alocados seja desabilitada (por exemplo, a saída do HDMI ou o eMMC).

Cada PRU possui uma memória de dados de 8 kB e uma memória de programa de 8 kB. A primeira é usada para armazenar dados que são manipulados pelas instruções do programa e a segunda armazena as instruções a serem executadas pela PRU. Cada PRU é capaz de acessar a memória de dados da outra e, além disso, há uma memória compartilhada de uso geral de 12 kB (MOLLOY, 2015).

Para implantar um programa na PRU-ICSS, é necessário seguir algumas etapas. Estas etapas estão ilustradas na Fig. 19 e dizem respeito à criação de um *Device Tree Overlay*; de um programa (escrito na linguagem C) no Linux; de um programa (escrito na linguagem *assembly*)

para a PRU; da compilação do programa em *C*; da compilação do programa em *assembly*; e da execução do programa do servidor Linux.

Fig. 19: Etapas para implantação de um programa na PRU-ICSS.



Fonte: Molloy (2015).

Os programas para PRU são escritos em *assembly* e precisam ser compilados para arquivo binário para serem executados nas PRU. 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).

Há ainda uma alternativa para escrever programas para PRU na linguagem *C*, ao invés de *assembly*. A Texas Instruments lançou o *PRU Code Generation Tools* (CGT) como parte do *Code Composer Studio v6* (CCSv6), o qual pode ser utilizado para escrever programas para PRU em *C*.

4.4 WEB SERVER

Uma grande vantagem dos dispositivos que utilizam o sistema Linux embarcado é a vasta quantidade de *softwares open-source* disponíveis. Por isso, a dificuldade de se criar um *web service* (servidor *web*, em português) no Linux se resume a escolher qual usar. Existem vários servidores apropriados para dispositivos embarcados, tais quais: *lighttpd*, *Boa*, *Monkey*, *Nginx* e *Apache*.

Rodar um servidor *web* na BBB possibilita uma grande variedade de aplicações, incluindo (MOLLOY, 2015):

- Apresentar conteúdos *web* para o mundo;
- Integrar sensores e exibir seus valores para o mundo;
- Integrar sensores e usá-lo para se intercomunicar entre dispositivos;
- Fornecer interfaces baseados em *web* para ferramentas que estão rodando na BBB.

Dentre os servidores *web open-source* disponíveis para sistemas Linux se destacam o Apache e o `lighttpd`. Até a versão rev. B da BBB, o sistema operacional do Linux que já vem pré-instalado é o Ångström, nele, não é possível instalar o Apache sendo necessário usar o `lighttpd`. Porém, a partir da versão rev. C a distribuição pré-instalada é o Debian, neste, é possível instalar o Apache2. A vantagem de utilizar o Apache2 é a simplicidade na utilização da biblioteca gráfica PHPlot. Esta biblioteca é utilizada para gerar gráficos a partir de dados presentes em um banco de dados ou em arquivos separados, por exemplo, arquivos de texto (.txt). Vale lembrar que a BBB permite a instalação de outros sistemas operacionais independente do SO pré-instalado.

Este capítulo foi iniciado com uma descrição geral sobre o computador de placa única escolhido, a BeagleBone Black. Na sequência foi tratado das principais características da BBB utilizadas neste trabalho. As PRU serão utilizadas para a comunicação com um conversor analógico digital (ADC – sigla em inglês para *Analog/Digital Converter*). Já o servidor web será utilizado para a disponibilização dos dados e informações resultantes dos algoritmos de cálculos programados na BBB. Os algoritmos e uma descrição detalhada de como é feita a aquisição dos dados serão abordados no capítulo seguinte.

5 ANALISADOR DE ENERGIA PROPOSTO

O analisador de energia proposto neste trabalho foi concebido como uma prova de conceito de um sistema de aquisição de dados de grandezas elétricas. Nele, serão adquiridos quatro sinais de tensão e quatro sinais de corrente (três fases e o neutro). Com as informações de tensão e corrente o dispositivo será capaz de calcular parâmetros de qualidade de energia, tais quais valor eficaz, amplitude, DHI, fator de desequilíbrio e outros parâmetros encontrados na norma IEEE std. 1459 (2010). Por fim, o analisador disponibilizará os resultados em uma página *web* através de um servidor gerado no próprio dispositivo.

Neste capítulo serão vistos todos os métodos aplicados para o desenvolvimento do analisador de energia proposto, desde o sistema de aquisição de dados, passando pelos algoritmos de cálculos dos parâmetros até a geração da página *web* por meio de um servidor embarcado.

5.1 CÁLCULO DO VALOR EFICAZ

O valor eficaz ou RMS é o valor de tensão/corrente que irá produzir a mesma energia de uma fonte de tensão/corrente de corrente contínua. Ele pode ser determinado como a raiz quadrática do valor médio da função ao quadrado (NILSSON e RIEDEL, 2009). Então, o valor eficaz (Y_{RMS}), da função $y(t)$, de período T é determinado por (6):

$$Y_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} y(t)^2 dt}. \quad (6)$$

Para o cálculo do valor eficaz de um sinal senoidal puro (que é composta por apenas uma frequência) da forma $y(t) = y_m \text{sen}(\omega t)$, a expressão (6) pode ser reduzida para (7).

$$Y_{RMS} = \frac{y_m}{\sqrt{2}}, \quad (7)$$

em que y_m é o valor de pico da função $y(t)$.

Alguns dispositivos utilizam a expressão (7) para calcular os valores eficazes das tensões e correntes, porém, esta expressão só resultará em um valor correto para o caso do sinal

senoidal puro. Desse modo, a expressão (6) calcula o valor eficaz verdadeiro mesmo na presença de uma distorção harmônica na tensão/corrente. Neste trabalho a expressão (6) foi utilizada para o cálculo do valor RMS.

5.2 ESTIMAÇÃO DA FREQUÊNCIA

Vários algoritmos para análise harmônica se baseiam que a frequência fundamental do sinal é conhecida e constante, como exemplo tem-se os algoritmos baseados na FFT. Apesar de se saber que a frequência do sistema elétrico do Brasil e de muitos outros países é de 60 Hz, a norma ANEEL (2015) permite que a frequência tenha valor entre 59,9 e 60,1 Hz em regime permanente. Por isso se torna importante realizar a estimação da frequência da rede elétrica antes de se fazer a análise harmônica.

Métodos convencionais para estimação da frequência da rede elétrica assumem que o sinal é puramente senoidal e, conseqüentemente, o tempo entre duas passagens por zero é uma indicação da frequência. O uso da detecção pelo cruzamento por zero e o cálculo do número de ciclos que ocorrem em um determinado tempo (PHADKE *et al.*, 1983) é uma metodologia simples e bem conhecida. Muitos aprimoramentos e variações foram sugeridos, a fim de melhorar sua acurácia, tais como os propostos por Friedman (1994) e o apresentado por Vainio e Ovaska (1995).

Existem diversos outros métodos na bibliografia para a estimação da frequência baseados na transformação discreta de Fourier, nos mínimos quadrados, nos filtros de Kalman e nas PLL (*Phase Locked Loop*, em português: malha travada em fase). Em Tomic *et al.* (2007) e Carvalho *et al.* (2007) são discutidos esses métodos e propostos outros.

A padronização internacional IEC 61000-4-30 (2015), que trata dos métodos para medição da qualidade da energia elétrica, divide os métodos de estimação em três classes:

- Classe A: é usada onde se fazem necessárias medições com alta exatidão, por exemplo, em aplicações contratuais, na verificação do cumprimento das normas, em disputas, etc.;
- Classe S: é usada em aplicações estatísticas, como em pesquisas ou avaliações da qualidade de energia, onde possivelmente se tenha subconjunto limitado de parâmetros;
- Classe B: é usada em outras aplicações, para evitar tornar os medidores existentes obsoletos.

Os estimadores de frequência são definidos em cada classe da seguinte forma:

- Classe A: a leitura de frequência deve ser obtida a cada 10 s. A frequência fundamental é definida como o número de ciclos inteiros no intervalo de 10 s, dividido pelo tempo cumulativo dos ciclos inteiros do intervalo. Antes de cada estimação, as harmônicas e inter-harmônicas devem ser atenuadas, para evitar o efeito de múltiplas passagens por zero.
- Classe S: a mesma da classe A;
- Classe B: o fabricante deve especificar o processo para a medição de frequência.

Neste trabalho foi utilizado o método descrito para a Classe A, porém, com intervalos de atualização da frequência a cada um minuto pelo fato de não haver variações frequentes do seu valor no sistema interligado nacional. Foi utilizado um filtro passa-baixas de primeira ordem (frequência de corte de 60 Hz) para atenuar as harmônicas e possíveis inter-harmônicas. É feita a estimação da frequência apenas para uma das fases de tensão, supõe-se que as demais fases possuam a mesma frequência fundamental, assim como as correntes.

5.3 ANÁLISE HARMÔNICA

O algoritmo digital mais conhecido e mais usual para a análise espectral de um sinal é a FFT. Porém, é necessário dar atenção aos problemas que podem ocorrer com o uso desse método, devido aos efeitos de: recobrimento, *leakage* e *picket-fence* (GIRGIS e HAM, 1980). Algumas adaptações são propostas por Xue e Yang (2002), Wang e Sun (2004) e Yang e Liu (2000) para contornar esses efeitos. Porém, neste trabalho foi utilizado o algoritmo de Goertzel (1958) para a análise espectral devido a sua simplicidade de implementação e não necessitar de uma quantidade de amostras como potência de dois, caso da FFT.

A transformada discreta de Goertzel é uma simplificação da DFT (*Discrete Fourier Transform*, em português: transformada discreta de Fourier) tradicional. Ela calcula o conteúdo espectral de frequências específicas e não o espectro todo. Isso diminui consideravelmente o volume de cálculos necessários.

Os cálculos são feitos da seguinte forma:

- A frequência alvo é transformada para um coeficiente da transformada discreta de Fourier. A relação entre a frequência alvo (f_i) e o coeficiente DFT (k) é dado pela expressão (8):

$$k = N \frac{fi}{fs}, \quad (8)$$

onde, fs é a frequência de amostragem e N é a ordem do filtro. O valor de k é o inteiro mais próximo da expressão (8).

- Para cada k , a variável de estado, $v_k(n)$, é obtida usando a expressão diferencial recursiva apresentada em (9):

$$v_k(n) = 2 \cos \frac{2\pi k}{N} v_k(n-1) - v_k(n-2) + x(n), \quad (9)$$

onde, $n = 0, 1, \dots, N$.

- Com o mesmo k , a expressão (9) é iterada até a última variável de estado, $v_k(N)$, ser obtida. Então, a saída, $y_k(N)$, é dada pela expressão (10):

$$y_k(N) = v_k(N) - W_N^k v_k(N-1), \quad (10)$$

onde, $W_N^k = e^{-2\pi k/N}$.

5.4 ESTIMAÇÃO DE POTÊNCIA

Como foi discutido no Capítulo 2, existem vários meios para se calcular as potências de um sistema elétrico. O método escolhido para ser utilizado neste trabalho foi o método do padrão IEEE (2010). Serão mostrados, na sequência, os cálculos das potências para sistemas trifásicos em condições não senoidal e de desequilíbrio de tensão apresentados em IEEE (2010).

O cálculo da potência ativa trifásica é equivalente às demais condições do sistema e é representada pela expressão (11):

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p dt, \quad (11)$$

onde p é a potência instantânea e equivale a (12) para sistemas a três fios ou a (13) para sistemas a quatro fios.

$$p = v_{ab}i_a + v_{cb}i_c = v_{ac}i_a + v_{ba}i_b = v_{ba}i_b + v_{ca}i_c, \quad (12)$$

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c, \quad (13)$$

onde, v_{xy} é a tensão entre as fases x e y , i_x é a corrente e v_x é a tensão na fase x .

Utilizando expressões no domínio da frequência para tensão e para a corrente, a norma divide a potência ativa em duas partes distintas: uma, referente à componente fundamental (P_I : potência ativa fundamental), apresentada na expressão (14), e outra equivalente à soma das componentes harmônicas (P_H : potência ativa harmônica). A potência ativa harmônica é determinada pela diferença da potência ativa total (P) e a potência ativa fundamental (P_I).

$$P_1 = P_{1a} + P_{1b} + P_{1c}, \quad (14)$$

onde, P_{1a} , P_{1b} , e P_{1c} são, respectivamente, as potências ativas fundamentais das fases a , b e c , elas são calculadas da seguinte forma:

$$P_{1x} = V_{x1} I_{x1} \cos(\theta_{x1}), \quad (15)$$

onde, V_{x1} e I_{x1} são, respectivamente, as componentes fundamentais eficazes da tensão e da corrente da fase x , e θ_{x1} é o ângulo de fase entre as duas componentes.

Para um sistema a 3 fios a potência ativa pode ser determinada pelo método dos dois wattímetros, expressão (16).

$$P_1 = P_{1ab} + P_{1cb}, \quad (16)$$

onde,

$$P_{1xy} = V_{xy1} I_{x1} \cos(\theta_{vxy1} - \theta_{ix1}), \quad (17)$$

em que, V_{xy1} e θ_{vxy1} são, respectivamente, a tensão eficaz e o ângulo de fase da tensão entre as fases x e y ; e θ_{ix1} é o ângulo de fase da corrente da fase x .

Ressalta-se que a separação entre potência ativa fundamental e harmônica é justificada na medida em que, para análise de motores elétricos de corrente alternada submetidos a condições não puramente senoidais, a presença da potência ativa harmônica pode resultar na diminuição do conjugado do motor, no aumento das perdas no ferro e no cobre e no aparecimento de ruídos indesejáveis (RODRIGUES, 2009).

De maneira semelhante a potência reativa fundamental pode ser calculada utilizando a função seno no lugar do cosseno na expressão (15) ou (17).

Na norma são descritas algumas definições para calcular os valores de tensão e corrente equivalentes para o sistema trifásico e da potência aparente efetiva. Essa tensão e essa corrente são referentes a um circuito virtual balanceado, que apresenta exatamente a mesma perda de linha de um circuito desbalanceado.

As tensões efetivas para um sistema a 4 fios são calculadas nas expressões (18) – (20):

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2]} = \sqrt{V_{e1}^2 - V_{eH}^2}, \quad (18)$$

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2]}, \quad (19)$$

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_{aH}^2 + V_{bH}^2 + V_{cH}^2) + V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2]}, \quad (20)$$

onde, V_{e1} é a componente fundamental e V_{eH} a componente harmônica da tensão efetiva (V_e).

Para um sistema a 3 fios as tensões efetivas são calculadas pelas expressões (21) – (23).

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}}, \quad (21)$$

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2}{9}}, \quad (22)$$

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2}{9}} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2}. \quad (23)$$

As correntes efetivas são calculadas nas expressões (24) – (26) para um sistema a 4 fios (para sistemas a 3 fios basta fazer I_n , I_{n1} e I_{nH} iguais a zero):

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{3}}, \quad (24)$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2}{3}}, \quad (25)$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2 + I_{nH}^2}{3}} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2}, \quad (26)$$

onde, I_{e1} é a componente fundamental e I_{eH} a componente harmônica da corrente efetiva (I_e).

Um conceito importante trazido pela norma é o de potência não-ativa (N) que, anteriormente, era conhecida na literatura por “potência fictícia”. Essa grandeza engloba todas as potências que não são enquadradas como potência ativa (tanto fundamental quanto harmônica) e é calculada pela seguinte expressão:

$$N^2 = S_e^2 - P^2, \quad (27)$$

em que S_e pode ser determinado por (28):

$$S_e = 3V_e I_e. \quad (28)$$

S_e pode ser dividido em uma parcela fundamental e em uma parcela não fundamental:

$$S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eN}^2, \quad (29)$$

onde,

$$S_{e1} = 3V_{e1} I_{e1}, \quad (30)$$

e

$$S_{eN}^2 = S_e^2 - S_{e1}^2 = D_{eI}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2. \quad (31)$$

D_{eI} é a potência de distorção devido à corrente e é calculada por (32):

$$D_{eI} = 3V_{e1} I_{eH}. \quad (32)$$

D_{eV} é a potência de distorção devido à tensão e é calculada por (33):

$$D_{eV} = 3V_{eH}I_{e1}. \quad (33)$$

S_{eH} é a potência aparente harmônica e é calculada por (34):

$$S_{eH} = 3V_{eH}I_{eH}. \quad (34)$$

De modo geral, a distribuidora é responsável por qualquer distorção de tensão por meio da impedância de fonte diferente de zero, e, geralmente, o consumidor é responsável pela distorção da corrente por meio de cargas não lineares não compensadas. D_{eV} e D_{eI} podem ser úteis para se determinar os responsáveis pela potência de distorção e também, para medição tarifária. A quantidade S_{eH} reflete a potência harmônica ativa e o produto cruzado (BERRISFORD, 2015). Há uma parcela remanesce da potência que não é bem definida, ela é determinada pela expressão (35):

$$D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 - P_{eH}^2}, \quad (35)$$

D_{eH} seria a distorção resultante do produto cruzado entre as harmônicas.

As distorções harmônicas totais para a tensão (THD_{eV}) e para a corrente (THD_{eI}) são apresentadas abaixo:

$$THD_{eV} = \frac{V_{eH}}{V_{e1}}, \quad (36)$$

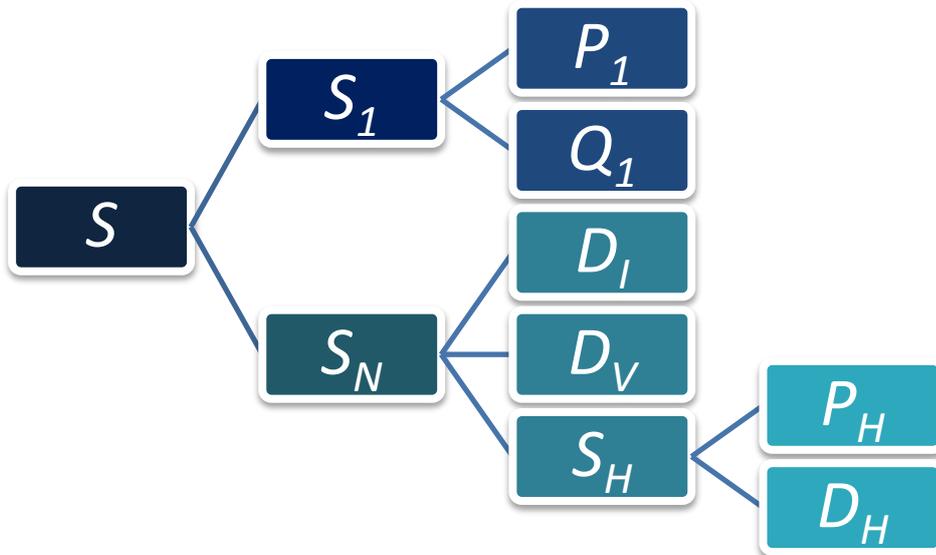
$$THD_{eI} = \frac{I_{eH}}{I_{e1}}. \quad (37)$$

E por fim o fator de potência (PF):

$$PF = \frac{P}{S_e}. \quad (38)$$

Na Fig. 20 é representada a decomposição das potências que o método do IEEE determina.

Fig. 20: Decomposição da potência aparente pelo método IEEE std. 1459-2010.



Fonte: Elaborada pelo autor.

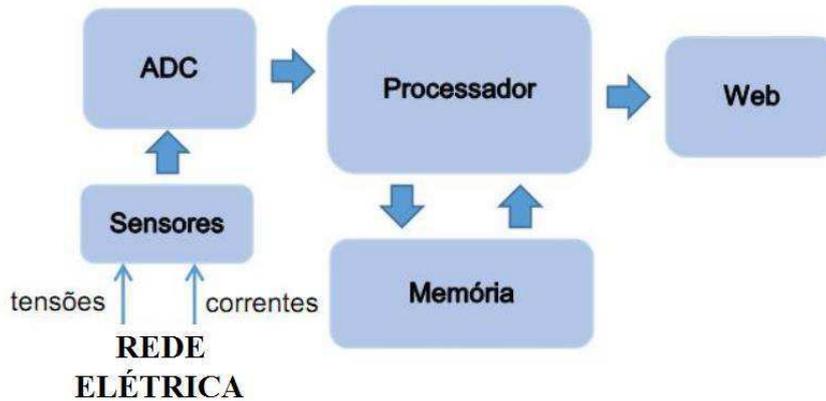
5.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O diagrama básico do dispositivo proposto é apresentado na Fig. 21. Para satisfazer os objetivos do trabalho, o equipamento necessita de um sistema de aquisição que é composto por transdutores, circuito de condicionamento, um ADC (*Analog to Digital Converter*, em português: conversor analógico para digital) de 10 bits e microcontroladores.

O processo da aquisição dos sinais de tensões e correntes segue o seguinte fluxo:

- 1) Os sinais de tensões e correntes são adquiridos por transdutores, resultando em sinais de tensão de baixa amplitude;
- 2) Os sinais resultantes dos transdutores são condicionados para tensões entre 0 e 3,3 V (tensões limites para a entrada do ADC);
- 3) Os sinais condicionados passam por um filtro passa baixas de primeira ordem para atenuar as frequências que não são de interesse;
- 4) O ADC converte amostras dos sinais analógicos filtrados em sinais digitais;
- 5) Os sinais digitais são, então, adquiridos por microcontroladores de tempo real, as PRU, e armazenados na memória.

Fig. 21: Diagrama básico do qualímetro proposto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir são detalhados os procedimentos e os componentes utilizados no sistema de aquisição de dados.

5.5.1 TRANSDUTORES

A medição das tensões é realizada utilizando um circuito somador que também servirá para condicionamento do sinal a níveis apropriados às entradas do conversor analógico/digital. O circuito de condicionamento completo será descrito no próximo subtópico.

O transdutor para a medição de corrente é o ACS712, ilustrado na Fig. 22, produzido pela Allegro. Ele é um sensor de corrente baseado no efeito hall, mede correntes de até 5 A, sua saída de tensão é de 0,5 – 4,5 V, possui incerteza de 1,5% (ALLEGRO, 2007). Com ajustes no *software* pode-se calibrar seu resultado e melhorar a acurácia.

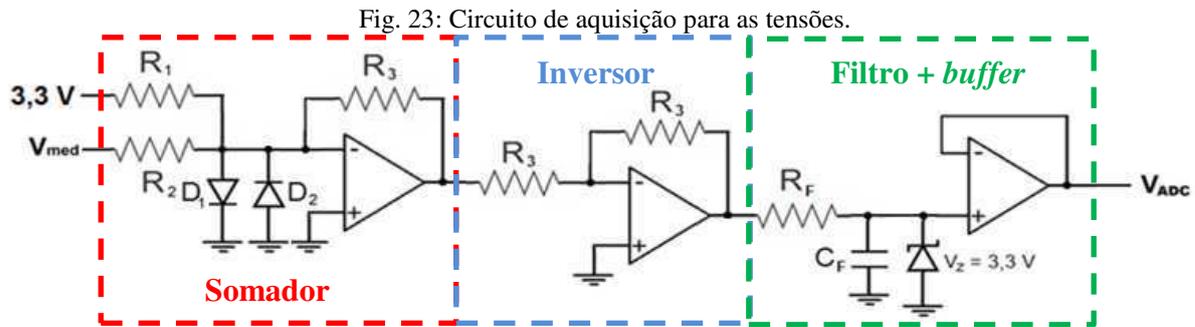
Fig. 22: Transdutor de corrente ACS712.



Fonte: Allegro (2007).

5.5.2 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO

O circuito de condicionamento da tensão é composto por um circuito somador, um circuito amplificador inversor, um filtro passa-baixas de primeira ordem e um *buffer*. A representação desse circuito é apresentada na Fig. 23.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O circuito somador é o responsável por ajustar o nível da tensão medida a um nível suportado pelo ADC (0 – 3,3 V), ou seja, ele faz uma atenuação no sinal e acrescenta uma componente CC. A expressão que relaciona as tensões de entrada com a tensão de saída do circuito somador é dada por (39):

$$V_o = -R_3 \left(\frac{3,3}{R_1} + \frac{V_{med}}{R_2} \right). \quad (39)$$

Com $R_1 = 24 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 3,3 \text{ M}\Omega$ e $R_3 = 12 \text{ k}\Omega$, a atenuação é de 275 vezes e o nível CC no sinal de 1,65 V. Se for utilizado uma margem de segurança de 0,05 V (0,05 – 3,25 V na entrada do ADC) pode-se medir uma tensão com amplitude máxima de 440 V. Entretanto, o circuito somador faz uma inversão no sinal. Por isso é necessário acrescentar um circuito inversor na sequência.

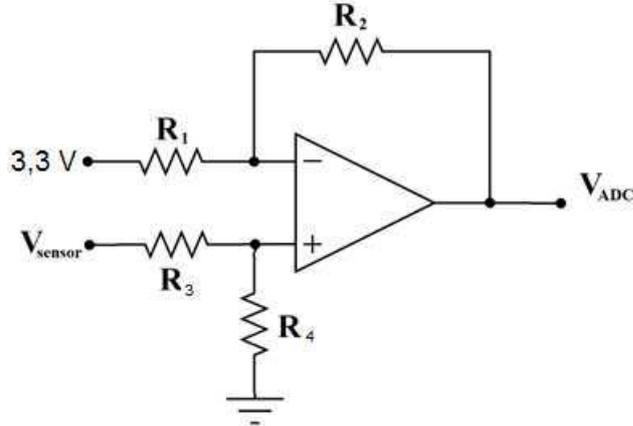
O circuito inversor da forma que está representado na Fig. 23, faz apenas uma inversão com uma amplificação unitária. O filtro de primeira ordem será detalhado no próximo subtópico e o *buffer* tem a função de criar uma saída de baixa impedância para a entrada do ADC.

Os diodos D_1 , D_2 e o zener tem a função de proteção do conversor. Eles protegem o conversor contra surtos de tensão no ponto de medição não permitindo que surja uma tensão superior a 3,3 V na entrada do ADC.

O circuito de condicionamento para os transdutores de corrente é necessário para ajustar os níveis de tensão da saída para 0 – 3,3 V. Para isso, é necessário centralizar a tensão em 1,65 V

e fazer uma atenuação. Para tanto, será utilizado um circuito subtrator, como mostrado na Fig. 24.

Fig. 24: Circuito subtrator para o condicionamento da tensão de saída do transdutor de corrente.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O circuito subtrator da Fig. 24 possui a relação de tensões conforme a expressão (40):

$$V_{ADC} = V_{sensor} \frac{R_4 R_1 + R_2}{R_1 R_3 + R_4} - 3,3 \frac{R_2}{R_1}. \quad (40)$$

Fazendo $R_1 = 220 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 15 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 20 \text{ k}\Omega$ e $R_4 = 47 \text{ k}\Omega$ o objetivo é alcançado fazendo a tensão de saída do sensor (0,5 – 4,5 V) ficar com valor entre 0,15 e 3,15 V.

O circuito subtrator é seguido pelo conjunto do filtro + *buffer* da mesma forma apresentada na Fig. 23 para o condicionamento da tensão.

5.5.3 FILTROS

As tensões V_{ADC} dos circuitos das Fig. 22 e 24 devem passar por um filtro passa baixas antes da entrada do ADC para eliminar ruídos de alta frequência.

Um filtro passa baixas pode ser concebido com um resistor (R) e um capacitor (C), como mostrado na Fig. 25. A frequência de corte (F_c) do filtro é dada por (41):

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (41)$$

teorema de *Nyquist*. O teorema de *Nyquist* afirma que a frequência de amostragem de um sinal analógico, para que possa posteriormente ser reconstituído com o mínimo de perda de informação, deve ser maior ou igual a duas vezes a largura de banda desse sinal, ou seja, a F_a deve ser maior ou igual a duas vezes a maior frequência do sinal amostrado.

Para não haver recobrimento a frequência de amostragem tem que ser um pouco maior que o dobro da frequência mínima porque o filtro utilizado não é ideal. Uma boa frequência de amostragem seria de 6600 Hz, o que permite uma banda de transição do filtro de 10%, ou seja, 300 Hz.

5.5.5 AQUISIÇÃO DOS DADOS DIGITAIS

A aquisição dos dados digitais, ou seja, a comunicação e armazenamento dos dados do ADC são feitos através dos microcontroladores presentes no processador principal da BBB, as PRU. Os conceitos básicos das PRU foram descritos no Capítulo 4. Estas se comunicam com o ADC por meio da interface serial SPI.

Os dados são coletados na frequência de amostragem especificada no item anterior e armazenado na memória da PRU o correspondente a dois ciclos de cada um dos oito sinais. Após, é enviado uma interrupção para um programa em *.c*, o qual é responsável também pelo carregamento dos programas nas PRU. Com a interrupção recebida pelo programa *.c*, este faz a leitura da memória da PRU e armazena os dados em vetores. Os dados são enviados para o programa em *.c* recursivamente até completar 12 ciclos. Na sequência, é realizado os cálculos necessários para se determinar os parâmetros de QEE. Então, um arquivo *.txt* (*parametros.txt*) é gerado com os parâmetros de QEE, assim como mais oito arquivos *.txt* contendo amostras dos oito sinais.

5.6 MONITORAMENTO *ON LINE*

Para a disponibilização dos dados calculados pelo dispositivo é criado um servidor *web* na BBB. É utilizado o servidor Apache2, como descrito no Capítulo 4. Este servidor sempre permanece em execução na BBB. Uma página *web* em *.php* é criado para obter os dados armazenados no arquivo *parametros.txt*.

A página em *.php* pode então ser acessada por qualquer indivíduo que possua um aparelho que rode um *browser* de internet (exemplos: Google Chrome, Mozilla Firefox, Internet

Explore); esteja conectado à rede que o dispositivo está conectado; e saiba o endereço IP do analisador de energia.

De forma que os dados da página fossem atualizados automaticamente foi desenvolvido um *script* em *javascript* para a página recarregar por si só a cada meio segundo. O *script* tem extensão *.html*.

Para deixar a página *web* com uma informação visual sobre os sinais medidos, foi utilizada a biblioteca gráfica *PHPPlot* para traçar os gráficos das tensões e correntes.

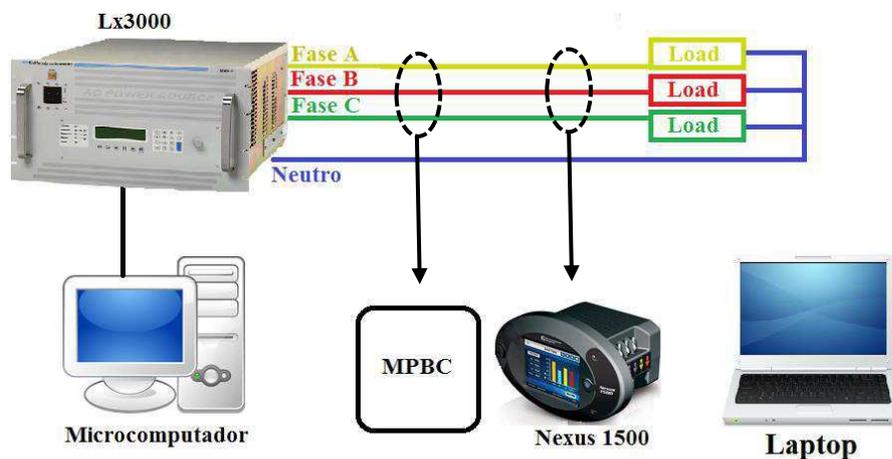
Foram vistos neste capítulo todas as técnicas e dispositivos utilizados para a criação do sistema de aquisição de dados de grandezas elétricas aplicado a medição e o monitoramento de QEE proposto. No capítulo seguinte será tratado dos métodos experimentais utilizados para validar o sistema assim como serão analisados os resultados obtidos.

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1 ARRANJO EXPERIMENTAL

O sistema de aquisição proposto, para maior simplificação, será referenciado a partir de agora como MPBC (Medidor Proposto de Baixo Custo). O arranjo experimental pode ser visualizado na Fig. 27 e a descrição dos seus componentes são apresentados em sequência.

Fig. 27: Arranjo experimental utilizado para a validação do medidor proposto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

- *Laptop*: computador conectado à internet para acessar a página *web* criada pelo MPBC.
- *Load*: são placas que possuem, cada uma, 4 receptáculos para serem conectadas lâmpadas.
- Lx3000: fonte programável da California Instruments. Ela pode gerar tensões de até 300 Vac e fornecer uma potência de até 3000 VA. É possível programá-la utilizando um computador e gerar formas de ondas de tensão variadas. A fonte está conectada a três placas, nomeadas *Load* na Fig. 27.
- Microcomputador: computador utilizado apenas para programar a fonte Lx3000 através de uma comunicação USB.
- Nexus 1500: qualímetro bem consolidado no mercado fabricado pela Electro Industries. Os seus resultados serão utilizados para a validação dos parâmetros

calculados pelo medidor proposto. Ele está fazendo a medição das tensões e correntes geradas pela fonte programável.

- MPBC: medidor proposto, ele está fazendo a medição das tensões e correntes das três fases e do neutro.

6.2 VALIDAÇÃO DO ALGORITMO DE CÁLCULO

Para validar o método do IEEE implementado para calcular as potências foram geradas amostras de sinais de tensão e corrente no MATLAB e gravados em um arquivo de texto. Os sinais de tensão e corrente foram os mesmos gerados por Will *et al.* (2011). Na sequência, o arquivo de texto foi lido pelo programa do MPBC. Os resultados apresentados por Will *et al.* (2011), que também utiliza o método do IEEE, podem ser visualizados na Tabela 12. Os resultados calculados pelo programa do sistema proposto são expostos na Tabela 13.

Tabela 12: Parâmetros retirados de Will *et al.* (2011).

PARÂMETROS SIMULADOS			
Indicador	Combinado	Potência Fundamental	Potência não Fundamental
Aparente (VA)	$S = 4349,46$	$S_1 = 2613,27$	$S_N = 3476,88$ $S_H = 627,93$
Ativa (W)	$P = 2124,03$	$P_1 = 2262,34$	$P_H = -138,32$
Não ativa (var)	$N = 3795,57$	$Q_1 = -1306,19$	-
Utilização da linha	$PF = 0,49$	$FP_1 = 0,87$	$D_V = 484,75$ $D_I = 3385,17$ $D_H = 612,51$
Poulução Harmônica	-	-	$THD_V = 19\%$ $THD_I = 130\%$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se observar comparando as duas tabelas que os resultados foram quase idênticos, tendo como maior diferença relativa percentual de 2,32% no cálculo da THD_V e de 0,35% na THD_I . Nos demais cálculos as diferenças foram inferiores a 0,14% evidenciando que o algoritmo de cálculo presente no dispositivo está computando de maneira adequada e fiel.

Tabela 13: Parâmetros calculados pelo programa do MPBC.

MPCB			
Indicador	Combinado	Potência Fundamental	Potência não Fundamental
Aparente (VA)	S = 4349,45	S ₁ = 2613,17	S _N = 3476,94 S _H = 628,22
Ativa (W)	P = 2124,01	P ₁ = 2262,26	P _H = -138,25
Não ativa (var)	N = 3795,57	Q ₁ = -1307,99	-
Utilização da linha	PF = 0,49 FD = 0,02	FP ₁ = 0,87	D _V = 484,95 D _I = 3385,15 D _H = 612,81
Poulução Harmônica	-	-	THD _V = 18,56% THD _I = 129,54%

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados seis experimentos para avaliar o medidor proposto em várias condições de carga e de tensões. Os quatro primeiros foram realizados com cargas quase puramente resistivas (lâmpadas incandescentes) e os dois seguintes com cargas mistas (lâmpadas incandescentes + lâmpadas fluorescentes compactas). Em todos os experimentos as formas de onda das tensões e correntes foram adquiridas por um osciloscópio e comparadas com as formas de onda adquiridas pelo sistema proposto. Em paralelo foi utilizado o Nexus 1500, como mostrado no arranjo experimental, Fig. 27. O Nexus é um qualímetro certificado pelo INMETRO e possui incertezas para o cálculo da tensão inferiores a 0,2%. Por isso, seus parâmetros de tensão e corrente foram considerados como valores padrão nas comparações.

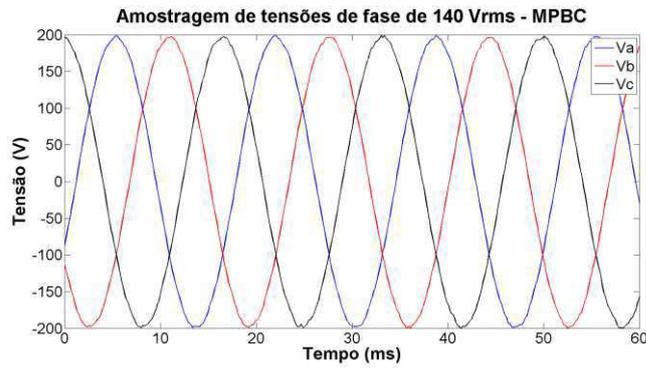
A seguir serão descritos os seis experimentos e serão apresentados e discutidos os seus resultados.

6.3.1 EXPERIMENTO 1 – CARGA RESISTIVA EQUILIBRADA, TENSÃO BALANCEADA

No primeiro experimento foi gerada uma tensão trifásica balanceada em 140 V_{rms}, por meio da fonte programável, e aplicada a lâmpadas incandescentes. As lâmpadas foram arrançadas de tal forma que resultasse em uma carga trifásica equilibrada.

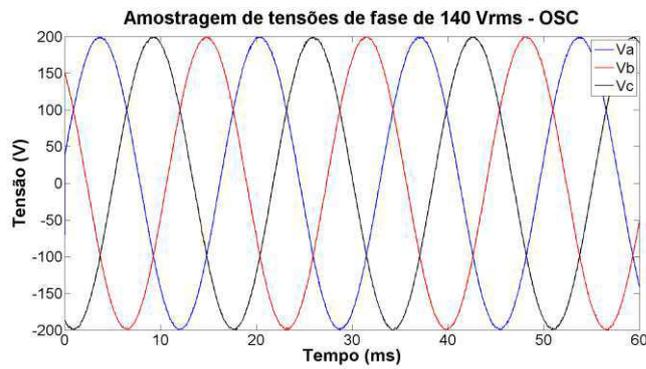
A aquisição das formas de onda das tensões e correntes por meio do MPBC são mostradas, respectivamente, nas Figs. 28 e 30. Já as formas de onda adquiridas pelo osciloscópio são mostradas na Fig. 29 para a tensão e na Fig. 31 para a corrente.

Fig. 28: Formas de onda das tensões adquiridas pelo MPBC – Experimento 1.



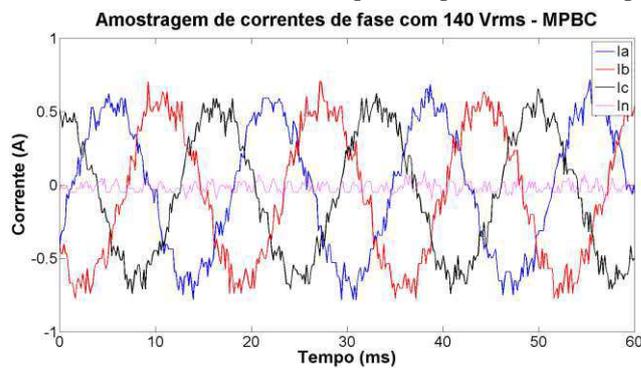
Fonte: Elaborada pelo autor.

Fig. 29: Formas de onda das tensões adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 1.



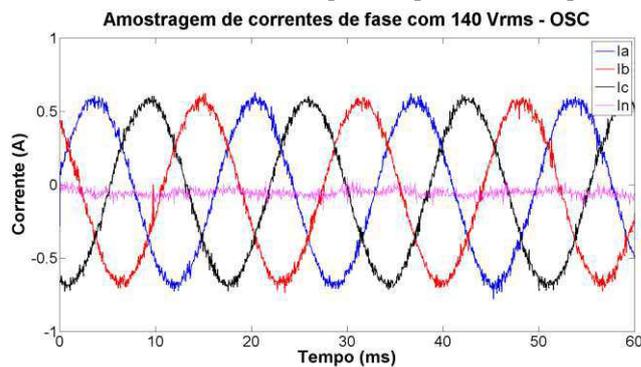
Fonte: Elaborada pelo autor.

Fig. 30: Formas de onda das correntes adquiridas pelo MPBC – Experimento 1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

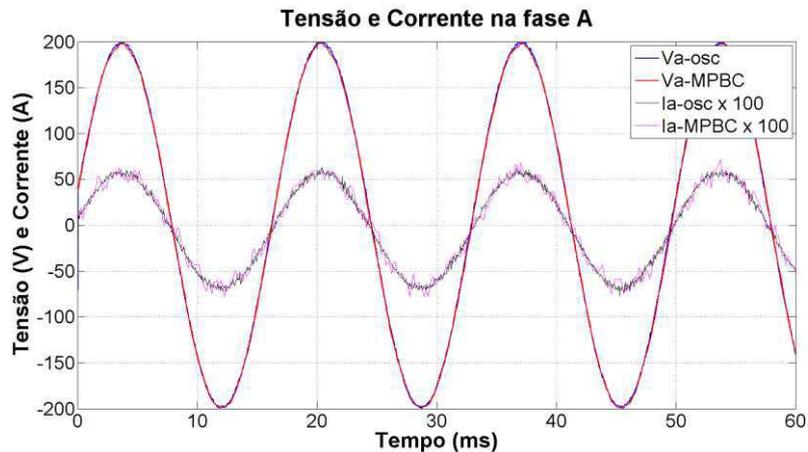
Fig. 31: Formas de onda das correntes adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os sinais de tensão e corrente para a fase A são apresentados na Fig. 32 para melhor comparação entre as formas de ondas adquiridas pelo sistema proposto e pelo osciloscópio.

Fig. 32: Formas de onda de tensão e corrente na fase A adquirida pelo MPBC e pelo osciloscópio – Experimento 1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para quantificar a comparação foi avaliado o coeficiente de determinação R^2 entre as formas de onda apresentadas na Fig. 32. O coeficiente de determinação R^2 é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico em relação aos valores observados. O R^2 varia entre zero e um, indicando o quanto o modelo consegue se aproximar dos valores observados. Porém, utilizou-se os dados coletados pelo osciloscópio como o conjunto de valores observados (dados reais) e os dados coletados pelo MPBC como os dados estimados. O coeficiente é determinado pela seguinte expressão (MATHWORKS, 2016):

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad (42)$$

onde:

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

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

O coeficiente de determinação para o sinal de tensão da Fig. 32 foi de 0,9963 e para a corrente foi de 0,9749. Tais resultados demonstram uma boa acurácia dos dados amostrados. Um dos possíveis motivos para uma maior diferença na corrente são os transdutores de corrente utilizados que injetam ruído no sinal. O ruído poderá ser reduzido quando todo o circuito de

condicionamento e os transdutores forem implementados em uma placa de circuito impresso única.

Os parâmetros calculados pelo sistema utilizando os sinais amostrados são apresentados nas tabelas a seguir. Na Tabela 14 são apresentados os valores eficazes das tensões e correntes calculados pelo medidor proposto, assim como, as tensões e correntes eficazes calculadas pelo Nexus 1500. É possível constatar uma diferença insignificante para a tensão, de no máximo 0,21% na fase B; já para a corrente obteve-se uma diferença superior: 5,12%, também na fase B.

Tabela 14: Valores eficazes das tensões e correntes do experimento 1.

Fase	MPCB		Nexus 1500		ϵ_r %	
	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão	Corrente
A	140,10	0,441	140,09	0,43	0,01%	2,56%
B	139,82	0,452	140,12	0,43	-0,21%	5,12%
C	140,07	0,422	140,09	0,43	-0,01%	-1,86%
N	0	0,024	-	-	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 15 são apresentados os parâmetros calculados pelo MPBC utilizando o método IEEE. O único desses parâmetros que se pode comparar com os parâmetros calculados pelo Nexus, apresentados na Tabela 16, é a potência ativa, pois é o único parâmetro que utiliza o mesmo algoritmo de cálculo. O erro para esse parâmetro foi de 0,99%. Os demais parâmetros são calculados de forma diferente pois como explicado no tópico 2.1 não existe uma metodologia consolidada para o cálculo das potências reativas. Porém, constata-se que, para as condições empregadas no experimento 1, os parâmetros tiveram valores semelhantes. Com o intuito de mostrar a flexibilidade do medidor proposto e para se fazer uma comparação mais direta, foi implementado no MPBC o método de cálculo empregado pelo Nexus. Os resultados são apresentados na Tabela 16. O único valor que obteve uma discrepância significativa foi a da potência reativa. O motivo pode estar relacionado com a aquisição e, por consequência, o cálculo da corrente, que apesar de ter sido obtida uma pequena diferença quando comparada com a aquisição feita com o osciloscópio e pelo Nexus, essa diferença foi significativa no cálculo da potência reativa.

O algoritmo de cálculo das potências empregado pelo Nexus 1500 (ELECTRO INDUSTRIES, 2016) são apresentadas nas expressões abaixo. A potência aparente para cada fase é dada por (43), a da potência total por (44) e a da potência reativa total por (45). Vale lembrar que a potência ativa P já foi definida na expressão (11).

$$VA_x = V_{RMS_x} \cdot I_{RMS_x} \quad (43)$$

$$VA_T = VA_a + VA_b + VA_c \quad (44)$$

$$var_T = \sqrt{VA_T^2 - P^2} \quad (45)$$

Tabela 15: Parâmetros calculados pelo MPBC no experimento 1.

MPCB			
Indicador	Combinado	Potência Fundamental	Potência não Fundamental
Aparente (VA)	S = 184,26	S _I = 182,52	S _N = 25,29 S _H = 0,17
Ativa (W)	P = 182,87	P _I = 182,37	P _H = 0,50
Não Ativa (var)	N = 22,58	Q _I = -7,35	-
Utilização da Linha	FP = 0,99 FD = 0,00	FP _I = 1,00	D _V = 1,19 D _I = 25,26 D _H = 0,47
Poulução Harmônica	-	-	THD _V = 0,65% THD _I = 13,84%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 16: Parâmetros calculados com o algoritmo do Nexus 1500 no experimento 1.

	Nexus 1500	MPBC	ϵ_r %
Aparente (VA)	181,08	184,09	1,66%
Ativa (W)	181,07	182,87	0,99%
Reativa (var)	-1,86	-21,18	-1038,71%
Utilização de Linha	1,00	0,99	-1,00%

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.3.2 EXPERIMENTO 2 – CARGA RESISTIVA DESEQUILIBRADA, TENSÃO BALANCEADA

Em um segundo momento, a fonte programável foi utilizada e uma tensão de alimentação de 220 Vrms puramente senoidal foi aplicada em uma carga constituída por lâmpadas incandescentes, com diferentes potências por fase. Os valores eficazes são apresentados na Tabela 17. As formas de onda das tensões e corrente podem ser visualizadas na Fig. 33 e 34. Os parâmetros de potência calculados pelo sistema proposto são apresentados na Tabela 18.

Tabela 17: Valores eficazes das tensões e correntes do experimento 2.

Fase	MPCB		Nexus 1500		ε_r %	
	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão	Corrente
A	220,28	1,171	220,08	1,17	0,09%	0,09%
B	220,68	1,017	220,22	0,99	0,21%	2,72%
C	220,69	1,469	220,21	1,46	0,22%	0,62%
N	0	0,433	-	-	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 18: Parâmetros calculados pelo MPBC no experimento 2.

MPCB			
Indicador	Combinado	Potência Fundamental	Potência não Fundamental
Aparente (VA)	$S = 832,59$	$S_1 = 823,48$	$S_N = 122,79$ $S_H = 1,23$
Ativa (W)	$P = 799,15$	$P_1 = 797,35$	$P_H = 1,80$
Não Ativa (var)	$N = 233,59$	$Q_1 = -205,83$	-
Utilização da Linha	$FP = 0,96$ $FD = 0,00$	$FP_1 = 0,97$	$D_V = 8,26$ $D_I = 122,51$ $D_H = 1,32$
Poulução Harmônica	-	-	$THD_V = 1,00\%$ $THD_I = 14,88\%$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores eficazes de tensão e corrente adquiridos pelo Nexus também são apresentados na Tabela 17 e os valores de potência preenchem a Tabela 19.

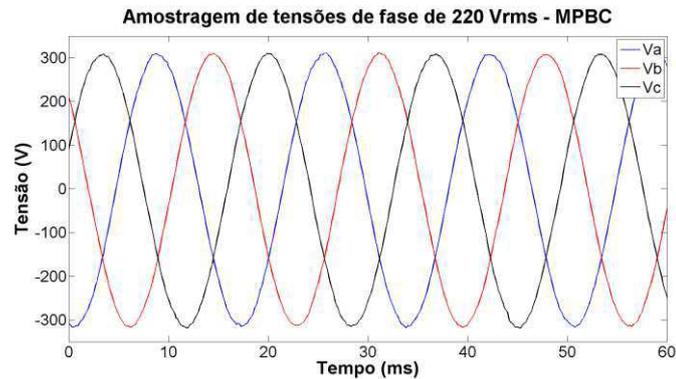
Tabela 19: Parâmetros calculados com o algoritmo do Nexus 1500 no experimento 2.

	Nexus 1500	MPBC	ε_r %
Aparente (VA)	795,56	806,57	1,38%
Ativa (W)	795,50	799,15	0,46%
Reativa (var)	-9,29	-109,18	-1075,24%
Utilização de Linha	0,999	0,99	-0,90%

Fonte: Elaborada pelo autor.

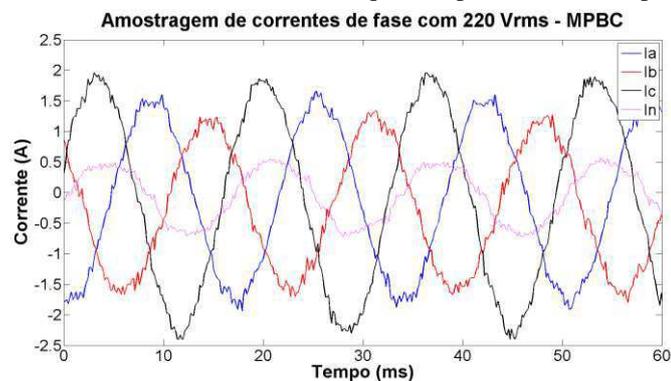
Comparando os valores eficazes determinados pelo sistema proposto com os valores calculados pelo Nexus 1500, verifica-se um erro baixo. Como pode ser visto na Tabela 17, o maior erro percentual relativo foi de 0,22% na fase C para a tensão e de 2,72% na fase B para a corrente.

Fig. 33: Formas de onda das tensões adquiridas pelo MPBC – Experimento 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Fig. 34: Formas de onda das correntes adquiridas pelo MPBC – Experimento 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

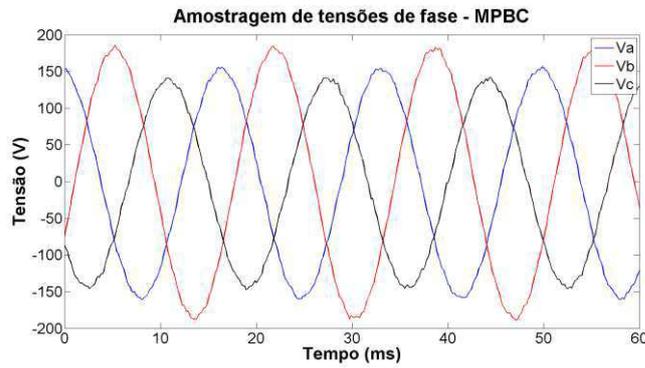
Analisando os dados apresentados nas Tabelas 18 e 19 constata-se que os valores são próximos para as potências. O valor da potência ativa obteve uma diferença relativa percentual de apenas 0,46%. Novamente foi obtida uma discrepância grande na potência reativa calculada pelo Nexus comparada com a calculada pelo MPBC tanto com o método do IEEE quanto com o método do Nexus.

6.3.3 EXPERIMENTO 3 – CARGA RESISTIVA DESEQUILBRADA, TENSÃO DESBALANCEADA

O terceiro experimento realizado diferencia do experimento anterior apenas na forma de onda da tensão aplicada. Neste experimento foi aplicada agora uma tensão desbalanceada para verificar o cálculo do fator de desequilíbrio e o funcionamento do sistema nessas condições. Foram aplicadas as tensões de 110 Vrms na fase A, 130 Vrms na fase B e 100 Vrms na fase C.

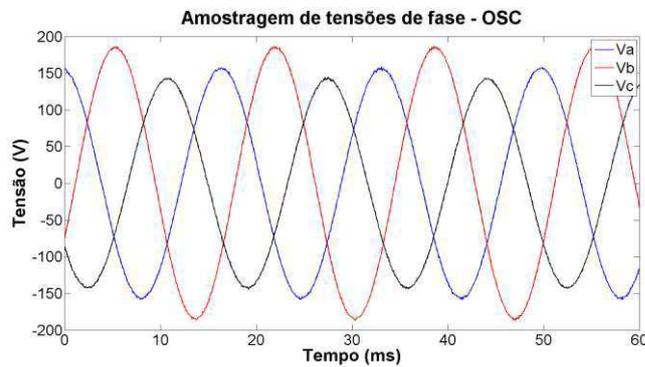
As formas de onda das tensões e correntes adquiridas pelo MPBC e pelo osciloscópio são apresentadas nas Figs. 35 – 38.

Fig. 35: Formas de onda das tensões adquiridas pelo MPBC – Experimento 3.



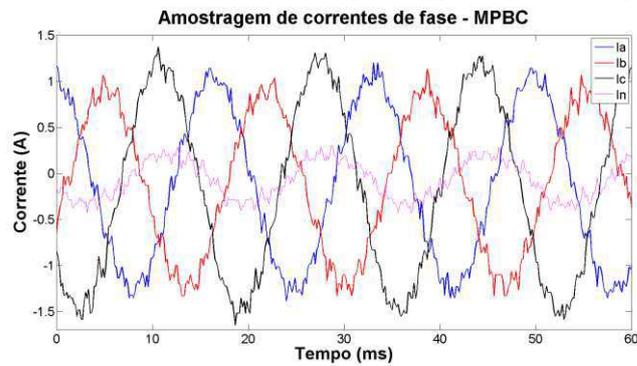
Fonte: Elaborada pelo autor.

Fig. 36: Formas de onda das tensões adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 3.



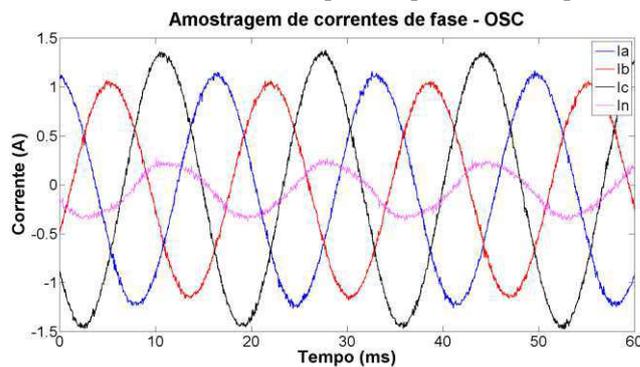
Fonte: Elaborada pelo autor.

Fig. 37: Formas de onda das correntes adquiridas pelo MPBC – Experimento 3.



Fonte: Elaborada pelo autor.

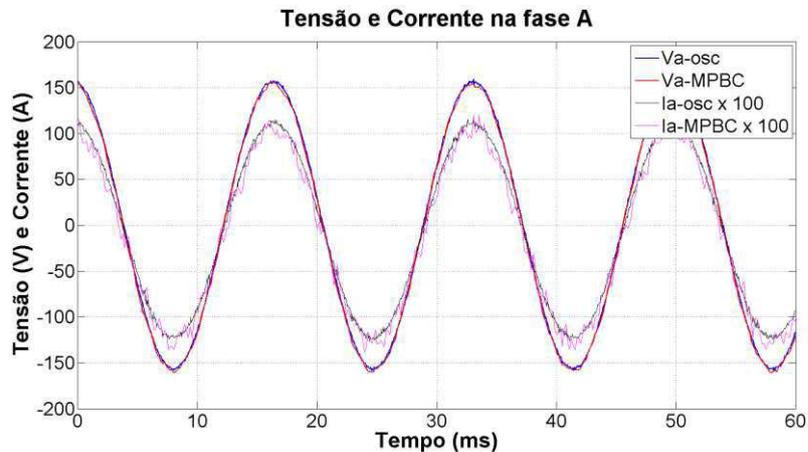
Fig. 38: Formas de onda das correntes adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 3.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os sinais de tensão e corrente para a fase A são apresentados na Fig. 39 para melhor comparação entre as formas de ondas adquiridas pelo sistema proposto e pelo osciloscópio.

Fig. 39: Formas de onda de tensão e corrente na fase A adquirida pelo MPBC e pelo osciloscópio – Experimento 3.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O coeficiente de determinação para o sinal de tensão da Fig. 39 foi de 0,9990 e para a corrente foi de 0,9859. Tais resultados demonstram uma exatidão elevada dos dados amostrados.

Os resultados para as tensões eficazes determinadas tanto pelo MPBC quanto pelo Nexus são apresentados na Tabela 20 e nas Tabelas 21 e 22 os parâmetros calculados pelos métodos do IEEE e do Nexus para ambos os dispositivos.

Tabela 20: Valores eficazes das tensões e correntes do experimento 3.

Fase	MPCB		Nexus 1500		ϵ_r %	
	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão	Corrente
A	110,29	0,823	110,04	0,81	0,23%	1,60%
B	129,83	0,764	130,16	0,75	-0,25%	1,87%
C	100,14	0,961	100,1	0,96	0,04%	0,10%
N	0	0,203	-	0,19	-	6,84%

Fonte: Elaborada pelo autor.

O valor do fator de desequilíbrio calculado pelo sistema proposto foi de 8%. Realizando o cálculo do fator de desequilíbrio, expressão (2), utilizando os valores de tensão determinados pelo Nexus foi obtido 8,15%. Com uma diferença de apenas 0,15% no cálculo, pode-se dizer que o cálculo do sistema proposto para o FD nas condições do experimento 3 é confiável.

Em relação aos demais parâmetros não foram constatadas diferenças nas análises já realizadas no experimento 2.

Tabela 21: Parâmetros calculados pelo MPBC no experimento 3.

MPCB			
Indicador	Combinado	Potência Fundamental	Potência não Fundamental
Aparente (VA)	S = 294,42	S ₁ = 290,17	S _N = 49,81 S _H = 0,71
Ativa (W)	P = 282,91	P ₁ = 281,91	P _H = 1,00
Não Ativa (var)	N = 81,51	Q ₁ = 68,77	-
Utilização da Linha	FP = 0,96 FD = 0,08	FP ₁ = 0,97	D _V = 4,15 D _I = 49,63 D _H = 0,71
Poulução Harmônica	-	-	THD _V = 1,43% THD _I = 17,10%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 22: Parâmetros calculados com o algoritmo do Nexus 1500 no experimento 3.

	Nexus 1500	MPBC	ϵ_r %
Aparente (VA)	282,8	286,19	1,20%
Ativa (W)	282,8	282,91	0,04%
Reativa (var)	-2,26	-43,23	-1812,83%
Utilização de Linha	0,999	0,989	-1,05%

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.3.4 EXPERIMENTO 4 – CARGA RESISTIVA, TENSÃO BALANCEADA COM HARMÔNICAS

No quarto experimento, a fonte foi programada para gerar as componentes harmônicas descritas na Tabela 23, com uma tensão eficaz de 100 V nas três fases. A carga continuou sendo as lâmpadas incandescentes formando uma carga trifásica quase puramente resistiva.

Tabela 23: Componentes harmônicas das tensões geradas pela fonte programável.

Harm.	Amplitude (%)	Fase (graus)
Fund.	100	
3	35,13	83
5	18,77	168
7	9,79	-49
9	8,11	160

Fonte: Elaborada pelo autor.

O resultado determinado pelo sistema proposto para as componentes harmônicas da tensão e corrente para a fase A são apresentadas na Tabela 24. Fazendo a análise desta, constataram-se erros relativamente baixos, sendo o mínimo de 0,88% e o máximo de 2,22% para as amplitudes da tensão. Os erros para as fases foram maiores, chegando a 26,53% na harmônica de ordem 7. Porém, nada que possa afetar o bom desempenho do sistema na análise de frequência de um sinal. Da tabela, também se pode verificar que a análise para a corrente foi

similar, o que é esperado pois a carga é quase que puramente resistiva. Os valores para as demais fases não foram computados pois não haverá diferenças significativas.

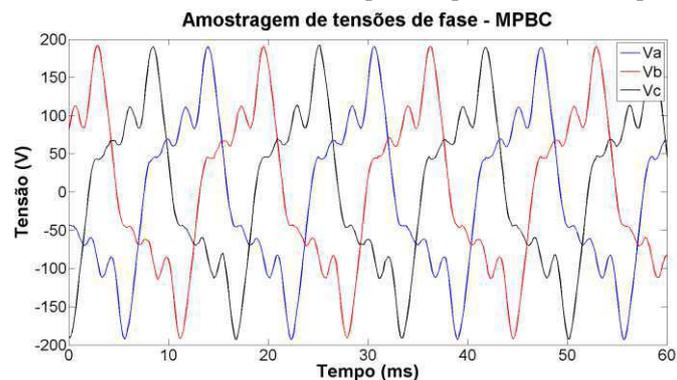
Tabela 24: Amplitude e fase das componentes harmônicas de tensão e corrente determinadas pelo MPBC no experimento 4.

Harm.	Amplitude da Tensão (%)	ε_r %	Fase da Tensão (graus)	ε_r %	Amplitude da Corrente (%)	Fase da Corrente (graus)
Fund.	100	-	0	-	100	0
3	34,82	-0,88%	79	-4,82%	33,67	81
5	18,57	-1,07%	160	-4,76%	18,57	166
7	9,67	-1,23%	-62	-26,53%	10,06	-60
9	7,93	-2,22%	144	-10%	8,06	142

Fonte: Elaborada pelo autor.

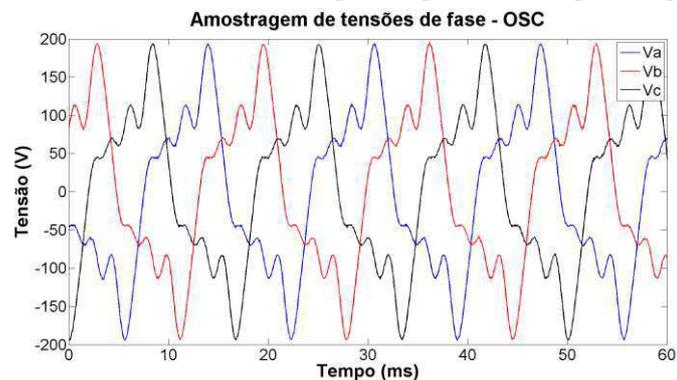
As formas de onda das tensões e correntes adquiridas pelo MPBC e pelo osciloscópio são apresentadas nas Figs. 40 – 43.

Fig. 40: Formas de onda das tensões adquiridas pelo MPBC – Experimento 4.



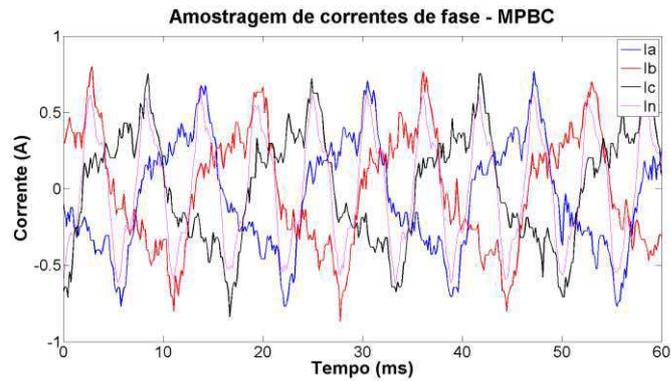
Fonte: Elaborada pelo autor.

Fig. 41: Formas de onda das tensões adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 4.



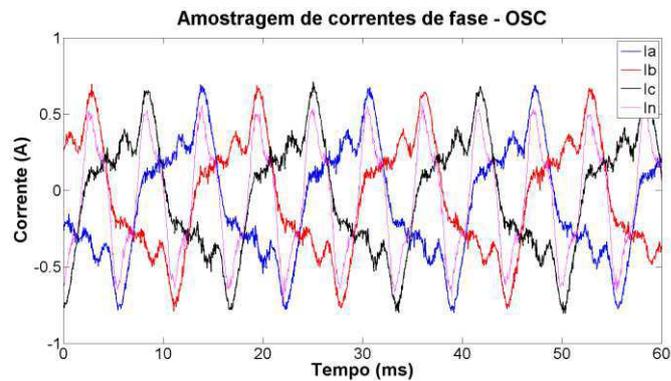
Fonte: Elaborada pelo autor.

Fig. 42: Formas de onda das correntes adquiridas pelo MPBC – Experimento 4.



Fonte: Elaborada pelo autor.

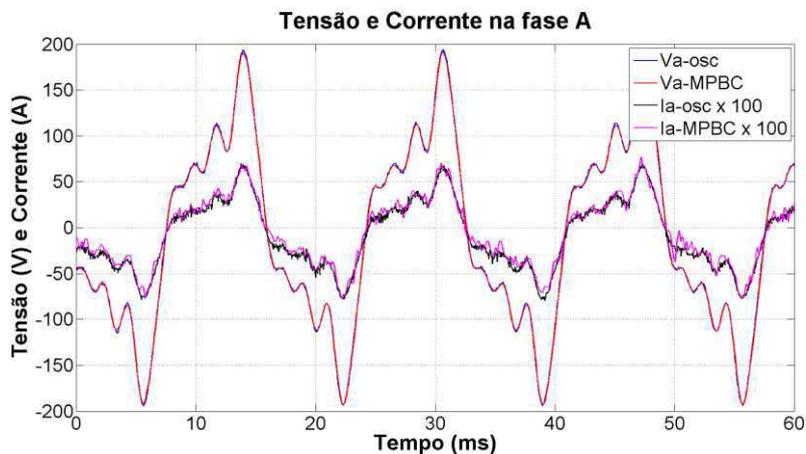
Fig. 43: Formas de onda das correntes adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 4.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os sinais de tensão e corrente para a fase A são apresentados na Fig. 44 para melhor comparação entre as formas de ondas adquiridas pelo sistema proposto e pelo osciloscópio.

Fig. 44: Formas de onda de tensão e corrente na fase A adquirida pelo MPBC e pelo osciloscópio – Experimento 4.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O coeficiente de determinação para o sinal de tensão da Fig. 44 foi de 0,9996 e para a corrente foi de 0,9692. Tais resultados demonstram uma exatidão elevada dos dados amostrados.

Os demais parâmetros calculados são apresentados nas Tabelas 25 – 27, não apresentando diferenças nas análises já feitas. Contudo, é interessante destacar o resultado apresentado para o fator de potência calculado pelo método do IEEE. Seu resultado foi de 0,89 contra 0,999 do fator de potência calculado pelo Nexus. Isso se deve ao fato do método do IEEE considerar outras potências não-ativas e não só a potência reativa.

Tabela 25: Valores eficazes das tensões e correntes do experimento 4.

Fase	MPCB		Nexus 1500		ε_r %	
	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão	Corrente
A	99,84	0,360	100,08	0,36	-0,24%	0,00%
B	99,84	0,374	100,09	0,36	-0,25%	3,89%
C	99,82	0,357	100,04	0,36	-0,22%	-0,83%
N	0	0,366	-	0,36	-	1,67%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 26: Parâmetros calculados pelo MPBC no experimento 4.

MPCB			
Indicador	Combinado	Potência Fundamental	Potência não Fundamental
Aparente (VA)	S = 122,5	S ₁ = 93,22	S _N = 79,48 S _H = 22,88
Ativa (W)	P = 108,71	P ₁ = 93,18	P _H = 15,53
Não Ativa (var)	N = 56,47	Q ₁ = 2,82	-
Utilização da Linha	FP = 0,89 FD = 0,00	FP ₁ = 1,00	D _V = 30,6 D ₁ = 69,69 D _H = 16,8
Poulução Harmônica	-	-	THD _V = 32,82% THD _I = 74,76%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 27: Parâmetros calculados com o algoritmo do Nexus 1500 no experimento 4.

	Nexus 1500	MPBC	ε_r %
Aparente (VA)	108,68	108,92	0,22%
Ativa (W)	108,68	108,71	0,03%
Reativa (var)	0,94	6,73	616,27%
Utilização de Linha	0,999	0,998	-0,09%

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.3.5 EXPERIMENTO 5 – CARGA MISTA, TENSÃO BALANCEADA

A partir do experimento 5 será utilizada um outro tipo de carga, um conjunto de lâmpadas incandescentes e fluorescentes compactas. Esse conjunto de lâmpadas pode ser considerado uma carga não-linear visto que a lâmpada fluorescente compacta possui um circuito eletrônico com essa característica.

Neste experimento foi gerada uma tensão trifásica balanceada de 140 Vrms por fase. Os valores obtidos para as tensões e correntes eficazes pelo dispositivo proposto é apresentada na

Tabela 28 juntamente com as tensões e correntes eficazes determinadas pelo Nexus. A partir da análise desses valores é possível verificar que o erro para as tensões continua insignificante de no máximo 0,18% na fase C. Para a corrente o erro máximo foi de 1,02% também na fase B. Não foi comparado erro no neutro pois o Nexus não faz a medição do neutro, ele determina esse valor a partir do cálculo com as demais correntes.

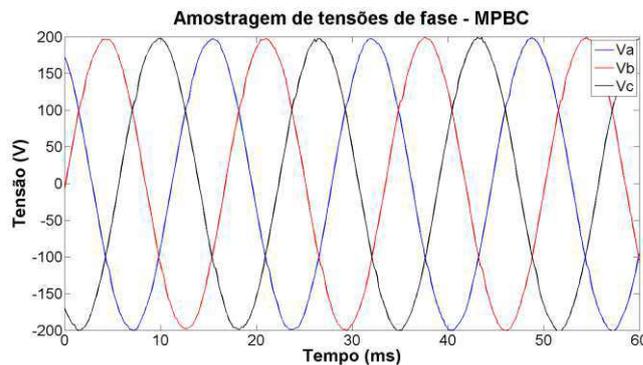
Tabela 28: Valores eficazes das tensões e correntes do experimento 5.

Fase	MPCB		Nexus 1500		ε_r %	
	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão	Corrente
A	140,11	0,976	140,08	0,98	0,01%	-0,41%
B	139,96	0,970	140,16	0,98	-0,11%	-1,02%
C	140,33	0,983	140,18	0,98	0,18%	0,31%
N	0	1,094	-	1,07	-	2,24%

Fonte: Elaborada pelo autor.

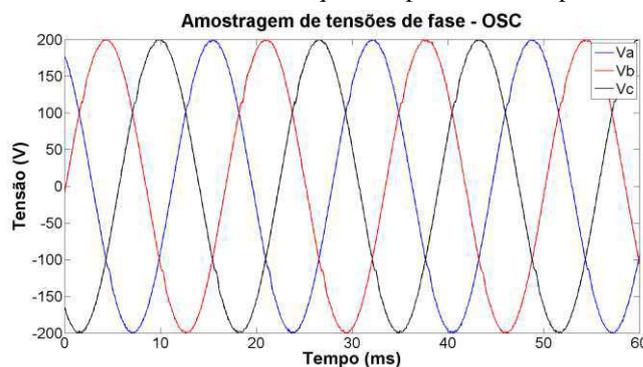
As formas de onda das tensões e correntes adquiridas pelo MPBC e pelo osciloscópio são apresentadas nas Figs. 45 – 48.

Fig. 45: Formas de onda das tensões adquiridas pelo MPBC – Experimento 5.



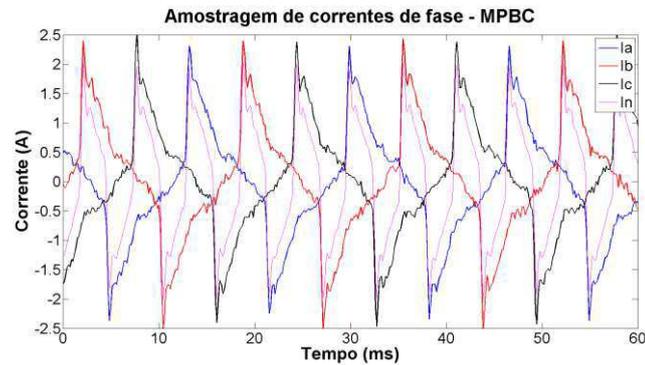
Fonte: Elaborada pelo autor.

Fig. 46: Formas de onda das tensões adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 5.



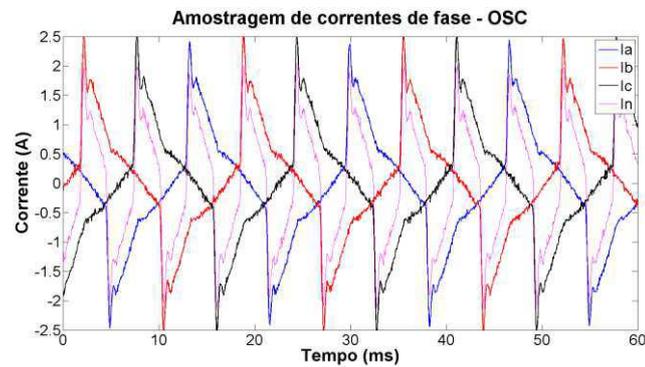
Fonte: Elaborada pelo autor.

Fig. 47: Formas de onda das correntes adquiridas pelo MPBC – Experimento 5.



Fonte: Elaborada pelo autor.

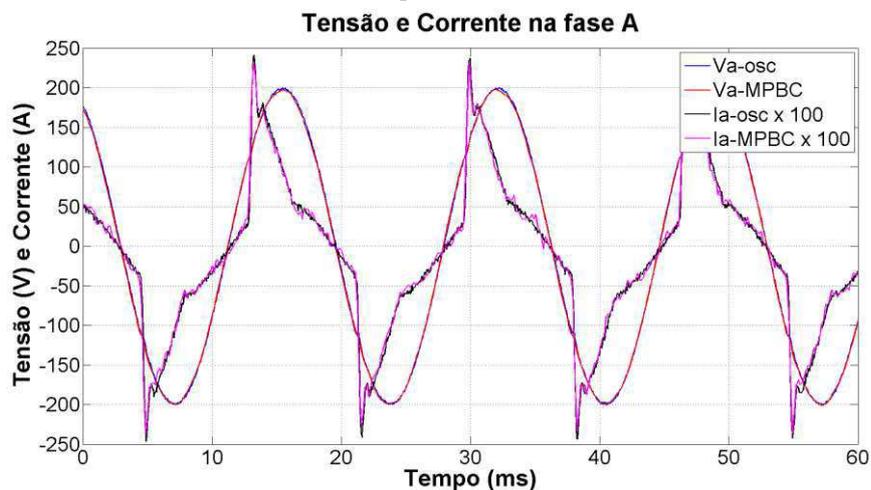
Fig. 48: Formas de onda das correntes adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 5.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os sinais de tensão e corrente para a fase A são apresentados na Fig. 49 para melhor comparação entre as formas de ondas adquiridas pelo sistema proposto e pelo osciloscópio.

Fig. 49: Formas de onda de tensão e corrente na fase A adquirida pelo MPBC e pelo osciloscópio – Experimento 5.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O coeficiente de determinação para o sinal de tensão da Fig. 44 foi de 0,9995 e para a corrente foi de 0,9900. Tais resultados demonstram uma exatidão elevada dos dados amostrados.

Na Tabela 29 são apresentados os parâmetros calculados pelo sistema proposto utilizando o método do IEEE. Já na Tabela 30 são apresentados os parâmetros calculados pelo Nexus e pelo MPBC utilizando o método do Nexus. Analisando essas tabelas constata-se que os erros para os cálculos da potência aparente e ativa seguiu a mesma tendência para os experimentos anteriores. Porém, o cálculo da potência reativa resultou em um erro relativo de 0,05% quando utilizado o mesmo método do Nexus. Um dos fatores responsáveis por esse resultado é o erro quase nulo encontrado na potência aparente, de 0,08%. Outro fator é discutido no tópico 6.4 - Discussões Gerais.

Tabela 29: Parâmetros calculados pelo MPBC no experimento 5.

MPCB			
Indicador	Combinado	Potência Fundamental	Potência não Fundamental
Aparente (VA)	S = 488,9	S ₁ = 368,91	S _N = 320,83 S _H = 2,41
Ativa (W)	P = 352,79	P ₁ = 353,73	P _H = -0,95
Não Ativa (var)	N = 338,48	Q ₁ = -104,59	-
Utilização da Linha	FP = 0,72 FD = 0,00	FP ₁ = 0,96	D _V = 2,77 D _I = 320,81 D _H = 2,21
Poulução Harmônica	-	-	THD _V = 0,75% THD _I = 86,96%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 30: Parâmetros calculados com o algoritmo do Nexus 1500 no experimento 5.

	Nexus 1500	MPBC	ϵ_i, %
Aparente (VA)	410,75	410,45	-0,08%
Ativa (W)	353,2	352,79	-0,12%
Reativa (var)	-209,68	-209,79	-0,05%
Utilização de Linha	0,859	0,860	0,06%

Fonte: Elaborada pelo autor.

6.3.6 EXPERIMENTO 6 – CARGA MISTA, TENSÃO BALANCEADA COM HARMÔNICAS

No sexto experimento, a fonte foi programada para gerar as componentes harmônicas descritas na Tabela 31, com uma tensão eficaz de 77,1 V nas três fases. Essa tensão proporciona uma amplitude da tensão fundamental de 100 V, que facilita a comparação dos dados coletados. Uma carga trifásica não linear composta de lâmpadas incandescentes e lâmpadas fluorescentes compactas foram utilizadas.

Tabela 31: Componentes harmônicas das tensões geradas pela fonte programável.

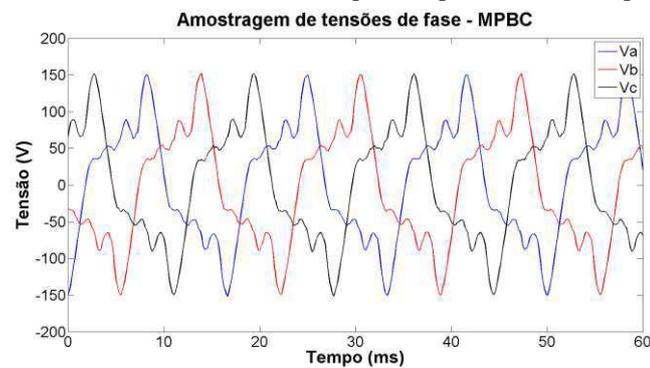
Harm.	Amplitude (%)	Fase (graus)
Fund.	100	
3	35,13	83
5	18,77	168
7	9,79	-49
9	8,11	160

Fonte: Elaborada pelo autor.

O sistema proposto foi capaz de medir as amplitudes das harmônicas de tensão e corrente na fase A, conforme pode ser visto na Tabela 32.

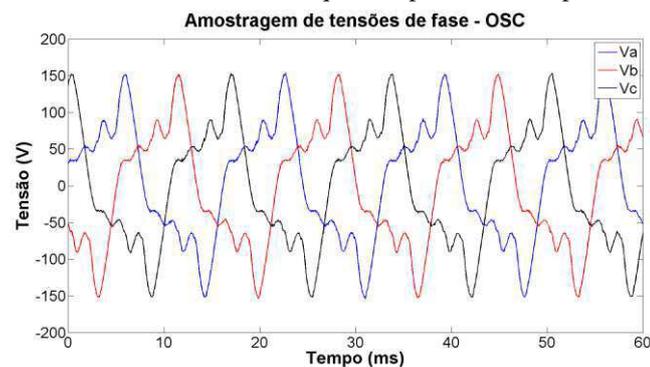
As formas de onda das tensões e correntes adquiridas pelo MPBC e pelo osciloscópio são apresentadas nas Figs. 50 – 53.

Fig. 50: Formas de onda das tensões adquiridas pelo MPBC – Experimento 6.



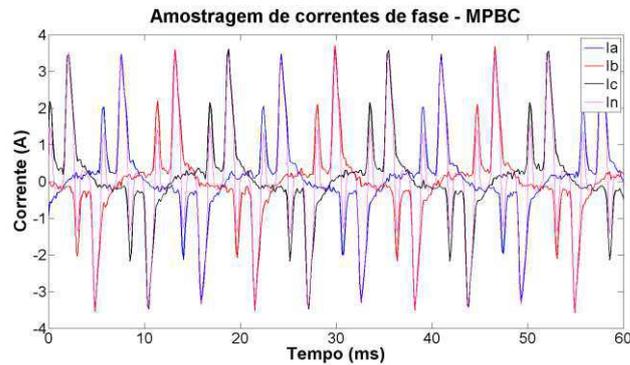
Fonte: Elaborada pelo autor.

Fig. 51: Formas de onda das tensões adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 6.



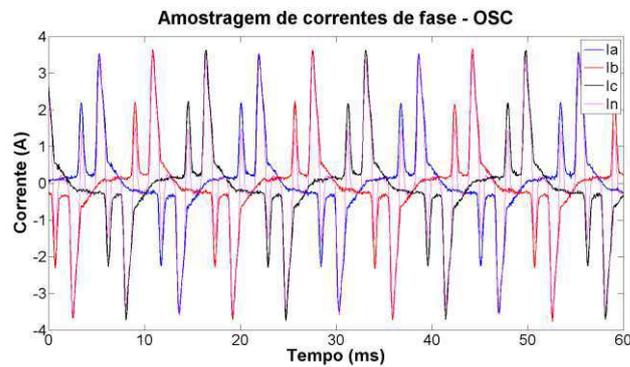
Fonte: Elaborada pelo autor.

Fig. 52: Formas de onda das correntes adquiridas pelo MPBC – Experimento 6.



Fonte: Elaborada pelo autor.

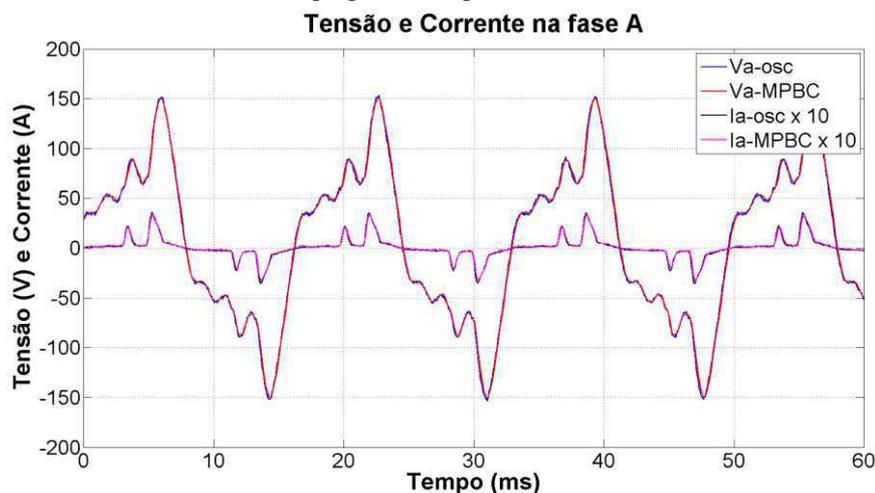
Fig. 53: Formas de onda das correntes adquiridas pelo osciloscópio – Experimento 6.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As formas de onda da tensão e corrente na fase A podem ser visualizadas na Fig. 54 juntamente com suas respectivas formas de onda adquiridas pelo osciloscópio. A análise dos sinais adquiridos demonstra que a amostragem dos dados de corrente e tensão foi feita com elevada acurácia. O coeficiente de determinação R^2 foi de 0,9991 para a tensão e de 0,9906 para a corrente, reafirmando a semelhança percebida pelo visual.

Fig. 54: Amostras de sinais da tensão e da corrente na fase A adquiridos pelo osciloscópio e pelo medidor proposto – Experimento 6.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Fazendo a análise dos dados presentes na Tabela 32, constata-se uma diferença percentual de no máximo 3,27% correspondente a 7ª harmônica da tensão.

Na Tabela 33 são apresentados os valores eficazes de tensão e corrente adquiridos utilizando-se o qualímetro proposto e o Nexus 1500. Constata-se que o qualímetro proposto apresenta erros desprezíveis se comparado com o Nexus mesmo em condições mais adversas de tensão e de carga.

Tabela 32: Amplitude das componentes harmônicas de tensão e corrente determinadas pelo MPBC no experimento 6.

Harm.	Amplitude da Tensão (%)	ε_r %	Amplitude da Corrente (%)
Fund.	100	-	100
3	35,17	0,11	42,80
5	18,73	-0,21	30,02
7	10,11	3,27	46,92
9	8,25	1,73	46,20

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 33: Valores RMS das tensões e correntes do experimento 6.

Fase	MPCB		Nexus 1500		ε_r %	
	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão	Corrente
A	77,06	1,029	77,12	1,04	-0,08%	-1,06%
B	76,94	1,038	77,16	1,04	-0,29%	-0,19%
C	77,37	1,061	77,15	1,04	0,29%	2,02%
N	0	1,562	-	1,54	-	1,43%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 34 são apresentados os parâmetros calculados pelo MPBC. Analisando seus dados é possível destacar a diferença entre o fator de potência combinado (PF) e o da fundamental (PF_1), o que evidencia a influência das harmônicas na obtenção do primeiro. Fazendo a comparação do medidor proposto com o Nexus, parâmetros apresentados na Tabela 35, em termos da potência ativa, novamente foi obtida uma diferença insignificante: 0,89%. É possível verificar que a potência reativa também obteve uma diferença desprezível (0,66%) utilizando o método do Nexus, seguindo a tendência do experimento anterior.

Tabela 34: Parâmetros Calculados pelo MPBC no experimento 6.

MPCB			
Indicador	Combinado	Potência Fundamental	Potência não Fundamental
Aparente (VA)	S = 309,85	S _I = 162,03	S _N = 264,1 S _H = 82,8
Ativa (W)	P = 185,11	P _I = 161,58	P _H = 23,54
Não Ativa (var)	N = 248,47	Q _I = 12,1	-
Utilização da Linha	PF = 0,60 FD = 0,00	FP _I = 1,00	D _V = 54,82 D _I = 244,72 D _H = 79,39
Poulução Harmônica	-	-	THD _V = 33,84% THD _I = 151,04%

Fonte: Elaborada pelo autor.

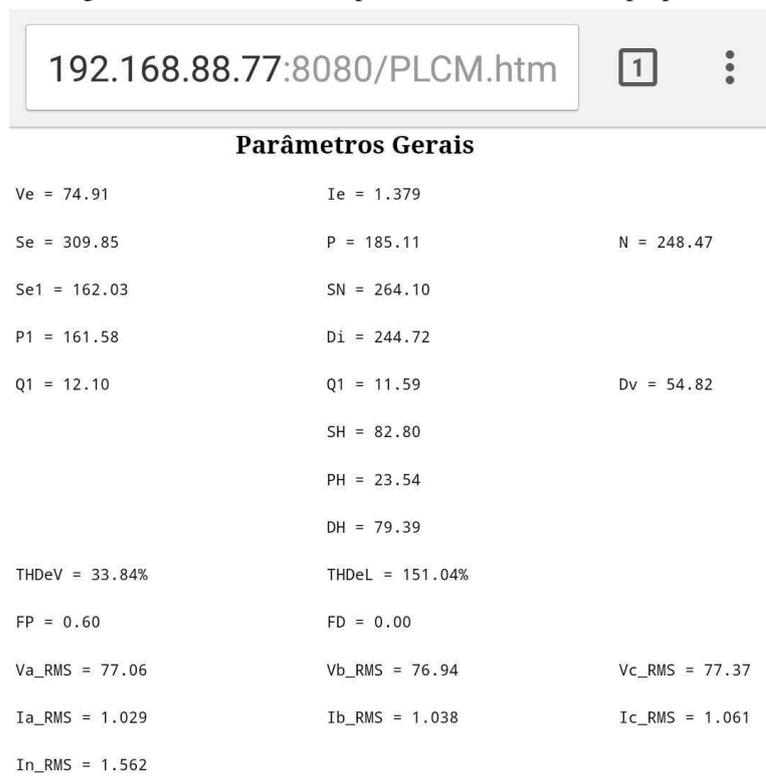
Tabela 35: Parâmetros calculados com o algoritmo do Nexus 1500 no experimento 6.

	Nexus 1500	MPBC	ϵ_r %
Aparente (VA)	240,69	241,25	0,23%
Ativa (W)	183,52	185,11	0,87%
Reativa (var)	-155,73	-154,71	0,66%
Utilização de Linha	0,762	0,767	0,70%

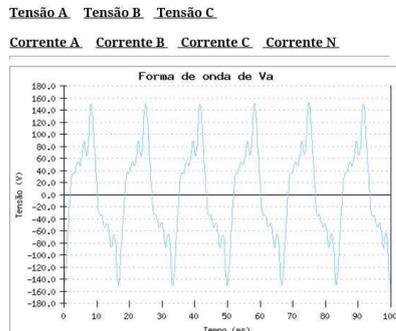
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Fig. 55 pode ser visualizada a interface do medidor proposto apresentando alguns dos parâmetros calculados e a formas de onda das tensões e correntes. A figura foi obtida da tela de um *smartphone*, o que evidencia uma expressiva vantagem do dispositivo: o acesso aos parâmetros em qualquer aparelho que possua acesso à internet e a qualquer distância do ponto monitorado.

Fig. 55: Interface acessível pela Internet do medidor proposto.



Formas de Onda



Fonte: Elaborada pelo autor.

6.4 DISCUSSÕES GERAIS

Durantes os tópicos anteriores foram discutidos e comparados os resultados apresentados pelo medidor proposto e aqueles apresentados pelo Nexus 1500. Como resultado dessas comparações pode-se constatar um erro insignificante na medição das tensões eficazes, sempre inferior a 1% e com um coeficiente de determinação sempre maior que 99%. O erro de 1% na tensão eficaz é requerido pelas normas nacionais (ANEEL, 2015) e internacionais (ANSI C84.1-2006; IEEE, 2006) para um medidor de qualidade de energia. O erro na corrente não é

referenciado nas normas, porém, o dispositivo também não obteve erros expressivos em seu cálculo.

Além dos cálculos das tensões eficazes, o único parâmetro que possui o mesmo algoritmo de cálculo entre o Nexus e o medidor proposto com o método do IEEE é a potência ativa. Os erros para a potência ativa comparadas ao Nexus também foram inferiores a 0,99%. Com relação aos demais parâmetros não se pode fazer uma comparação direta pois o método do IEEE leva em conta outros tipos de potências não ativas. Nota-se que o método do IEEE utiliza para o cálculo da potência aparente a corrente no neutro, expressões (24) e (28), e o método do Nexus não, expressões (41) e (42). Os métodos de cálculo para os demais parâmetros sendo distintos não se pode fazer uma comparação direta. Diante desse fato, foi implementado no medidor proposto o método utilizado pelo Nexus. O resultado dessa comparação foi um erro inferior a 1,66% nas potências aparentes em todos os experimentos.

É possível verificar que quando a quantidade de reativos é baixa, o erro obtido na aquisição do sinal de corrente influencia de maneira significativa no cálculo da potência reativa. Esse fato é obtido mesmo com erros inferiores a 1% no cálculo da potência aparente. Porém, quando a quantidade de reativos é mais significativa na composição da potência aparente, o erro na aquisição dos sinais de corrente se torna insignificante. Foram feitas simulações no MATLAB que corroboram com o efeito discutido acima. A simulação foi realizada gerando sinais de onda puramente senoidais para as tensões e correntes, em seguida, calculado os valores da potência ativa, reativa e aparente. Esses resultados foram comparados com os resultados obtidos de correntes e tensões com ruído gaussiano branco que resultavam em erros próximos dos obtidos nos experimentos realizados.

Pelo o que foi exposto, mesmo em condições mais adversas de carga e de alimentação, experimentos 4 e 5, o MPBC obteve resultados aceitáveis. Vale ressaltar que o medidor obteve melhores resultados nessas condições, possivelmente devido à maior magnitude da corrente (razão sinal/ruído maior) o que melhorou o desempenho dos transdutores de corrente.

Neste trabalho não serão discutidos os índices determinados pelo método do IEEE pois o objetivo do trabalho é criar um sistema de aquisição de dados de grandezas elétricas adaptável às aplicações do sistema elétrico. A criação do medidor de QEE foi apenas como estudo de caso.

No capítulo seguinte será abordada a estimativa financeira para analisar o baixo-custo do projeto.

7 ESTIMAÇÃO FINANCEIRA

Na Tabela 36 é descrito os materiais que foram utilizados na concepção do MPBC. A descrição “*Outros*” é fazendo referência aos demais componentes eletrônicos: resistores, capacitores, diodos e fios. O custo total do projeto apresentado nessa Tabela foi de aproximadamente 126 dólares, fazendo uma conversão livre para reais: 500 reais. Levando em conta que existem medidores comercializados por dezenas de milhares de reais, pode-se concluir que o baixo-custo foi alcançado com sucesso.

Tabela 36: Estimação financeira dos materiais utilizado no trabalho.

Produto	Quantidade	Preço Und. (\$)	Preço total (\$)
BeagleBone Black - rev. B	1	45,00	45,00
Conversor Analógico Digital	1	4,00	4,00
Transdutores de Corrente (ACS712 – 5A)	4	6,00	24,00
Amp-op TL084	5	2,50	12,50
Transformador	1	10,00	10,00
Outros	-	-	30,00
Total	-	-	\$ 125,50

Fonte: Elaborada pelo autor.

8 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

8.1 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto um sistema de aquisição de dados de grandezas elétricas que fosse adaptável para o monitoramento e determinação de diversos parâmetros utilizados nos sistemas elétricos. O sistema possui acesso remoto via internet por meio da geração de uma página *web* utilizando o servidor Apache2, sendo acessado de qualquer dispositivo com acesso à internet. Seu baixo custo foi alcançado utilizando componentes básicos encontrados no mercado, resultando em um valor aproximado de 500 reais.

Como estudo de caso o sistema foi programado para a medição e monitoramento de parâmetros que determinam a qualidade da energia elétrica. Para isso foram implementadas rotinas de cálculo para a determinação dos valores eficazes das tensões e correntes e análise harmônica desses sinais. Além disso, foi implementado o método do IEEE (2010) para o cálculo das potências e demais parâmetros. Como mais um exemplo da versatilidade e facilidade de implementação foi também implementada a rotina de cálculo de potências do Nexus 1500.

Devido a algumas dificuldades na aquisição dos dados não houve tempo suficiente para a implementação da medição da frequência, nesse caso, foi considerada a frequência fundamental de 60 Hz. Além disso, foi feita a análise de frequência até a 25ª ordem por conta do alto poder de processamento requerido para se calcular até a 50ª ordem.

Ao fim do trabalho, foi feita a validação do sistema proposto comparando seus resultados com os valores determinados por um qualímetro consolidado no mercado. Foram realizados diversos experimentos em várias condições de alimentação e de carga. Foi alcançado resultados com baixos erros relativos para as tensões e correntes. O valor eficaz da tensão, por exemplo, ficou abaixo de 0,29%. Os erros nos resultados encontrados nos cálculos de potência utilizando o mesmo método do Nexus foram insignificantes para as potências aparente e ativa. Foi constatado que para a potência reativa o erro foi influenciado pela quantidade de reativos na composição da potência aparente. Para solução desse problema propõe-se um aperfeiçoamento no método de cálculo ou no sistema de aquisição dos sinais.

8.2 TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho muitas áreas do conhecimento da Engenharia Elétrica, desde a eletrônica, sistemas embarcados e sistemas de potência foram envolvidas. Com isso é evidente que há muito o que se melhorar e aperfeiçoar. Primeiramente foi idealizado este projeto com a utilização de um conversor analógico digital de 12 bits com conversão simultânea, o ADS8528. Porém, houve várias dificuldades em sua operação o que fez com que ele fosse substituído temporariamente. Como sequência do trabalho será feita essa substituição.

No presente estágio da pesquisa, o seccionamento dos fios condutores é necessário para a instalação dos transdutores de corrente do MPBC. Além disso, foi constatado um ruído acima do esperado no seu sinal. Por isso, será estudado novos métodos de medição de corrente.

Outros possíveis trabalhos futuros são:

- Estudo da melhor técnica de medição de potência reativa;
- Estudo de algoritmos de estimação da frequência fundamental e sua implementação;
- Estudo de acionamentos de atuadores quando a ocorrência de alguma condição dos parâmetros monitorados ou por acesso remoto via página *web*;
- Estudo da otimização dos cálculos;
- Estudo da melhor técnica de análise de frequência;
- Implementação da gravação de eventos de qualidade de energia (afundamentos e elevações de tensão, transitórios, entre outros);
- Melhoria no design gráfico da página *web*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIDULLAH, N.A.; ABDULLAH, A.R.; SHAMSUDIN, N.H.; AHMAD, N.H.T.H.; JOPRI, M.H., **Real-time power quality signals monitoring system**, 2013 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD), pp.433-438, 16-17 de dezembro de 2013 - DOI: 10.1109/SCOReD.2013.7002626.

ALLEGRO, **Datasheet ACS712**, 2007.

ALMEIDA, A. M. A. **Instrumentação virtual para estudos de qualidade de Energia elétrica e ensaios de materiais magnéticos**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, agosto de 2013.

ALVES, D. K. **Estimação de Potência em Tempo Real Utilizando a Transformada Wavelet**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal/RN, junho de 2015.

ANANTH, I. **A power quality monitoring system: a case study in DSP-based solutions for electric power industry**, Power Engineering Review, IEEE. pp. 47-50, vol. 19, julho de 1999.

ANEEL, Resolução Normativa Nº 482, **Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências**, 17 de abril de 2012.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica: **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Módulo 8, Rev.7 (2015) - Qualidade da Energia Elétrica

ANSI C84.1-2006 - **American National Standard for Electric Power Systems and Equipment — Voltage Ratings (60 Hertz)**.

ARAÚJO, A. E. A; NEVES, W. L. A., **Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia**. Editora UFMG, 2005.

ARCANJO, M. A. C. **Controle Discreto de Sinais Trifásicos Distorcidos e Desbalanceados Baseado na Transformada de Fourier de Vetores Espaciais**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife/PE, abril de 2013.

BEAGLEBOARD.ORG, **BeagleBone Black**, < <http://beagleboard.org/black>>, acessado 10/10/2014.

BEAGLEBOARD.ORG, **PRU-ICSS Resources**. Disponível em: <<http://beagleboard.org/pru>>. Acessado em: 28 de janeiro de 2016.

BEAGLEBOARD.ORG **BeagleBone: open-hardware expandable computer**, disponível em: <<http://beagleboard.org/support/bone101>>, acessado em 05 de fevereiro 2016.

BERRISFORD, A.J., **A Smarter Meter: IEEE-1459 power definitions in an off-the-shelf Smart Meter**, 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), pp.830-835, 11-14 de maio de 2015 - DOI: 10.1109/I2MTC.2015.7151376.

BINGHAM, R. P. **Measurement Instruments for Power Quality Monitoring**, Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. IEEE, pp. 1-3, Chicago, EUA, Abril de 2008.

BOYLESTAD, R. L. **Introdução à análise de circuitos**. 10ª edição: Pearson Education do Brasil, 2004.

BUSTOS,C.; WATTS,D.; REN, H.,**MicroGrid Operation and Design Optimization With Synthetic Wins and Solar Resources**, IEEE Latin America Transactions, vol.10, no.2, pp.1550,1562, março de 2012.

CARVALHO, J. R.; DAMASCENO, A. C. H.; DUQUE, C. A. **Uma Aproximação para Medição de Amplitude e Rastreamento de Frequência através da DFT**. VII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, 2007, Santos-SP. Anais VII CBQEE, 2007.

CESÁRIO, F. R. **Comparação de Métodos de Detecção de Distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, março de 2011.

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.

COLNAGO, G. P. **Desenvolvimento e implementação de um sistema de monitoramento em tempo real da tensão da rede com acesso remoto**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2009.

COLNAGO, G. P.; VIEIRA, J. L. F.; SOUSA, G. C. D. e MACEDO, J. R. **Power Quality Real-time Monitoring System for the New Brazilian Standard**. Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) IEEE. pp. 35 - 42, Kuressaare, Estônia, junho de 2010.

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.

COOPER, J. **Introduction to the BeagleBone Black Device Tree**. Disponível em: <<https://learn.adafruit.com/downloads/pdf/introduction-to-the-beaglebone-black-device-tree.pdf>>. Acessado em: 28 de janeiro de 2016.

COLEY, G. **BeagleBone Black System Reference Manual**. Beagleboard.org, Revision C.1, 22 de maio de 2014.

CORBET, J. **Device tree overlays**, 22 de outubro 2014, disponível em: < <https://lwn.net/Articles/616859/>>, acessado em 05 de fevereiro de 2016.

DEPURU, S.S.S.R.; LINGFENG WANG, V.; DEVABHAKTUNI e GUDI, N., **Smart meters for power grid — Challenges, issues, advantages and status**, IEEE Power Systems Conference and Exposition, pp.1-7, março 2011.

DECKMANN, S. M. e POMILIO, J. A., **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**, UNICAMP, julho de 2010.

DRANETZ BMI, **PowerXplorerPX5**, <www.dranetz-bmi.com>, acessado em 10/10/2014.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S. e BEATY, H. W., **Electrical Power Systems Quality**, Segunda Edição, McGraw-Hill, 2004.

ECIL Energia, **Medição Inteligente**, acessível em: <<http://www.ecilenergia.com.br/download/Medidores.pdf>>, acessado em 02 de fevereiro de 2016.

ELEMENT14 **Expansion Board for BeagleBone family with 7 inch LCD**, disponível em: <<https://www.element14.com/community/docs/DOC-55844/l/expansion-board-for-beaglebone-family-with-7-inch-lcd>>, acessado em 05 de fevereiro de 2016.

ELECTRO INDUSTRIES, **Nexus 1500**, <<http://www.electroind.com/nexus1500.html>>, acessado em 10/10/2014.

ELECTRO INDUSTRIES, **Nexus® 1500+ High Performance Power Meter Installation and Operation Manual**, Version 1.02, Westbury, NY 11590, 17 de fevereiro de 2016.

ELO Sistemas Eletrônicos S.A. **Manual do usuário - ELO2101A**, janeiro de 2009.

ELO Sistemas Eletrônicos S.A. **Manual do usuário - ELO2106LD**, abril de 2008.

FARNELL, <<http://www.farnell.com/>>, acessado em 15/08/2014.

FAZIO JUNIOR, A., **Metodologias de Medição de Energia Elétrica Reativa (VARh) e Erros de Medição em Equipamentos Eletrônicos de (VARh)**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS/UNESP, Ilha Solteira - SP, dezembro de 2011.

FRACK, P. F.; MARTINEZ, M.; MOLINA, M. G.; MERCADO, P. E., **Emulation of Synchronous Generator for Frequency Control of Smart Microgrids**, IEEE Latin America Transactions, vol.11, no.1, pp.486,491, fevereiro de 2013.

FRANCO, E. **Qualidade de Energia – Causas, Efeito e Soluções**. Engecom tecnologia em automação e controle LTDA. Disponível em: <<http://www.macoem.com.br/wp-content/uploads/2014/02/Qualidade-de-Energia---Causas-Efeitos-e-Soluções..pdf>>, acessado em 15/10/2014.

FRIEDMAN, V.; **A zero crossing algorithm for the estimation of the estimation of the frequency of a single sinusoid in white noise**, IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 42, 1994.

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.

GAO, C.; HAN, R.; LI, W.; LIU, M., **A novel power system harmonic analyzer based on ARM and FPGA**, International Conference on Electrical and Control Engineering 2011 (ICECE 2011), pp.1920-1923, 16-18 de setembro de 2011 - DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6057224.

GIRGIS, A.A.; HAM, F. M., **A Quantitative Study of Pitfalls in the FFT**, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol.AES-16, no.4, pp.434-439, julho de 1980 - DOI: 10.1109/TAES.1980.308971

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

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. e 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.

HUGHES, M. B. **Electric Power Measurements – A Utility’s Perspective**, in Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 25 de julho de 2002, vol. 3, pp. 1680-1681.

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

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

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, **IEEE The world's largest professional association for the advancement of technology**, <<https://www.ieee.org/index.html>>, acessado em 28/01/2016.

INSTRUMART, <<https://www.instrumart.com/categories/5980/power-quality-analyzers>>, acessado em 31/01/2016.

JONES, W.H. e STANSBURY, M.C. **Power quality monitoring enhances preventive maintenance program: detecting a substation transformer tap changer problem**, Proceedings of the Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1998, pp. 82-87.

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, E. J. **Reflexões sobre as teorias de potência elétrica em regime não senoidal**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

LEAO, R. P. S.; ANTUNES, F. L. M.; LOURENCO, T. G. M.; ANDRADE, K. R., **A Comprehensive Overview on Wind Power Integration to the Power Grid**, IEEE Latin America Transactions, vol.7, no.6, pp.620,629, dezembro de 2009.

LAKSHMIKANTH, A.; MORCOS, M.M., **A power quality monitoring system: a case study in DSP-based solutions for power electronics**, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.50, no.3, pp.724-731, junho de 2001 - DOI: 10.1109/19.930446.

LINEWEBER, D. e MCNULTY, S., **The Cost of Power Disturbances to Industrial & Digital Economy Companies**. EPRI's Consortium for Electric Infrastructure for a Digital Society (CEIDS). Junho de 2001.

MAIA, R. M., **Caracterização das Variações de Tensão de Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, junho de 2011.

MATHWORKS, **Coefficient of Determination (R-Squared)** <<http://www.mathworks.com/help/stats/coefficient-of-determination-r-squared.html?searchHighlight=r%20squared>>, acessado em: 25 de julho de 2016.

MICROCHIP, Datasheet **MCP3008**, 2008.

MOLLOY, D., **Exploring Beaglebone: Tools and Techniques for Building with Embedded Linux**. Wiley, 2015. ISBN 978-1-118-93512-5.

MORSI, W. G.; EL-HAWARY, M. E., **A New Perspective for the IEEE Standard 1459-2000 via Stationary Wavelet Transform in the Presence of Nonstationary Power Quality Disturbance**, IEEE Transactions of Power Delivery, vol. 23, no. 4, pp. 2356-2365, outubro 2008.

MORTENSEN, A.N.; JOHNSON, G.L., **A power system digital harmonic analyzer**, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.37, no.4, pp.537-540, dezembro de 1988 - DOI: 10.1109/19.9808.

MOUSER, <<http://br.mouser.com/>>, acessado em 15/08/2014.

MUSIC, M.; BOSOVIC, A.; HASANSPAHIC, N.; AVDAKOVIC, S.; BECIROVIC, E., **Integrated power quality monitoring system and the benefits of integrating smart meters**, 8th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE), pp.86-91, 5-7 de junho de 2013 - DOI: 10.1109/CPE.2013.6601134.

NAM, K.; CHOI, S.; RYOO, H.; JEONG, S.; LEE, J.-D.; KIM, D., **A power quality monitoring system for the efficient competitive electricity market in Korea**, International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004, vol.1, pp.580-585 Vol.1, 21-24 de novembro de 2004 - DOI: 10.1109/ICPST.2004.1460061.

NILSSON, J. W. e RIEDEL, S. A., **Circuitos Elétricos**, 8ª edição, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. ISBN 978-85-7605-159-6.

ORTS-GRAU, S.; MUNOZ-GALEANO, N.; ALFONSO-GIL, J. C.; GIMENO-SALES, F. J. e SEGUI-CHILET, S., **Discussion on Useless Active and Reactive Powers Contained in the IEEE Standard 1459**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 2, pp. 640-649, 2011.

PHADKE, A.; THORP, J. e ADAMIAC, M., **A new measurement technique for tracking voltage phasors, local systems frequency, and rate of change of frequency**, IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-102, no. 5, pp. 1025-1038, maio de 1983.

RODRIGUES, J. E. **Interferência de Harmônicas em Equipamentos de Medição de Energia Elétrica**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 138. 2009.

SEGUI-CHILET, S.; GIMENO-SALES, F. J.; ORTS-GRAU, S.; GARCERÁ, G.; FIGUERES, E. ALCAÑIZ, M. e MASOT, R., **Approach to Unbalance Power Active Compensation Under Linear Load Unbalances and**

Fundamental Voltage Asymmetries. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 29, pp. 526-539, setembro 2007.

SEL, **Fault indicators and sensors catalog**, Schweitzer Engineering Laboratories, 2014. Acessível em: <https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Product%20Catalogs/FIS_Catalog_2014.pdf>, acessado em dia 02 de fevereiro de 2016.

SHAHID, E. B.; AHMED, Z.; FAROQI, A. e NAVID-UR-REHMAN, R.M., **Implementation of smart system based on smart grid Smart Meter and smart appliances**, 2nd Iranian Conference on Smart Grids, Tehran, 2012.

SINUS – **Quality on electric power.** <<http://www.sinus-pq.dei.uminho.pt/>>, acessado em 15/10/2014.

SOUZA, W. A.; MARAFÃO, F. P.; LIBERADO, E. V.; DINIZ, I. S. e SERNI, P. J. A., **Power Quality, Smart Meters and Additional Information from Different Power Terms**, IEEE Latin America Transactions, vol. 13, no. 1, janeiro de 2015 - DOI: 10.1109/TLA.2015.7040643.

SUSLOV, K.V.; SOLONINA, N.N.; SMIRNOV, A.S., **Distributed power quality monitoring**, 2014 IEEE 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp.517-520, 25-28 de maio de 2014 - DOI: 10.1109/ICHQP.2014.6842882.

TAN, H. LEE, C. e MOK, V. **Automatic power meter reading system using GSM network**, International Power Engineering Conference, pp. 465-469, dezembro 2007.

TEXAS INSTRUMENTS **AM335x ARM® Cortex™-A8 Microprocessors - Technical Reference Manual**, agosto de 2013.

TEXAS INSTRUMENTS. **PRU Linux Application Loader API Guide, 2015.** Disponível em: <http://processors.wiki.ti.com/index.php/PRU_Linux_Application_Loader_API_Guide>. Acessado em: 22 de maio 2016.

TOMIC, J.J.; KUSLJEVIC, M.D.; VUJICIC, V.V., **A New Power System Digital Harmonic Analyzer**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.22, no.2, pp.772-780, abril de 2007 - DOI: 10.1109/TPWRD.2007.893372.

VAINIO, O.; OVASKA, S.J.; **Noise reduction in zero crossing detection by predictive digital filtering**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 42, no.1, pp.58-62, fevereiro 1995.

WANG, M. e SUN, Y., **A practical, precise method for frequency tracking and phasor estimation**, IEEE Trans. Power Del., vol. 19, no.4, pp. 1547–1552, outubro de 2004.

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. EPE-PEMC 2006. pp.420-424, 30 de agosto de 2006 - DOI: 10.1109/EPEPEMC.2006.4778437.

WIKIPEDIA, **Comparison of single-board computers**, acessível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_single-board_computers>, novembro de 2014.

WILL, N.C.; SANTOLIN, L.; CARDOSO, R., **Cross-platform virtual power analyzer based on IEEE standard 1459–2010**, Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), pp.312-319, 11-15 de setembro de 2011 - DOI: 10.1109/COBEP.2011.6085240.

YANG, J.-Z. e LIU, C.-W., **A precise calculation of power system frequency and phasor**, IEEE Trans. Power Del., vol. 15, no. 2, pp. 494–499, abril de 2000.

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.

YINGKAYUN, K.; PREMURDEEPREECHACHARN, S., **A power quality monitoring system for real-time detection of power fluctuations**, 40th North American in Power Symposium, 2008. NAPS '08, pp.1-5, 28-30 de setembro de 2008 - DOI: 10.1109/NAPS.2008.5307405.

YINGKAYUN, K.; PREMURDEEPREECHACHARN, S.; ORANPIROJ, K., **A power quality monitoring system for real-time fault detection**, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2009. ISIE 2009, pp.1846-1851, 5-8 de julho de 2009 - DOI: 10.1109/ISIE.2009.5213582.

XUE, H. e YANG, R., **A novel algorithm for harmonic measurement in power system**, Proc. Int. Conf. PowerCon, vol. 1, pp. 438–442, outubro de 2002.

ZHANG, M. e LI, K. **A Power Quality Monitoring System over the Internet**, The 1st International Conference on Information Science and Engineering (ICISE2009), pp.1577-1580, 26-28 de dezembro de 2009 - DOI: 10.1109/ICISE.2009.136.