



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”

Faculdade de Engenharia - Campus de Ilha Solteira
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica
Laboratório de Eletrônica de potência - LEP

“Metodologias de Medição de Energia Elétrica Reativa
(VArh) e Erros de Medição em Equipamentos Eletrônicos
de (VArh)”

Alírio Fazio Junior

Orientador:

Prof. Dr. Carlos Alberto Canesin

Co-Orientador:

Prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS/UNESP – como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de conhecimento: Automação.

Ilha Solteira (SP)

Dezembro de 2011.

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

F287m

Fazio Junior, Alírio.

Metodologias de medição de energia elétrica reativa (varh) e erros de medição em equipamentos eletrônicos de (varh) / Alírio Fazio Junior.

Ilha Solteira: [s.n.], 2011

94 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2011

Orientador: Carlos Alberto Canesin

Co-orientador: Guilherme de Azevedo e Melo

Inclui bibliografia

1. Teorias de potência elétrica. 2. Potencia reativa (Engenharia elétrica).
3. Erros de medição.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Metodologias de Medição de Energia Elétrica Reativa (VARh) e Erros de Medição em Equipamentos Eletrônicos de (VARh)

AUTOR: ALIRIO FAZIO JUNIOR

ORIENTADOR: Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CANESIN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CANESIN
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JÚLIO BORGES DE SOUZA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFÃO
Coordenadoria Executiva / Unidade de Sorocaba

Data da realização: 16 de dezembro de 2011.

À Deus e a minha família, em especial aos meus
pais que sempre acreditaram em minha
capacidade.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Canesin pela orientação, mas principalmente pela dedicação, confiança e por acreditar em minha capacidade durante estes dois anos de trabalho.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo, pelos grandes ensinamentos a mim transmitidos, e pelos ótimos conselhos dados durante o decorrer da pesquisa.

Agradeço aos meus pais Alírio Fazio e Maria de Lourdes Augusto Fazio, pela força e incentivo dados nos momentos difíceis e pelo tempo que abdicaram de minha companhia para que este trabalho pudesse ser concluído.

Agradeço também aos meus irmãos Régis Alexandre Fazio e Vanessa Regina Fazio por sempre me ouvir, mesmo não entendendo nada do assunto me incentivava.

Aos meus colegas e grandes amigos do laboratório de Eletrônica de Potência (LEP) que me ajudaram no desenvolvimento experimental do trabalho, e principalmente pelas amizades construídas durante este período.

Aos técnicos da universidade que me auxiliaram também na parte experimental deste trabalho sendo sempre muito prestativos.

A todos os funcionários e professores da pós-graduação que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

A Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira por me acolher

Agradecimento especial a agência de fomento CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo apoio financeiro.

RESUMO

O referente trabalho de mestrado tem por finalidade avaliar as principais metodologias para o cálculo da energia elétrica, focado na Energia reativa, o qual, até o presente momento, não há um consenso geral entre os pesquisadores, referente ao melhor método para a determinação deste tipo de energia elétrica, considerando que as tensões e correntes são não-senoidais e desequilibradas. Neste contexto, varias abordagens de cálculo de potências elétricas presentes na literatura serão apresentadas, com seus respectivos métodos de cálculo e quais fatores cada uma leva em consideração, como também serão abordadas as características e o contexto em que foram desenvolvidas.

As teorias serão posteriormente confrontadas entre si através de simulações por meio de alguns perfis de tensão e corrente devidamente selecionados a fim de avaliar os valores calculados pelas mesmas. Posteriormente, as teorias serão comparadas com medidores comerciais eletrônicos de energia, além de um preciso analisador de energia, o qual considera em seu cálculo, harmônicos e desequilíbrios nas tensões e correntes. Esta proposta experimental visa avaliar o erro dos cálculos referente ao padrão IEEE std. 1459, levando em consideração cada cenário de tensão e corrente (harmônicos e/ou desequilíbrios) imposto, tendo assim uma boa forma de comparação.

O esforço deste trabalho visa evidenciar um comparativo entre as teorias, levando em consideração os valores medidos por medidores eletrônicos presentes na atualidade, os quais se acreditam não levar em consideração tensões não senoidais e desequilibradas. Portanto, tais métodos de calculo, considerando o cenário de ensaio proposto pelo trabalho, poderão futuramente estar presentes nos medidores eletrônicos para o correto cálculo da Energia elétrica reativa, frente ao cenário e condições atuais e futuras do Sistema de Energia elétrica.

Palavras-Chave: Teorias de Energia elétrica. Potência reativa. Cargas não-lineares. Circuitos desequilibrados. Circuitos trifásicos a quatro fios. Erros de medição de energia reativa.

ABSTRACT

The related work aims to assess the main methodologies for the calculation of electric energy, focused on reactive power, which, until now, there is a general consensus among researchers regarding the best method for the determination of this type power, considering that the voltages and currents are non-sinusoidal and unbalanced. In this context, various approaches for calculating electric power present in the literature will be presented with their respective method of calculation and which factors each takes into account, as well as will discuss the characteristics and the context in which they were developed.

The theories will be confronted then with each other through simulations using some current and voltage profiles selected in order to properly evaluate the values calculated for the same. Later, the theories will be compared with commercial electronic energy meters, and a precise energy analyzer, which includes in its calculation, harmonics and imbalances in the voltages and currents. This proposal aims to assess the experimental error of the estimates for the IEEE Std. 1459, taking into account each scenario voltage and current (harmonics and / or imbalances) tax, and thus a good way of comparison.

This work effort aims to show a comparative between the theories, taking into account the values measured by electronic meters present today, which are believed not to take into account non-sinusoidal and unbalanced voltages. Therefore, such methods of calculation, considering the scenario proposed by the test work, may be present in future electronic meters for the correct calculation of Reactive Electrical Power, against the backdrop and current conditions and future of Electric Power System.

Keywords: Power theories. Reactive power. Non-linear loads. Unbalanced circuits. Three-phase four-wire circuits. Measurement errors for reactive energy.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1- WATTÍMETRO POLIFÁSICO DA WESTINGHOUSE (1899-1903).....	17
FIGURA 1.2 - TENSÃO, CORRENTE E POTÊNCIAS PARA O CASO DE 5°.....	19
FIGURA 1.3 - TENSÃO, CORRENTE E POTÊNCIAS PARA O CASO DE 30°.....	19
FIGURA 1.4 - TENSÃO, CORRENTE E POTÊNCIAS PARA O CASO DE 60°.....	20
FIGURA 1.5 - TRIANGULO DE POTÊNCIAS.....	20
FIGURA 1.6 - EXEMPLO DE COMPORTAMENTO LINEAR DA CARGA.....	21
FIGURA 1.7 - EXEMPLO DE COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR DA CARGA.....	22
FIGURA 4.1 – PERFIL A1 CARGA INDUTIVA TRIFÁSICA BALANCEADA.....	44
FIGURA 4.2 – PERFIL A2 COM CARGA INDUTIVA TRIFÁSICA DESBALANCEADA.....	45
FIGURA 4.3 – PERFIL A3.1 COM CARGA NÃO-LINEAR TRIFÁSICA BALANCEADA (THD _i 15,66%).....	47
FIGURA 4.4 – PERFIL A3.2 COM CARGA NÃO-LINEAR TRIFÁSICA BALANCEADA (THD 47%).....	48
FIGURA 4.5 – PERFIL B1 CARGA INDUTIVA TRIFÁSICA BALANCEADA.....	50
FIGURA 4.6 – PERFIL B2 COM CARGA INDUTIVA TRIFÁSICA DESBALANCEADA.....	51
FIGURA 4.7 – PERFIL B3.1 COM CARGA NÃO LINEAR TRIFÁSICA BALANCEADA (THD 15,6%).....	52
FIGURA 4.8 – PERFIL B3.2 COM CARGA NÃO LINEAR TRIFÁSICA BALANCEADA (THD 47%).....	54
FIGURA 4.9 – PERFIL C1 COM CARGA LINEAR TRIFÁSICA BALANCEADA.....	55
FIGURA 4.10 – PERFIL C2 COM CARGA LINEAR TRIFÁSICA DESBALANCEADA.....	57
FIGURA 4.11 – PERFIL D1 COM CARGA LINEAR TRIFÁSICA BALANCEADA.....	58
FIGURA 4.12 – PERFIL D2 COM CARGA LINEAR TRIFÁSICA DESBALANCEADA.....	59
FIGURA 5.1 – DIAGRAMA GERAL DE BLOCOS DO EXPERIMENTO PROPOSTO PARA ENSAIOS DOS MEDIDORES ELETRÔNICOS DE ENERGIA ELÉTRICA.....	62
FIGURA 5.2 – FOTOGRAFIA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO PARA MEDIDORES ELETRÔNICOS DE ENERGIA ELÉTRICA.....	63
FIGURA 5.3: (A) PLACA DE GERAÇÃO DE SINAIS COM QUATRO CANAIS CONTROLADA ATRAVÉS DE CONEXÃO PCI INTERNAMENTE AO PC E (B) APRESENTA O AMPLIFICADOR DE TENSÃO.....	64
FIGURA 5.4: FONTE TRIFÁSICA 6000L E HGA (CALIFORNIA INSTRUMENTS).....	65
FIGURA 5.5 – CIRCUITOS DE SINCRONISMO E COMUNICAÇÃO IMPLEMENTADOS, (A) FPGA XILINX, (B) SINCRONISMO VIA DETECÇÃO DE PASSAGEM POR ZERO.....	66
FIGURA 5.6: ANALISADOR DE ENERGIA WT3000.....	67
FIGURA 5.7: MEDIDORES SOB ENSAIO.....	67
FIGURA 5.8 – APLICATIVO DE GERENCIAMENTO.....	69
FIGURA 5.9 – MANIPULAÇÃO DOS PERFIS DE TENSÃO E CORRENTE PARA ENSAIOS.....	70
FIGURA 5.10 – TELA PARA CRIAÇÃO/VISUALIZAÇÃO DE PERFIL DE TENSÃO.....	70
FIGURA 5.11 – TELA PARA CRIAÇÃO/VISUALIZAÇÃO DE PERFIL DE CORRENTE.....	71
FIGURA 5.12 – VISUALIZAÇÃO DE PERFIS DE TENSÃO E CORRENTE- PRÉ-ENSAIO.....	71

FIGURA 5.13 – CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA.....	72
FIGURA 5.14 – LEITURA DE FORMAS DE ONDA DE TENSÃO E CORRENTES E DE ENERGIA DAS FASES A, B E C PROVIDAS PELO MEDIDOR PADRÃO.....	73
FIGURA 6.1 – PERFIL 1 THDV(3,6%) E THDI(43,5%)	75
FIGURA 6.2 – PERFIL 2 THDV(4%) E THDI(48%)	76
FIGURA 6.3 – PERFIL 3 THDV(4%) E THDI(20%)	77
FIGURA 6.4 – PERFIL 4 THDV(4%) E THDI(20%)	79
FIGURA 6.5 – PERFIL 5 THDV(4,6%) E THDI(48%)	80
FIGURA 6.6 – PERFIL 6 THDV(3,4%) E THDI(4,7%)	81
FIGURA 6.7 – PERFIL 7 THDV(4,5%) E THDI(49,4%)	82
FIGURA 6.8 – PERFIL 8 THDV(5,5%) E THDI(20,5%)	84
FIGURA 6.9 – PERFIL 9 THDV(6,7%) E THDI(43%)	85
FIGURA 6.10 – TABELA DE CORES PARA IDENTIFICAÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO	87
FIGURA 9.1 – ESQUEMA UTILIZADO PARA REALIZAR AS SIMULAÇÕES DAS CARGAS.	93
FIGURA 9.2 - ESQUEMA UTILIZADO PARA PROCESSAR OS CÁLCULOS EXPERIMENTAIS.	94

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - COMPONENTES CONSIDERADAS PELA IEEE STD. 1459.....	36
TABELA 4.1 – TENSÕES E CORRENTES DO PERFIL A1 COM CARGA INDUTIVA BALANCEADA.	44
TABELA 4.2 – IMPEDANCIA A1 CARGA INDUTIVA TRIFÁSICA BALANCEADA.	44
TABELA 4.3 – POTÊNCIAS DO PERFIL A1.....	45
TABELA 4.4 – TENSÕES E CORRENTES DO PERFIL A2.	46
TABELA 4.5 – IMPEDANCIA A2 COM CARGA INDUTIVA TRIFÁSICA DESBALANCEADA.....	46
TABELA 4.6 – POTÊNCIAS DO PERFIL A2.....	46
TABELA 4.7 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL A3.1	47
TABELA 4.8 – PERFIL A3.1 COM CARGA NÃO LINEAR TRIFÁSICA BALANCEADA (THD 15,66%)	47
TABELA 4.9 – POTÊNCIAS DO PERFIL A3.1.....	48
TABELA 4.10 – TENSÕES E CORRENTES DO PERFIL A3.2.....	49
TABELA 4.11 – PERFIL A3.2 COM CARGA NÃO LINEAR TRIFÁSICA BALANCEADA (THD 44,65%)	49
TABELA 4.12 – POTÊNCIAS DO PERFIL A3.2.....	49
TABELA 4.13 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL B1	50
TABELA 4.14 – PERFIL B1 CARGA INDUTIVA TRIFÁSICA BALANCEADA.....	50
TABELA 4.15 – POTÊNCIAS DO PERFIL B1.....	50
TABELA 4.16 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL B2	51
TABELA 4.17 – PERFIL B2 CARGA INDUTIVA TRIFÁSICA DESBALANCEADA	52
TABELA 4.18 – POTÊNCIAS DO PERFIL B2.....	52
TABELA 4.19 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL B3.1	53
TABELA 4.20 – PERFIL B3.1 CARGA NÃO LINEAR TRIFÁSICA BALANCEADA (THD 15,6%).....	53
TABELA 4.21 – POTÊNCIAS DO PERFIL B3.1	53
TABELA 4.22 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL B3.2	54
TABELA 4.23 – PERFIL B3.2 CARGA NÃO LINEAR TRIFÁSICA BALANCEADA (THD 47%).....	54
TABELA 4.24 – POTÊNCIAS DO PERFIL B3.2.....	55
TABELA 4.25 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL C1	56
TABELA 4.26 – PERFIL C1 COM CARGA LINEAR TRIFÁSICA BALANCEADA.....	56
TABELA 4.27 – POTÊNCIAS DO PERFIL C1.....	56
TABELA 4.28 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL C2	57
TABELA 4.29 – PERFIL C2 COM CARGA LINEAR TRIFÁSICA DESBALANCEADA.....	57
TABELA 4.30 – POTÊNCIAS DO PERFIL C2.....	57
TABELA 4.31 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL D1.....	58
TABELA 4.32 – PERFIL D1 COM CARGA LINEAR TRIFÁSICA BALANCEADA.....	59
TABELA 4.33 – POTÊNCIAS DO PERFIL D1.....	59
TABELA 4.34 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL D2.....	60

TABELA 4.35 – PERFIL D2 COM CARGA LINEAR TRIFÁSICA DESBALANCEADA	60
TABELA 4.36 – POTÊNCIAS DO PERFIL D2.....	60
TABELA 5.1: PRECISÃO DO ANALISADOR DE POTÊNCIA WT3000	66
TABELA 6.1 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL 1	76
TABELA 6.2 – ENERGIAS REATIVAS MEDIDAS NO PERFIL 1	76
TABELA 6.3 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL 2	77
TABELA 6.4 – ENERGIAS REATIVAS MEDIDAS NO PERFIL 2	77
TABELA 6.5 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL 3	78
TABELA 6.6 – ENERGIAS REATIVAS MEDIDAS NO PERFIL 3	78
TABELA 6.7 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL 4	79
TABELA 6.8 – ENERGIAS REATIVAS MEDIDAS NO PERFIL 4	79
TABELA 6.9 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL 5	80
TABELA 6.10 – ENERGIAS REATIVAS MEDIDAS NO PERFIL 5	81
TABELA 6.11 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL 6	82
TABELA 6.12– ENERGIAS REATIVAS MEDIDAS NO PERFIL 6	82
TABELA 6.13 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL 7	83
TABELA 6.14– ENERGIAS REATIVAS MEDIDAS NO PERFIL 7	83
TABELA 6.15 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL 8	84
TABELA 6.16– ENERGIAS REATIVAS MEDIDAS NO PERFIL 8	84
TABELA 6.17 – CARACTERÍSTICAS DO PERFIL 9	85
TABELA 6.18– ENERGIAS REATIVAS MEDIDAS NO PERFIL 9	86

SIMBOLOGIA

Símbolo	Significado
v	Tensão instantânea
i	Corrente instantânea
pt	potência total instantânea
pa	potência ativa instantânea
pq	potência reativa instantânea
V	Tensão eficaz
P	potência ativa
Q	potência reativa
S	potência aparente
θ	Ângulo de defasagem entre tensão e corrente
D	potência de distorção
v_0	Tensão instantânea na coordenada 0
v_α	Tensão instantânea na coordenada α
v_β	Tensão instantânea na coordenada β
i_0	Corrente instantânea na coordenada 0
i_α	Corrente instantânea na coordenada α
i_β	Corrente instantânea na coordenada β
$p_{3\phi}$	potência trifásica instantânea
q	potência imaginária instantânea
\mathbf{v}	Vetor de tensão instantânea
\mathbf{i}	Vetor de corrente instantânea
$\ \mathbf{v}\ $	Tensão eficaz equivalente
$\ \mathbf{i}\ $	Corrente eficaz equivalente
Y_h	Admitância equivalente
P_h	potência ativa eficaz de componente harmônica
Q_h	potência reativa eficaz de componente harmônica
\mathbf{i}_a	Corrente ativa
\mathbf{i}_r	Corrente reativa
\mathbf{i}_s	Corrente de variação de condutância
\mathbf{i}_h	Corrente de não linearidades da carga
\mathbf{i}_u	Corrente assimétrica
A_h	Admitância de desequilíbrio
\mathbf{v}_*	Vetor de tensão instantânea multidimensional
\mathbf{i}	Vetor de corrente instantânea multidimensional
\mathbf{v}_Σ	Vetor de tensão coletivo instantâneo
\mathbf{i}_Σ	Vetor de corrente coletivo instantâneo
p_Σ	potência coletiva coletivo instantânea
V_Σ	Vetor de tensão eficaz coletivo
I_Σ	Vetor de corrente eficaz coletivo
P_Σ	potência ativa coletiva
S_Σ	potência aparente coletiva
PF	Fator de potência
V_e	Tensão eficaz equivalente
I_e	Corrente eficaz equivalente

S_e	potência aparente efetiva
N	potência não ativa
S_{eN}	potência aparente não fundamental
D_{eI}	potência de distorção da corrente
D_{eV}	potência de distorção da tensão
D_{eH}	potência aparente harmônica
P_1^+	potência ativa fundamental de sequência positiva
Q_1^+	potência reativa fundamental de sequência positiva
\hat{v}_μ	Tensão homo integrativa
\hat{i}_μ	Corrente homo integrativa
\check{v}_μ	Tensão homo derivativa
\check{i}_μ	Corrente homo derivativa
$\langle \mathbf{v}, \mathbf{i} \rangle$	Produto interno
D_v	potência de distorção da tensão
D_i	potência de distorção da corrente

SUMÁRIO

1	Contexto histórico e introdução geral.....	16
1.1	Breve Histórico.....	16
2	Principais abordagens do cálculo da potência elétrica	24
2.1	Método proposto por Budeanu (1927)	24
2.2	potência ativa e reativa Instantânea - teoria PQ (Akagi et al.)	25
2.3	Método proposto por Czarnecki (1988)	27
2.4	teoria FBD (Fryze, Buchholz, Depenbrock).....	30
2.5	Definições segundo o IEEE Std. 1459-2000 e 2010	32
2.6	Conservative Power Theory – CPT (Tenti et all.).....	36
3	Potências reativas usadas neste trabalho	40
3.1	potência reativa Fundamental.....	40
3.2	potência reativa pela teoria PQ.....	40
3.3	potência reativa de acordo com IEEE Std. 1459-2000.....	41
3.4	potência reativa Definida pela teoria CPT.....	41
3.5	potência reativa Calculada pelo Yokogawa WT3000	41
3.6	Conclusão	41
4	Resultados de simulações	43
4.1	Perfil (A): Tensão Senoidal e equilibrada	43
4.1.1	(A1) Carga indutiva trifásica balanceada com retorno.....	44
4.1.2	(A2) Carga indutiva trifásica desbalanceada com retorno.....	45
4.1.3	(A3) Carga não linear (3 retificadorES monofásicos com carga RL) Balanceada) 47	
4.1.3.1	(A3.1) Carga não linear (THD I 15,66%).....	47
4.1.3.2	(A3.2) Carga não linear (THD I 47%).....	48
4.2	Perfil (B): Tensão Senoidal desbalanceada 5%	49
4.2.1	(B1) Carga indutiva trifásica balanceada com retorno	50
4.2.2	(B2) Carga indutiva trifásica desbalanceada com retorno.....	51
4.2.3	(B3) Carga não linear (3 retificadores monofásicos carga RL Balanceada).	52
4.2.3.1	(B3.1) Carga não linear (THD 15,6%).	52

4.2.3.2	(B3.2) Carga não linear (THD 47%).	54
4.3	Perfil (C): Tensão Não Senoidal (THD 12,25%) e balanceada	55
4.3.1	(C1) Carga indutiva trifásica balanceada com retorno	55
4.3.2	(C2) Carga indutiva trifásica desbalanceada conexão Y	57
4.4	Perfil (D): Tensão Não Senoidal (THD 12,25%) e Desbalanceada (5%).	58
4.4.1	(D1) Carga indutiva trifásica balanceada com retorno	58
4.4.2	(D2) Carga indutiva trifásica desbalanceada conexão Y	59
4.5	Conclusão	60
5	Arranjo laboratorial utilizado	61
5.1	Montagem experimental de Medidores	63
5.1.1	geração dos perfiz de tensão	63
5.1.2	Geração dos perfis de corrente	64
5.2	Sistema de Sincronismo entre tensão e corrente	65
5.2.1	medição e aquisição dos dados	66
5.2.2	medidores sob ensaio	67
5.3	Medição das energias registradas nos medidores eletrônicos	68
5.3.1	Sistemas de Aquisição de Dados e Determinação de Consumo	68
6	Resultados experimentais	75
6.1	Perfil com Tensão e Corrente Original	75
6.1.1	perfil 1 THDV(3,6%) THDI(43,5%)	75
6.1.2	perfil 2 THDV(4%) THDI(48%)	76
6.2	Perfil com Tensão Balanceada	77
6.2.1	Perfil 3 – Carga Linear Balanceada	77
6.2.2	perfil 4 – Carga Não Linear Desbalanceada	79
6.2.3	perfil 5 Carga Não Linear Desbalanceada	80
6.3	Perfil com Tensão Desbalanceada (5%)	81
6.3.1	perfil 6 THDV(3,4%) THDI(4,7%)	81
6.3.2	perfil 7 THDV(4,5%) THDI(49,4%)	82
6.4	Perfil com Tensão e Corrente Desbalanceadas	84
6.4.1	perfil 8 THDV(5,5%) THDI(20,5%)	84
6.4.2	perfil 9 THDV(6,7%) THDI(43%)	85
6.5	Conclusão	88

7	Conclusão Geral	89
8	Referências	91
9	Anexo I.....	93

1 CONTEXTO HISTÓRICO E INTRODUÇÃO GERAL

1.1 BREVE HISTÓRICO

No final do século XIX, 1882, Nikola Tesla, inventor sérvio-americano descobriu o princípio de campo magnético rotativo, base das máquinas de corrente alternada. A partir de então, com os esforços científicos nesta área, foi concebido o sistema de motores e geradores elétricos que alimenta de energia elétrica nosso planeta. Sem os trabalhos pioneiros deste inventor, hoje não seria possível obter o fantástico desenvolvimento industrial que a humanidade alcançou. Nikola Tesla provou que a melhor maneira de gerar, transmitir e distribuir energia elétrica aos consumidores seria usando circuitos trifásicos. Quando Tesla foi contratado por George Westinghouse, empresário e engenheiro estadunidense, para construir uma linha de transmissão entre Niágara e Búfalo no Estado de Nova York, Thomas Edson fez o possível para desacreditar Tesla, mas seu esforço foi em vão, pois o sistema polifásico de Tesla fora adotado. Naquela época, com a tecnologia conhecida até então, fora a escolha mais sensata. Atualmente o sistema de corrente contínua, que era defendido por Edson, possui algumas vantagens em relação ao sistema polifásico, sendo a principal delas o custo.

Desta forma, os Sistemas Elétricos de potência, Geração, Transmissão e Distribuição, passaram a ser baseados no princípio defendido por Tesla, ou seja, sistema trifásico com tensões senoidais defasadas de 120° e com frequência constante, facilitando assim, o projeto de transformadores e de linhas de transmissão por longas distâncias, tendo ainda como vantagem uma melhor eficiência.

Neste período, tanto as cargas industriais, quanto comerciais e residenciais, eram predominantemente lineares (resistivas, indutivas e capacitivas), representadas principalmente por máquinas movidas a motores elétricos e lâmpadas incandescentes para iluminação de fábricas, comércios, residências e das ruas. A forma encontrada para computar o consumo da energia elétrica consumida se dava por meio de medidores de energia, como por exemplo, um modelo eletromecânico daquela época é apresentado na Figura 1.1.

Figura 1.1- Wattímetro polifásico da Westinghouse (1899-1903)



Fonte: Westinghouse Handbook

Estes medidores mediam apenas a potência ativa ou reativa fundamental, cujo cálculo pode ser feito com posse dos valores eficazes fundamentais de tensão e corrente, juntamente com o ângulo de defasagem entre os mesmos, ou seja, trivial.

A potência reativa fundamental surge a media que se tem uma defasagem entre tensão e corrente, o que caracteriza uma carga com reatância capacitiva ou indutiva. A potência instantânea é uma forma analítica interessante para visualizar e analisar o comportamento da potência reativa em função da defasagem entre tensão e corrente. Considere um sistema monofásico com frequência angular fixa ω , cuja tensão e corrente no domínio do tempo é dada pelas equações 1.1 e 1.2.

$$v = \sqrt{2} \cdot V \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (1.1)$$

$$i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \theta) \quad (1.2)$$

A potência instantânea é o produto de tensão e corrente no tempo, as equações 1.3 a 1.7 mostram seu desenvolvimento.

$$p = v \cdot i \quad (1.3)$$

$$pt = \sqrt{2} \cdot V \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \theta) \quad (1.4)$$

Utilizando soma e diferença de senos é possível chegar à equação 1.5.

$$p = \frac{1}{2} [2.V.I.\cos(\theta) - 2.V.I.\cos(2.\omega.t - \theta)] \quad (1.5)$$

$$p = V.I.\cos(\theta) - V.I.\cos(2.\omega.t - \theta) \quad (1.6)$$

Desenvolvendo o segundo termo da equação 1.6 chega-se a equação 1.7.

$$p = V.I.\cos(\theta) - V.I.\cos(\theta).\cos(2.\omega.t) - V.I.\sen(\theta).\sen(2.\omega.t) \quad (1.7)$$

É possível dividi-la em potência ativa e potência reativa de acordo com a equação 1.8.

$$p = p_a + p_q \quad (1.8)$$

O trabalho e rearranjo algébrico da equação 1.7 resultam nas equações 1.9 e 1.10.

$$p_a = V.I.\cos(\theta) [1 - \cos(2.\omega.t)] \quad (1.9)$$

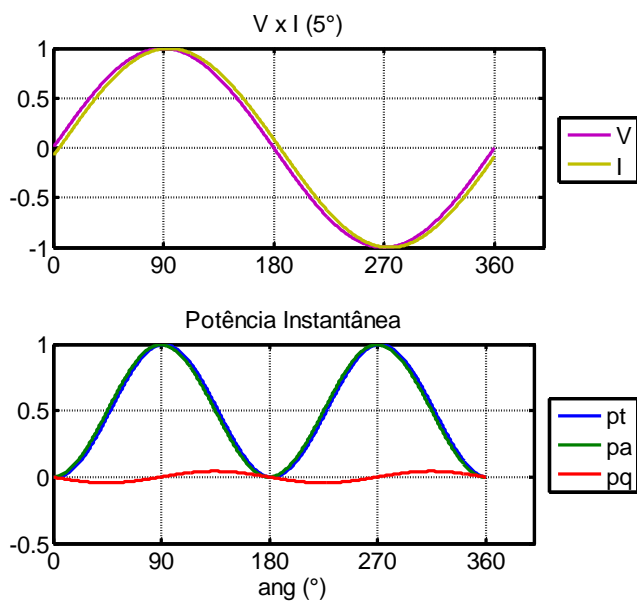
$$p_q = -V.I.\sen(\theta).\sen(2.\omega.t) \quad (1.10)$$

A potência total é dada pela potência aparente, que é a multiplicação dos valores RMS de tensão e corrente.

$$S = V.I \quad (1.11)$$

A representação destas equações em gráficos no domínio do tempo facilita o entendimento para observar o comportamento da potência reativa e o que a origina, isto pode ser visto com o auxílio das figuras 1.2 a 1.4, onde as ordenadas estão em p.u.. Primeiramente na figura 1.2, atrasou-se a corrente de 5° da tensão, observa-se que a potência ativa é praticamente a potência total, enquanto que a potência reativa é muito pequena.

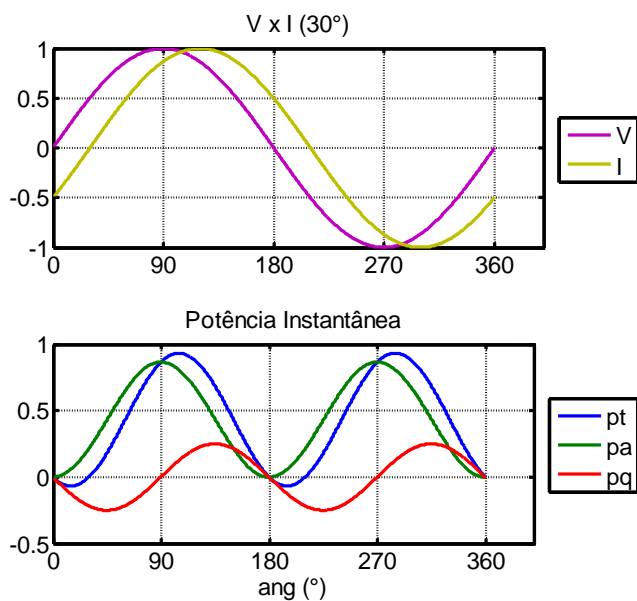
Figura 1.2 - Tensão, corrente e potências para o caso de 5° .



Fonte: Fazio Junior (2011)

Na Figura 1.3 tem-se a corrente com um atraso de 30° , onde é observado que a potência reativa é significativa e que apresenta valor médio nulo, indicando que não há uma direção fixa do fluxo de potência da fonte para a carga ou vice-versa. É possível concluir que esta energia oscila no dobro da frequência fundamental e que flui entre a carga e a fonte que a alimenta.

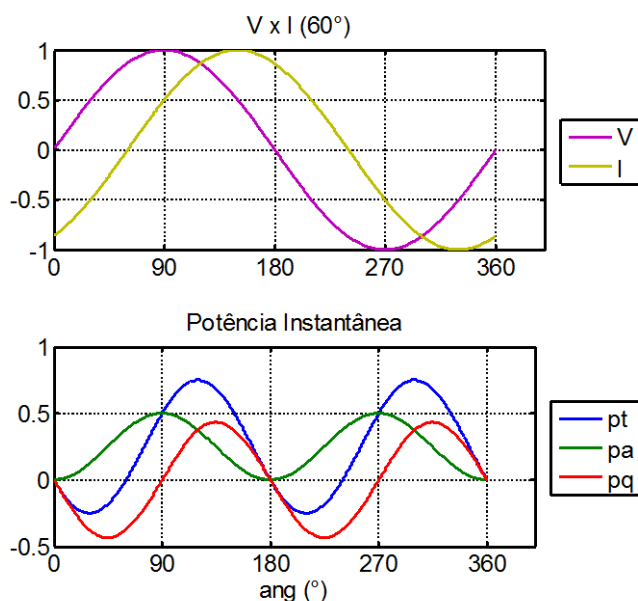
Figura 1.3 - Tensão, corrente e potências para o caso de 30° .



Fonte: Fazio Junior (2011)

A Figura 1.4 visa reforçar a ideia do comportamento das potências com a defasagem entre tensão e corrente. Com 60° de defasagem e considerando o valor RMS para fins de comparação, observa-se que a potência reativa supera a potência ativa, e conseguinte atinge seu valor máximo para uma defasagem de 90° .

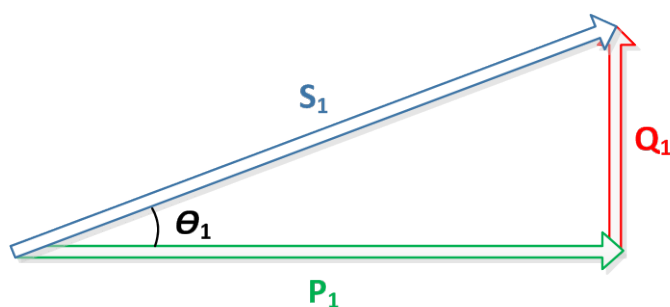
Figura 1.4 - Tensão, corrente e potências para o caso de 60° .



Fonte: Fazio Junior (2011)

Geometricamente é possível representar as potências pelo triângulo abaixo, cujos cálculos são subsequentes.

Figura 1.5 - Triângulo de potências



Fonte: Fazio Junior (2011)

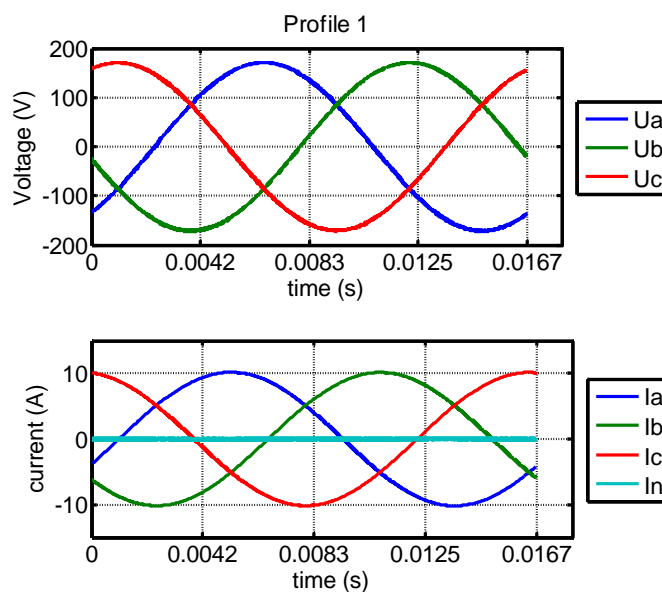
$$S_1 = V_1 \cdot I_1 \quad (1.12)$$

$$P_1 = S_1 \cdot \cos \theta_1 \quad (1.13)$$

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin \theta_1 \quad (1.14)$$

Na época em que as cargas possuíam predominantemente um comportamento linear, drenava correntes senoidais de fontes senoidais, esta teoria de potência era suficiente para o projeto e análise dos sistemas elétricos de potência em regime permanente. Os medidores de energia elétrica do tipo de indução funcionavam perfeitamente nestas características, medindo a energia consumida satisfatoriamente, isentando as empresas de fornecimento de energia da preocupação relacionada a erros de medição. A Figura 1.6 representa um sistema com tensão senoidal alimentando cargas lineares.

Figura 1.6 - Exemplo de comportamento linear da carga



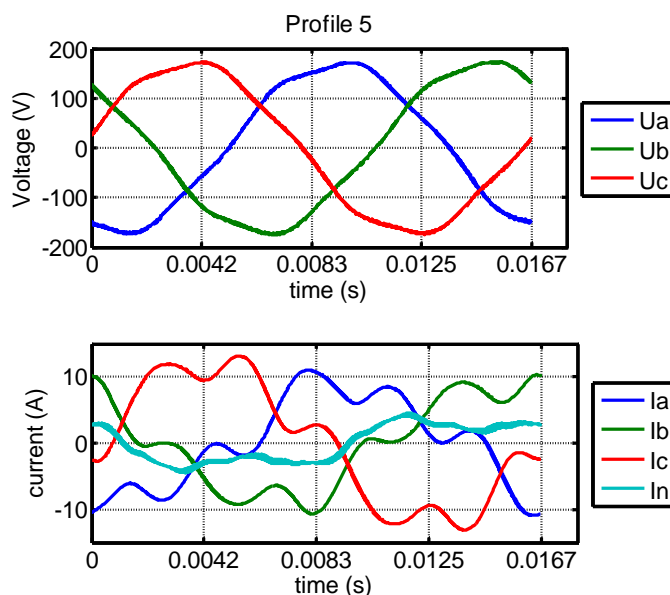
Fonte: Fazio Junior (2011)

Atualmente os sistemas elétricos de potência continuam com características diferentes, ou seja, tensões não senoidais no ponto de acoplamento comum. No entanto o paradigma das cargas mudou, elas são em sua maioria não lineares, i.e., possuem um processamento eletrônico da energia elétrica. Por motivos econômicos e/ou de eficiência, estes dispositivos baseados em eletrônica de potência controlam o fluxo de energia para tais cargas (fontes chaveadas, controladores de velocidade de máquinas elétrica, equipamentos de solda e o restante dos conversores estáticos de potência), juntamente com dispositivos presentes nos setores comercial e residencial (computadores pessoais,

instrumentação eletrônica, reatores eletrônicos de baixo fator de potência, TVs, DVDs e demais dispositivos de entretenimento).

Estas cargas drenam do sistema elétrico de potência um elevado conteúdo harmônico de corrente, resultando em distorções na tensão, redução do fator de potência, elevado nível de terceiro harmônico de corrente no neutro, superaquecimento de transformadores, baixo rendimento de máquinas elétricas devido a esforços mecânicos adicionais e interferências eletromagnéticas, afetando inclusive os medidores de energia ativa e reativa, de forma a reduzir sua vida útil trazendo prejuízos no faturamento das empresas de energia elétrica. A seguir, na Figura 1.7, representa um sistema alimentando cargas não lineares.

Figura 1.7 - Exemplo de comportamento não-linear da carga



Fonte: Fazio Junior (2011)

O baixo fator de potência provoca no sistema elétrico de potência uma circulação de reativos, os quais o tornam ineficiente, aumentando as perdas nos condutores, prejudicando a qualidade da energia, afetando os dispositivos dos sistemas de distribuição e, conseqüentemente, elevando os custos de construção e manutenção do mesmo.

Atualmente, a teoria de potências convencional não é mais válida para os casos em que as correntes não são senoidais. Nesta situação, os medidores de energia, tanto de indução como os eletrônicos, poderão apresentar uma imprecisão de leitura provocada não somente pelo conteúdo harmônico de corrente, mas também por desequilíbrios e distorções de tensões e corrente. Desta forma, devem-se analisar tais medidores sobre condições não

senoidais, juntamente com desequilíbrios nas tensões e correntes, por meio de uma teoria cujas definições de potências sejam válidas para o cenário atual do sistema elétrico, e para todos os tipos de situações que o sistema possa apresentar.

Há algum tempo a comunidade científica tem se esforçado para criar uma teoria que contemplasse todos os fenômenos elétricos onde poderia se aplicada para qualquer proposito, seja medição ou compensação de distúrbios.

A teoria de potência elétrica pode ser dividida em duas vertentes, a primeira forma uma classe cujas definições e equacionamentos são realizados no domínio da frequência, como exemplos têm-se (BUDEANU, 1927; KIMBARK, 1971; SHEPHERD; ZAKIKHANI, 1972; CZARNECKI, 1988; IEEE STANDARD 1459-2010, 2000). A segunda forma a classe daquelas definidas no domínio do tempo, e que tiveram grandes contribuições de (FRYZE, 1932; AKAGI, KANAZAWA; NABAE, 1983; DEPENBROCK, 1979; DEPENBROCK, 1992; ROSSETTO; TENTI, 1994; WILLEMS, 1992; TENTI; MATTAVELI, 2003). A primeira abordagem é baseada no espectro harmônico da tensão, corrente e tinha como motivação principal a definição de grandezas que possam ser aplicadas a sistemas de medição e tarifação de energia. Já a segunda era motivada pela compensação de distúrbios. Atualmente ambos os domínios podem ser aplicados tanto para medição quanto para compensação.

Muitas abordagens de teorias de potências têm sido desenvolvidas para resolver problemas em condições não senoidais aplicadas à medição de energia, identificação de distorções de carga e compensação de harmônicos e reativos. Entretanto, estas teorias ainda estão em discussões. Cada uma possui seus pontos fortes e fracos referente aos tipos de aplicações. No próximo capítulo serão abordadas de forma mais detalhada cada uma das principais teorias e seus respectivos equacionamentos.

2 PRINCIPAIS ABORDAGENS DO CÁLCULO DA POTÊNCIA ELÉTRICA

A seguir será apresentado, em ordem cronológica, um breve estudo bibliográfico das principais teorias de potência elétrica encontradas na literatura buscando-se os pontos de maior relevância para este trabalho.

2.1 MÉTODO PROPOSTO POR BUDEANU (1927)

Este método no seu modo simplificado (considerando somente as componentes de frequência fundamental) ainda é o mais aceito e o mais utilizado por engenheiros nas universidades, concessionárias de energia e na indústria. Segundo Budeanu a potência total de um sistema elétrico é dada pela Equação 2.1.

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D_B^2 \quad (2.1)$$

Tal que, S é a potência aparente, P a potência ativa, Q_B é a potência reativa e por fim D_B a potência de distorção. A potência aparente é o somatório do produto do valor RMS das tensões e correntes de cada componente harmônica.

$$S = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \quad (2.2)$$

Sendo V_h e I_h as tensões e correntes eficazes de cada componente harmônica h

$$V_h = \sqrt{\frac{1}{T_h} \int_0^{T_h} v_h^2 dt} \quad I_h = \sqrt{\frac{1}{T_h} \int_0^{T_h} i_h^2 dt} \quad (2.3)$$

T_h é o período em uma dada frequência e, v_h e i_h são tensões e correntes instantâneas na frequência h .

A potência ativa P e a potência reativa Q são definidas segundo Budeanu:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} P_h = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \phi_h \quad (2.4)$$

$$Q_B = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin \phi_h \quad (2.5)$$

A potência de Distorção D_B definida por Budeanu é expressa pela equação 2.6.

$$D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2} \quad (2.6)$$

As definições segundo Budeanu apresentam algumas inconsistências referentes a sistemas não senoidais, como a falta de sentido físico das potências reativa e de Distorção relacionado aos tipos de fenômenos encontrados nos sistemas de energia elétrica. Devido à potência de Distorção não partir diretamente de sinais mensuráveis (V e I).

2.2 POTÊNCIA ATIVA E REATIVA INSTANTÂNEA - TEORIA PQ (AKAGI ET AL.)

A teoria de potência ativa e reativa instantânea, mais conhecida por teoria PQ, foi desenvolvida com o propósito de ser uma teoria básica para o controle de filtros ativos de potência (WATANABE e AREDES). Ela é baseada na transformada de Clarke das tensões e correntes de sistemas trifásicos (a, b, c) para as coordenadas ortogonais (α , β , 0), descrevendo a potência em sistemas trifásicos a três fios por dois componentes instantâneos, a potência real instantânea p e a potência imaginária instantânea q . Introduzindo a potência instantânea de sequência zero, p_0 , a teoria PQ pode ser aplicada em sistemas trifásicos a quatro fios.

Aplicando a transformada de Clarke nas tensões e correntes resultam:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = C_1 \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = C_1 \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Os autores definiram as componentes de potência instantânea válidas para sistemas não senoidais e desequilibrados, em que p_0 é a potência de sequência zero

(somente para sistemas a quatro fios), p a potência real e q a potência imaginária, conforme a equação 2.9.

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

A potência ativa instantânea de sistemas trifásicos a quatro fios fica do mesmo modo que o da forma tradicional, e é a soma de p com p_0 :

$$p_{3\phi} = p + p_0 = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \quad (2.10)$$

Sistemas trifásicos a três fios, o termo da potência instantânea de sequência zero desaparece:

$$p_{3\phi} = p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad (2.11)$$

O conceito de potência imaginária instantânea colocada pelos autores é definida por 2.12.

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta \quad (2.12)$$

A potência imaginária, segundo seus autores, representa uma potência presente individualmente em cada fase que são trocadas entre si, contudo ela não contribui para a potência ativa instantânea em um sistema trifásico.

As correntes ortogonais i_α e i_β podem ser decompostas nas correntes ativas instantâneas ($i_{\alpha p}$ e $i_{\beta p}$) e imaginárias instantâneas ($i_{\alpha q}$ e $i_{\beta q}$).

$$i_{\alpha p} = \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}^2} p ; \quad i_{\beta p} = \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}^2} p \quad (2.13)$$

$$i_{\alpha q} = \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}^2} q ; \quad i_{\beta q} = -\frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}^2} q \quad (2.14)$$

Tal que: $v_{\alpha\beta}^2 = v_\alpha^2 + v_\beta^2$.

É possível voltar às coordenadas (a, b, c) usando a transformada inversa de Clarke:

$$\begin{bmatrix} i_{a0} \\ i_{b0} \\ i_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = C_2 \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} = C_2 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} = C_2 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Então, somando as correntes obtidas acima, conclui-se que as correntes na coordenadas (a, b, c) podem ser decompostas como na equação 2.18.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{a0} \\ i_{b0} \\ i_{c0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

A teoria PQ é muito interessante no campo de compensação de distúrbios, mas para aplicações como a medição de energia reativa em condições não senoidais merece uma atenção especial, pois a potencia imaginaria

2.3 MÉTODO PROPOSTO POR CZARNECKI (1988)

A motivação para esta abordagem esta originou-se na busca por uma metodologia de decomposição dos sinais de correntes e potências que estivessem relacionados o máximo possível aos fenômenos físicos do sistema elétrico, surgindo então o nome *Theory*

of *Current's Physical Components (CPC)* em 2004. O autor utiliza o conceito de álgebra vetorial para o desenvolvimento da teoria.

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \cong \sum_{h=0}^{\infty} \begin{bmatrix} v_{ah} \\ v_{bh} \\ v_{ch} \end{bmatrix} = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=0}^{\infty} \begin{bmatrix} V_{ah} \\ V_{bh} \\ V_{ch} \end{bmatrix} e^{jh\omega_1 t} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \cong \sum_{h=0}^{\infty} \begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_{ch} \end{bmatrix} = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=0}^{\infty} \begin{bmatrix} I_{ah} \\ I_{bh} \\ I_{ch} \end{bmatrix} e^{jh\omega_1 t} \quad (2.20)$$

Em que: v_a, v_b, v_c e i_a, i_b, i_c são as tensões e correntes instantâneas, aquelas com o índice h são suas respectivas componentes harmônicas, as tensões e correntes em maiúsculo são os valores RMS complexos, ω_1 é a frequência fundamental e Re representa a parte real da equação.

O valor RMS equivalente dos vetores de tensão e corrente é definido pelo autor como o seguinte produto escalar:

$$V = \|\mathbf{v}\| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) dt} \quad (2.21)$$

$$I = \|\mathbf{i}\| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\mathbf{i} \cdot \mathbf{i}) dt} \quad (2.22)$$

Para um circuito com tensão não senoidal e desequilibrada e carga não linear e desbalanceada, os equacionamentos que serão apresentados a seguir são válidos. A corrente ativa é calculada pela equação 2.23.

$$\|\mathbf{i}_a\| = G_e \cdot \|\mathbf{v}\| \quad (2.23)$$

Tal que G_e é a condutância da carga não linear desbalanceada submetida a uma tensão não senoidal.

$$G_e = \frac{P}{\|\mathbf{v}\|^2} \quad (2.24)$$

E a potência ativa como sendo:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}' \cdot \mathbf{i} = \sum_{h \in N_u} P_h = \sum_{h \in N_u} \text{Re}(V_{ah} I_{ah}^* + V_{bh} I_{bh}^* + V_{ch} I_{ch}^*) \quad (2.25)$$

Onde N_u é o conjunto das componentes harmônicas presentes na tensão.

A corrente reativa é possível calcular conforme 2.26.

$$\|\mathbf{i}_r\| = \sqrt{\sum_{h \in N_u} \frac{Q_h^2}{\|\mathbf{v}_h\|^2}} \quad (2.26)$$

Sendo Q_h a potência reativa referente a cada harmônica.

$$Q_h = \text{Im}(V_{ah} I_{ah}^* + V_{bh} I_{bh}^* + V_{ch} I_{ch}^*) \quad (2.27)$$

A corrente seguinte i_s representa a variação da condutância G_{he} em função da frequência h .

$$\|\mathbf{i}_s\| = \sqrt{\sum_{h \in N_u} (G_{he} - G_e)^2 \cdot \|\mathbf{v}_h\|^2} \quad (2.28)$$

Tal que:

$$G_{he} = \frac{P_h}{\|\mathbf{v}_h\|^2} \quad (2.29)$$

Há também uma representação do desbalanço das cargas pela corrente i_u :

$$\|\mathbf{i}_u\| = \sqrt{\sum_{h \in N_u} [\|\mathbf{i}_h\|^2 - (G_{he}^2 + B_{he}^2) \cdot \|\mathbf{v}_h\|^2]} \quad (2.30)$$

A susceptância B_{he} é calculada pela equação 2.31

$$B_{he} = -\frac{Q_h}{\|\mathbf{v}_h\|^2} \quad (2.31)$$

As correntes harmônicas que surgem devido a não linearidades da carga, aquelas com frequências distintas da tensão são representadas pela corrente i_g .

$$\|\mathbf{i}_g\| = \sqrt{\sum_{h \in N_g} \|\mathbf{i}_h\|^2} \quad (2.32)$$

Onde N_g é o conjunto das componentes harmônicas geradas na carga não linear.

$$\|\mathbf{i}\|^2 = \|\mathbf{i}_a\|^2 + \|\mathbf{i}_r\|^2 + \|\mathbf{i}_s\|^2 + \|\mathbf{i}_u\|^2 + \|\mathbf{i}_g\|^2 \quad (2.33)$$

Multiplicando ambos os lados por $\|\mathbf{v}\|^2$ tem-se as potências:

$$S^2 = P^2 + Q_r^2 + D_s^2 + D_u^2 + D_g^2 \quad (2.34)$$

A proposta de Czarnecki resulta em um bom entendimento dos fenômenos físicos do sistema elétrico, entretanto apresenta uma grande complexidade no equacionamento no domínio da frequência e, talvez por esta razão, não foi muito difundida. Esta proposta parece interessante do ponto de vista da medição de energia, desde que utilize bons sistemas de processamento digital de sinais.

2.4 TEORIA FBD (FRYZE, BUCHHOLZ, DEPENBROCK)

O método FBD é uma extensão ao trabalho de Fryze e Buchholz (BUCHHOLZ, 1950), Depenbrock faz o uso da decomposição de corrente de Fryze e dos valores coletivos instantâneos RMS de Buchholz, para definir a nova decomposição de corrente. Ela pode ser aplicada em qualquer circuito multifase usando as corretas considerações, em que pode ser representada por um circuito uniforme onde os condutores são tratados por iguais. Esta teoria usa vetores de tensão e corrente multidimensionais (\mathbf{v}_* , \mathbf{i}) e seus valores coletivos instantâneos RMS (v_Σ , i_Σ) são definidos a seguir.

$$\mathbf{v}_* = \begin{bmatrix} v_{a*} \\ v_{b*} \\ v_{c*} \\ \vdots \\ v_{n*} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$i_\Sigma = \sqrt{\sum_{\mu=1}^n i_\mu^2}; \quad v_\Sigma = \sqrt{\sum_{\mu=1}^n v_\mu^2} \quad (2.36)$$

Em que n representa o número de condutores. O produto interno entre os vetores de tensão e corrente resulta na potência instantânea:

$$p_{\Sigma} = \mathbf{v}_* \cdot \mathbf{i} \quad (2.37)$$

Em condições periódicas, o valor RMS coletivo das correntes, tensões, potência aparente, potência ativa e Fator de potência são calculados respectivamente da seguinte forma:

$$I_{\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Sigma}^2 dt}; \quad V_{\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_{\Sigma}^2 dt} \quad (2.38)$$

$$S_{\Sigma} = V_{\Sigma} \cdot I_{\Sigma} \quad (2.39)$$

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{\Sigma} dt \quad (2.40)$$

$$PF = \frac{P_{\Sigma}}{S_{\Sigma}} \quad (2.41)$$

A corrente instantânea em cada fase do sistema, i_{μ} , é decomposta em componentes proporcional e ortogonal às tensões:

Corrente ativa ($i_{a\mu}$): transfere a energia média para a carga e é válida sobre condições periódicas.

$$\mathbf{i}_{a\mu} = \frac{P_{\Sigma}}{V_{\Sigma}^2} \mathbf{v}_{\mu*} = G_a \mathbf{v}_{\mu*} \quad (2.42)$$

Corrente não ativa ($i_{n\mu}$): é relacionado com qualquer tipo de distúrbio e oscilação que afeta a potência instantânea, entretanto ela não transfere energia media para a carga.

$$\mathbf{i}_{n\mu} = \mathbf{i}_{\mu} - \mathbf{i}_{a\mu} \quad (2.43)$$

Power currents ($i_{p\mu}$): responsável pela potência instantânea, e inclui possíveis oscilações relacionadas com harmônicas e desbalanceamento da carga.

$$\mathbf{i}_{p\mu} = \frac{P_{\Sigma}}{v_{\Sigma}^2} \mathbf{v}_{\mu*} = G_p \mathbf{v}_{\mu*} \quad (2.44)$$

Powerless currents ($i_{z\mu}$): não fornece energia e pode ser compensada instantaneamente sem a necessidade de elementos armazenadores de energia.

$$\mathbf{i}_{z\mu} = \mathbf{i}_{\mu} - \mathbf{i}_{p\mu} \quad (2.45)$$

Corrente de variação ($i_{v\mu}$): é responsável pela oscilação da condutância equivalente instantânea G_p ao redor de seu valor médio G_a , ou também variações da potência instantânea p_{Σ} ao redor da potência ativa P_{Σ} .

$$\mathbf{i}_{v\mu} = \mathbf{i}_{p\mu} - \mathbf{i}_{a\mu} = \mathbf{i}_{n\mu} - \mathbf{i}_{z\mu} \quad (2.46)$$

A decomposição das correntes ortogonais proposta pela teoria FBD seque abaixo:

$$\|\mathbf{i}_{\mu}\|^2 = \|\mathbf{i}_{a\mu}\|^2 + \|\mathbf{i}_{n\mu}\|^2 = \|\mathbf{i}_{a\mu}\|^2 + \|\mathbf{i}_{v\mu}\|^2 + \|\mathbf{i}_{z\mu}\|^2 \quad (2.47)$$

Tais correntes multiplicadas pela norma da tensão resultam em potências relacionadas ao fenômeno que cada corrente representa.

$$\|\mathbf{P}_{\mu}\|^2 = \|\mathbf{P}_{a\mu}\|^2 + \|\mathbf{P}_{n\mu}\|^2 = \|\mathbf{P}_{a\mu}\|^2 + \|\mathbf{P}_{v\mu}\|^2 + \|\mathbf{P}_{z\mu}\|^2 \quad (2.48)$$

A proposta de Depenbrock apresenta algumas características: permite o cálculo instantâneo da potência não ativa. A potência aparente Coletiva, segundo vários autores, é a mais rigorosa apresentada até então, pois considera todos os fenômenos envolvidos, como perdas, transferência de energia, oscilações, etc. Em (STAUDT, 2008) há várias considerações teóricas explicadas por exemplos.

2.5 DEFINIÇÕES SEGUNDO O IEEE STD. 1459-2000 E 2010

O IEEE mostra algumas definições para calcular os valores de tensão e corrente equivalentes para o sistema trifásico e da potência aparente efetiva (que assume um circuito virtual balanceado, apresentando exatamente a mesma perda de linha de um circuito desbalanceado), como uma alternativa para o cálculo da potência aparente de forma aritmética. Neste trabalho, há a separação das parcelas fundamentais de potência de sequência positiva das demais componentes de potência, como potências não ativas e

potências não fundamentais. O cálculo das componentes de tensão e corrente equivalentes se dá na seguinte forma para os sistemas trifásicos a quatro fios:

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18}[3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2]} \quad (2.49)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2)} \quad (2.50)$$

As equações acima recaem nas expressões abaixo para sistema trifásico a três fios:

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{9}(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)} \quad (2.51)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)} \quad (2.52)$$

Assim, a potência aparente efetiva é definida como:

$$S_e = 3V_e I_e \quad (2.53)$$

e a potência ativa é calculada pela integração da potência instantânea:

$$P = \frac{1}{kT} \int_0^{kT} (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c) dt \quad (2.54)$$

Aqui, T é o período de integração e k é um inteiro que define o número de ciclos de integração.

A parcela não ativa se resume à seguinte expressão:

$$N = \sqrt{S_e^2 - P^2} \quad (2.55)$$

Considerando agora situações não senoidais os autores dividem a tensão e corrente em componentes fundamentais e harmônicas:

$$V_e^2 = V_{e1}^2 + V_{eH}^2 \quad (2.56)$$

$$I_e^2 = I_{e1}^2 + I_{eH}^2 \quad (2.57)$$

Tal que:

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{1}{18}[3(V_{an1}^2 + V_{bn1}^2 + V_{cn1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2]} \quad (2.58)$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{1}{3}(I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2)} \quad (2.59)$$

$$V_{eH} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2} \quad (2.60)$$

$$I_{eH} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2} \quad (2.61)$$

Para condições não senoidais e desbalanceadas foi definido as seguintes expressões:

A potência aparente efetiva para situações não senoidais fica:

$$S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eN}^2 \quad (2.62)$$

Em que: $S_{e1} = 3V_{e1}I_{e1}$ é a potência aparente fundamental efetiva.

$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2}$ é a potência aparente não fundamental efetiva que é composta pelas seguintes componentes (potência de distorção de corrente, potência de distorção de tensão e potência aparente harmônica) conforme abaixo:

$$S_{eN}^2 = D_{eI}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2 \quad (2.63)$$

Tal que:

$$D_{eI} = 3V_{e1}I_{eH} \quad (2.64)$$

$$D_{eV} = 3V_{eH}I_{e1} \quad (2.65)$$

$$S_{eH} = 3V_{eH}I_{eH} \quad (2.66)$$

$$D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 - P_{eH}^2} \quad (2.67)$$

Com o intuito de avaliar situações desbalanceadas definiu-se a potência aparente fundamental de desbalanço:

$$S_{U1} = \sqrt{S_{e1}^2 - (S_1^+)^2} \quad (2.68)$$

Sendo a potência aparente fundamental de sequência positiva definida por:

$$S_1^+ = \sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2} \quad (2.69)$$

E a potência ativa e reativa:

$$P_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \cos\phi_1^+ \quad (2.70)$$

$$Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin\phi_1^+ \quad (2.71)$$

Por fim define-se o fator de potência fundamental:

$$FP_1^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+} \quad (2.72)$$

E o fator de potência efetivo:

$$FP_e = \frac{P}{S_e} \quad (2.73)$$

Em comparação com as definições tradicionais, esta definição de fator de potência é bem mais rigorosa do ponto de vista de medição e tarifação de energia elétrica.

A Tabela 2.1 mostra as principais definições.

Tabela 2.1 - Componentes Consideradas pela IEEE STD. 1459

Tipo	Combinados	Componentes fundamentais	Componentes não-Fundamentais	Unidade
aparente	S_e	S_{e1} S_1^+ S_{1U}	S_{eN} S_{eH}	[VA]
ativa	P	P_1^+	P_H	[W]
Não-ativa	N	Q_1^+	D_{eI} D_{eV} D_{eH}	[VAR]
Utilização da linha	$FP_e = \frac{P}{S_e}$	$FP_1^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+}$	-	-
Poluição harmônica	-	-	$\frac{S_{eN}}{S_{e1}}$	-
Desbalanço de carga	-	$\frac{S_{1U}}{S_1^+}$	-	-

Fonte: IEEE STD. 1459.

As definições segundo o IEEE tem um ponto importante pelo fato de separar as componentes fundamentais e de sequência positiva, isto facilita a compreensão dos fenômenos físicos, a medição e tarifação das potências envolvidas.

É importante notar que o método como é calculada a potência reativa no IEEE, não considera o efeito da defasagem entre tensão e corrente nas frequências superiores a fundamental de sequência positiva.

2.6 CONSERVATIVE POWER THEORY – CPT (TENTI ET ALL.)

A teoria de potência Conservativa, abreviada por CPT em inglês, é fundamentada na definição da potência complexa instantânea em condições não senoidais. Ela representa uma extensão da usual potência complexa definida para condições senoidais. O conceito de variáveis imparciais, integral e derivada, colocada pelos autores, pode ser definido para quaisquer condições periódicas e são homogêneas a corrente, tensão e potência, ou seja, possuem a mesma unidade dimensional. Este conceito satisfaz as leis de Kirchhoff e é conservativo em qualquer rede elétrica, o que permite introduzir o conceito de conservação da energia complexa em condições não senoidais.

Tomando sistemas multidimensionais, as seguintes definições usam a mesma simbologia da teoria FBD, i.e., variáveis em negrito para representar vetores, e o índice μ para indicar cada fase. As variáveis imparciais integrativas de tensão e corrente são definidas abaixo.

$$\hat{v}_\mu(t) = (v_{\mu f}(t) - \bar{v}_{\mu f}) \quad (2.74)$$

$$\hat{i}_\mu(t) = (i_{\mu f}(t) - \bar{i}_{\mu f}) \quad (2.75)$$

Em que: $v_{\mu f}(t) = \int_0^T v_\mu(\tau) d\tau$, $i_{\mu f}(t) = \int_0^T i_\mu(\tau) d\tau$ são integrais no domínio do tempo e $\bar{v}_{\mu f}$, $\bar{i}_{\mu f}$ são seus respectivos valores médios sobre o período T.

As variáveis imparciais derivativas são definidas como:

$$\check{v}_\mu(t) = \frac{dv_\mu(t)}{dt} \quad (2.76)$$

$$\check{i}_\mu(t) = \frac{di_\mu(t)}{dt} \quad (2.77)$$

O produto interno dos vetores é a seguinte expressão:

$$\langle \mathbf{v}, \mathbf{i} \rangle = \langle \mathbf{i}, \mathbf{v} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt \quad (2.78)$$

As normas dos vetores possuem o mesmo resultado que os valores RMS coletivos da teoria FBD (V_Σ , I_Σ), ou seja:

$$\|\mathbf{v}\| = \sqrt{\langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle}, \quad \|\mathbf{i}\| = \sqrt{\langle \mathbf{i}, \mathbf{i} \rangle} \quad (2.79)$$

$$V_\mu = \|\mathbf{v}_\mu\| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_\mu^2(t) dt}, \quad I_\mu = \|\mathbf{i}_\mu\| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_\mu^2(t) dt} \quad (2.80)$$

Considerando comportamento periódico, as seguintes definições são validas para condições senoidais e distorcidas, balanceadas e desbalanceadas:

potência ativa, P , representa a energia média transmitida:

$$P = \langle \mathbf{v}, \mathbf{i} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{i}(t) dt \quad (2.81)$$

Energia reativa reativa, W ,:

$$W = \langle \hat{\mathbf{v}}, \mathbf{i} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{\mathbf{v}}(t) \cdot \mathbf{i}(t) dt \quad (2.82)$$

Corrente ativa, $i_{a\mu}$, é aquela de mínima norma que transporta potência ativa para a carga.

$$i_{a\mu} = \frac{P}{\|\mathbf{v}\|^2} v_\mu \quad (2.83)$$

Corrente reativa, $i_{r\mu}$, é aquela de mínima norma que transfere potência reativa, e está relacionada à energia média que está sendo trocada pelo circuito.

$$i_{r\mu} = \frac{W}{\|\hat{\mathbf{v}}\|^2} \hat{v}_\mu \quad (2.84)$$

Corrente residual, $i_{v\mu}$, é a corrente residual que não transporta potência ativa e nem potência reativa, o que justifica seu nome.

$$i_{v\mu} = i_\mu - i_{a\mu} - i_{r\mu} \quad (2.85)$$

Por definição todas as correntes são ortogonais:

$$\|\mathbf{i}\|^2 = \|\mathbf{i}_a\|^2 + \|\mathbf{i}_r\|^2 + \|\mathbf{i}_v\|^2 \quad (2.86)$$

A potência aparente é definida como:

$$A^2 = \|\mathbf{v}\|^2 \|\mathbf{i}\|^2 = S^2 + D^2 \quad (2.87)$$

Em que S é o valor absoluto da potência complexa e D é a potência de distorção e possuem as seguintes expressões:

$$S^2 = P^2 + Q^2; \quad D^2 = D_v^2 + D_i^2 \quad (2.88)$$

A potência de distorção, ao contrário das demais não é conservativa, e é composta por dois termos, sendo o primeiro a potência de distorção da tensão e o segundo a potência de distorção da corrente, e são dados pelas seguintes relações:

$$D_v = W \cdot \sqrt{\frac{\|\mathbf{v}\|^2 - \|\hat{\mathbf{v}}\|^2}{\|\hat{\mathbf{v}}\|^2}}; \quad D_i = \|\mathbf{v}\| \|\mathbf{i}_v\| \quad (2.89)$$

As duas equações acima levam a conclusão de que só há potência de distorção da tensão quando existe potência reativa e distorção de tensão, e que, só irá ter potência de distorção da corrente quando houver a presença da corrente residual.

O fator de potência é definido:

$$\lambda = \frac{P}{A} \quad (2.90)$$

Importante evidenciar que esta é uma teoria recente, e possíveis mudanças no seu desenvolvimento poderão ocorrer. O conceito de potencia reativa deu lugar ao conceito de energia reativa, sendo esta conservativa, como pode ser observado em (TENTI; MATTAVELLI; PAREDES, 2010).

3 POTÊNCIAS REATIVAS USADAS NESTE TRABALHO

No capítulo anterior foram expostas as principais abordagens sobre teorias de potências elétricas. Neste capítulo foram selecionadas algumas abordagens que estão sendo mais referenciadas na literatura, e apenas mostrando a componente reativa. Para fins de comparação, foi adicionado o equacionamento usado pelo analisador de energia, Yokogawa WT3000, cuja expressão matemática foi extraída do manual do usuário.

3.1 POTÊNCIA REATIVA FUNDAMENTAL

A potência reativa de uma rede trifásica é calculada da seguinte forma.

$$Q = V_a \cdot I_a \cdot \sin \theta_a + V_b \cdot I_b \cdot \sin \theta_b + V_c \cdot I_c \cdot \sin \theta_c \quad (3.1)$$

Sendo V e I a tensão e corrente eficaz fundamental de cada fase e θ a defasagem entre tensão e corrente de cada fase.

$$V_x = \sqrt{\frac{1}{T_x} \int_0^{T_x} v_x^2 dt} \quad I_x = \sqrt{\frac{1}{T_x} \int_0^{T_x} i_x^2 dt} \quad (3.2)$$

3.2 POTÊNCIA REATIVA PELA TEORIA PQ

A teoria PQ, já vista no capítulo anterior, terá a potência imaginária calculada pelo valor médio da potência imaginária instantânea como na equação 3.6.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = C_1 \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = C_1 \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$q(t) = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta \quad (3.5)$$

$q(t)$ – potência imaginária instantânea.

$$\bar{q} = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt \quad (3.6)$$

\bar{q} – potência imaginária média.

3.3 POTÊNCIA REATIVA DE ACORDO COM IEEE STD. 1459-2000

O IEEE somente considera a potência fundamental reativa de sequência positiva.

$$Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \text{sen}\theta_1^+ \quad (3.7)$$

3.4 POTÊNCIA REATIVA DEFINIDA PELA TEORIA CPT

Potência reativa, W , é definida de acordo com a nova revisão (TENTI, MATTAVELLI e PAREDES, 2010).

$$W = \langle \hat{v}, \hat{i} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{v}(t) \cdot \hat{i}(t) dt \quad (3.8)$$

3.5 POTÊNCIA REATIVA CALCULADA PELO YOKOGAWA WT3000

O analisador de energia Yokogawa WT3000 utiliza a potência complexa para realizar o cálculo de cada componente harmônica, representada matematicamente pelas equações a seguir.

$$Q = \sum_{k=1}^{max} Q_k \quad (3.9)$$

Tal que:

$$Q_k = RMS(Re(v_k) \cdot Im(i_k) - Im(v_k) \cdot Re(i_k)) \quad (3.10)$$

v_k e i_k são os valores no domínio do tempo de cada componente harmônica e Re e Im representa os valores reais e imaginários das expressões.

3.6 CONCLUSÃO

É importante enfatizar que as propostas da teoria pq, CPT e o método de cálculo do Yokogawa, levam em consideração tensões e correntes não senoidais e desbalanceadas, enquanto que a potência reativa convencional e o IEEE, apenas as componentes fundamentais e de sequência positiva. Por este motivo, é certo que haverá divergência nos

resultados dos cálculos e será possível avaliar a viabilidade de se considerar ou não a potência reativa devido a não linearidades e desbalanços das cargas.

Estas teorias podem ser implementadas por meio de instrumentação virtual (PAREDES; MARAFÃO, et al., 2009; MOREIRA; DECKMANN, et al., 2005), no entanto neste trabalho os cálculos não serão feitos em tempo real. Eles serão realizados após a aquisição e armazenagem no banco de dados das tensões e correntes feitas pelo projeto experimental, o experimento será abordado de forma detalhadas nos próximos capítulos.

4 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as simulação das teorias PQ, CPT, IEEE STD. 1459 e o método utilizado pelo Yokogawa WT3000, tendo como objetivo comparar o o valor da potência reativa.

A comparação será feita simulando diferentes perfis de tensão, desde tensões senoidais e equilibradas até tensões não senoidais e desequilibradas, e para cada perfil simulou-se algumas cargas, como lineares com característica indutiva e não lineares com característica de fonte de corrente. Uma breve discussão foi feita no final do capítulo para avaliar os resultados mostrados pelas tabelas comparativas. Todos os resultados serão comparados com a IEEE STD 1459, que foi escolhida como a referência para os cálculos dos erros.

O desbalanço, apresentado na tabela características do perfil, é calculado dividindo-se a magnitude da componente de sequência negativa pela magnitude da componente de sequência positiva.

$$D\% = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (4.1)$$

O erro é calculado utilizando o erro relativo percentual.

$$e\% = \frac{|Q_{1+} - x|}{Q_{1+}} \cdot 100 \quad (4.2)$$

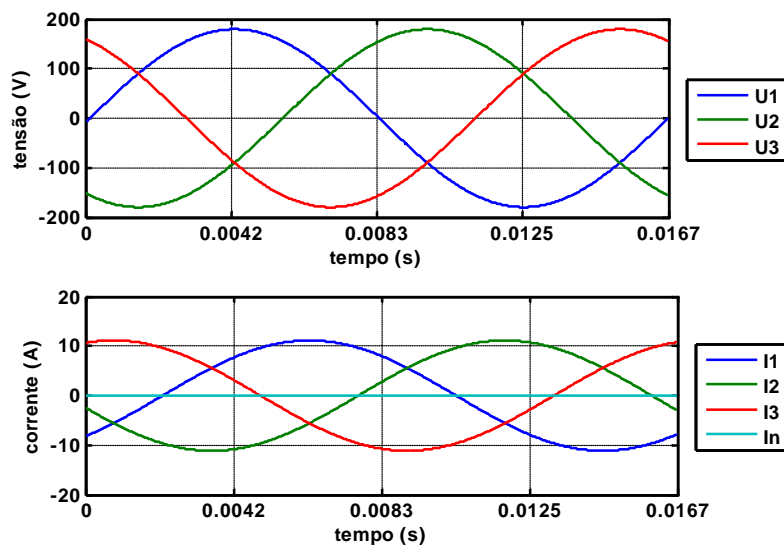
Onde x são as demais potências reativas.

4.1 PERFIL (A): TENSÃO SENOIDAL E EQUILIBRADA

Fase A (127Vrms, 60Hz), Fase B (127Vrms, 60Hz) e Fase C (127Vrms,60Hz)

4.1.1 (A1) CARGA INDUTIVA TRIFÁSICA BALANCEADA COM RETORNO

Figura 4.1 – Perfil A1 Carga Indutiva Trifásica Balanceada.



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.1 – Tensões e correntes do perfil A1 com carga indutiva balanceada.

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	127	0	
Vb	127	0	0
Vc	127	0	
Ia	7.874	0	
Ib	7.874	0	0
Ic	7.874	0	

Fonte: Fazio Junior (2011).

Tabela 4.2 – Impedancia A1 carga indutiva trifásica balanceada.

Perfil	Configuração das cargas
A1	11,5 Ω e 30mH

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.3 – Potências do perfil A1.

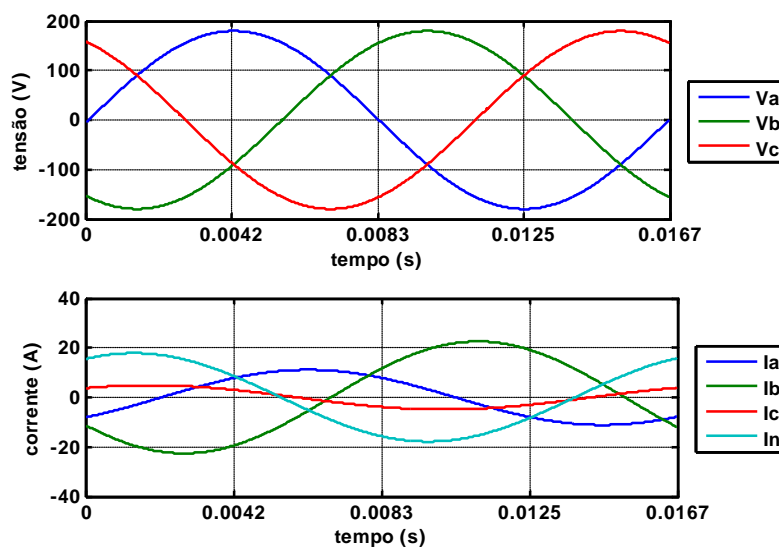
Método usado	potência reativa (KVAr)	Erro (%)
IEEE (Q1+)	2.103	-
Q1	2.103	0
CPT	2.103	0
PQ	2.103	0
Yokogawa	2.103	0

Fonte: Fazio Junior (2011)

Nesta configuração de tensão e corrente não foi apresentado diferença no cálculo dos métodos. Portanto para perfis equilibrados e senoidais todas as metodologias são equivalentes.

4.1.2 (A2) CARGA INDUTIVA TRIFÁSICA DESBALANCEADA COM RETORNO

Figura 4.2 – Perfil A2 com carga indutiva trifásica desbalanceada



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.4 – Tensões e correntes do perfil A2.

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	127	0	
Vb	127	0	0
Vc	127	0	
Ia	7.874	0	
Ib	15.970	0	41.51
Ic	3.457	0	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.5 – Impedancia A2 com carga indutiva trifásica desbalanceada

Perfil	Configuração das cargas
A2	11,5 Ω e 30mH, 7 Ω e 10mH, 14 Ω e 90mH

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.6 – Potências do perfil A2

Método usado	potência reativa (KVar)	Erro (%)
IEEE (Q1+)	2.069	-
Q1	2.069	0
CPT	2.069	0
PQ	2.069	0
Yokogawa	2.069	0

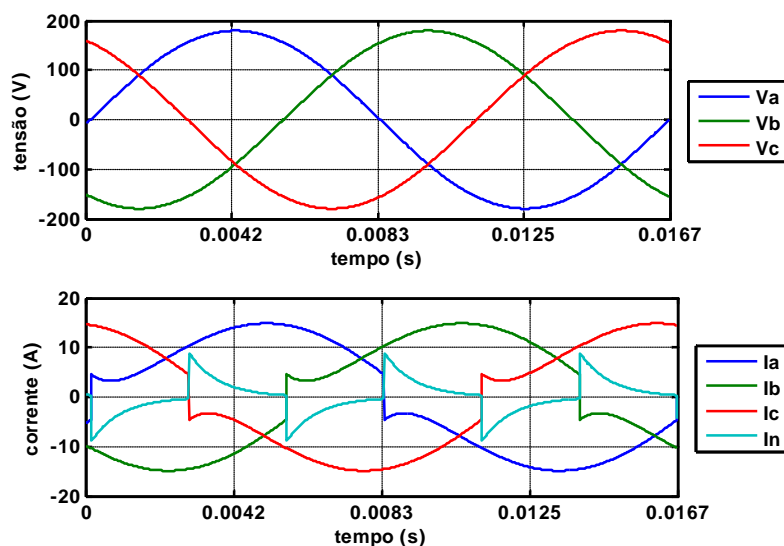
Fonte: Fazio Junior (2011).

O perfil A2 não apresentou diferença nos cálculos, portanto para uma tensão senoidal e equilibrada, um desbalanço na carga não acarreta erro na medição da potência reativa.

4.1.3 (A3) CARGA NÃO LINEAR (3 RETIFICADORES MONOFÁSICOS COM CARGA RL) BALANCEADA)

4.1.3.1 (A3.1) CARGA NÃO LINEAR (THD I 15,66%).

Figura 4.3 – Perfil A3.1 com carga não-linear trifásica balanceada (THD_I 15,66%)



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.7 – Características do perfil A3.1

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	127	0	
Vb	127	0	0
Vc	127	0	
Ia	10,71	15,66	
Ib	10,71	15,66	0
Ic	10,71	15,66	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.8 – Perfil A3.1 com carga não linear trifásica balanceada (THD 15,66%)

Perfil	Configuração das cargas
A3.1	11,5Ω e 10mH

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.9 – potências do Perfil A3.1

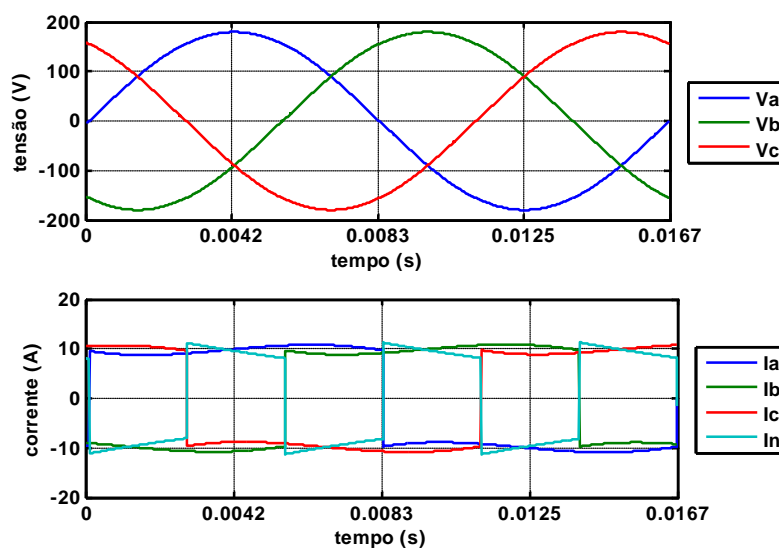
Método usado	Potência reativa (VAr)	Erro (%)
IEEE (Q1+)	776,2	-
Q1	776,2	0
PQ	779,9	0,47
CPT	779,9	0,47
Yokogawa	779,9	0,47

Fonte: Fazio Junior (2011)

Nesta configuração com tensão senoidal e corrente não senoidal começa a aparecer uma pequena divergência nos valores, os métodos definidos para tensão e corrente não lineares apresentam valores iguais entre si e maiores do que aqueles que consideram somente a componente fundamental. Logo, neste caso as não linearidades nas cargas contribuem com uma parcela na potência reativa.

4.1.3.2 (A3.2) CARGA NÃO LINEAR (THD I 47%).

Figura 4.4 – Perfil A3.2 com carga não-linear trifásica balanceada (THD 47%)



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.10 – Tensões e correntes do perfil A3.2

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	127	0	
Vb	127	0	0
Vc	127	0	
Ia	9.88	47	
Ib	9.88	47	0
Ic	9.88	47	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.11 – Perfil A3.2 com Carga não linear Trifásica Balanceada (THD 44,65%)

Perfil	Configuração das Cargas
A3.2	11,5 Ω e 100mH

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.12 – potências do Perfil A3.2

Método usado	potência reativa (VAr)	Erro (%)
IEEE (Q1+)	239,1	-
Q1	255,6	6,89
PQ	246	2,9
CPT	246	2,9
Yokogawa	246	2,9

Fonte: Fazio Junior (2011)

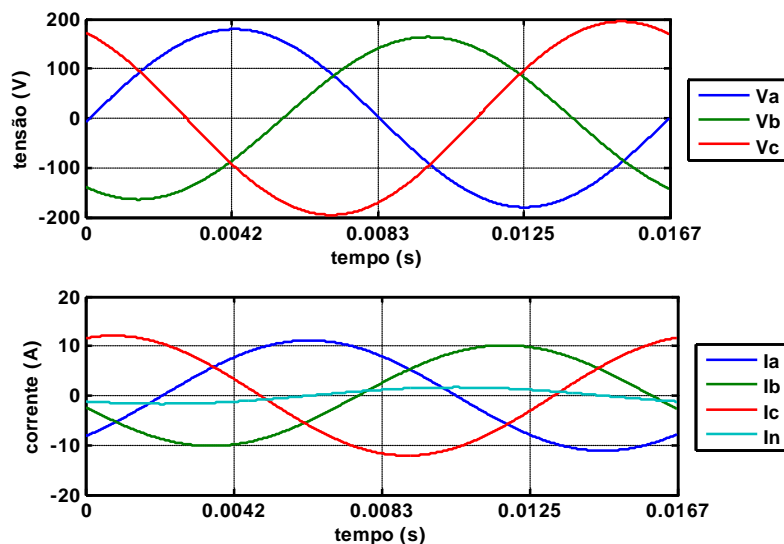
Este perfil confirma o resultado obtido no perfil A3.1, ou seja, um aumento na não linearidade da carga resultou em um maior erro nas medições.

4.2 PERFIL (B): TENSÃO SENOIDAL DESBALANCEADA 5%

Fase A (127.0Vrms 60Hz), Fase B (115.9Vrms 60Hz) e Fase C (138.0Vrms 60Hz)

4.2.1 (B1) CARGA INDUTIVA TRIFÁSICA BALANCEADA COM RETORNO

Figura 4.5 – Perfil B1 Carga Indutiva Trifásica Balanceada



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.13 – Características do Perfil B1

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	127	0	5
Vb	115,9	0	
Vc	138	0	
Ia	7,87	0	5
Ib	7,18	0	
Ic	8,55	0	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.14 – Perfil B1 Carga Indutiva Trifásica Balanceada

Perfil	Configuração das Cargas
B1	11,5Ω e 30mH

Tabela 4.15 – potências do Perfil B1

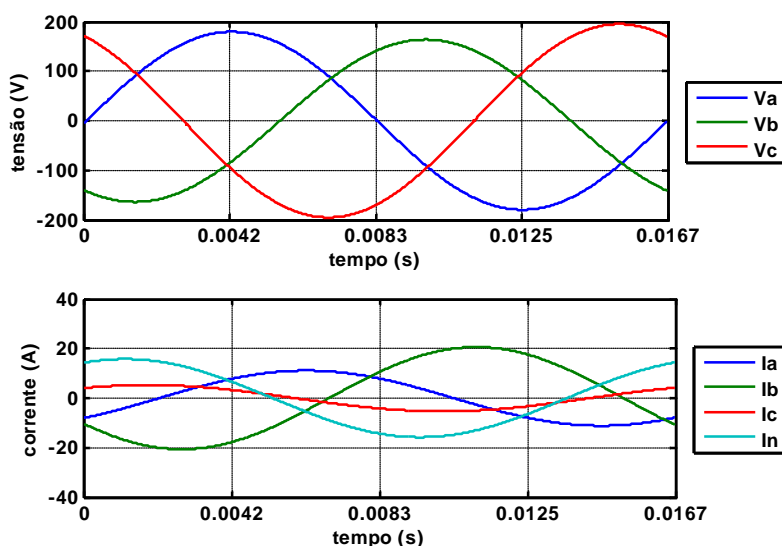
Método usado	potência reativa (KVar)	Erro (%)
IEEE (Q1+)	2,102	-
Q1	2,097	0,256
PQ	2,097	0,252
CPT	2,113	0,505
Yokogawa	2,113	0,505

Fonte: Fazio Junior (2011)

Neste caso com tensão senoidal desbalanceada e carga linear balanceada, houve divergências nos valores calculados. a teoria PQ calculou apenas a potência reativa fundamental pois não há distorção e apresentou o mesmo resultado que QI . Observa-se também, que o método CPT apresentou o mesmo valor calculado pelo equacionamento do Yokogawa. Este perfil evidencia que um desbalanço na tensão influencia os erros de medição.

4.2.2 (B2) CARGA INDUTIVA TRIFÁSICA DESBALANCEADA COM RETORNO

Figura 4.6 – Perfil B2 com Carga Indutiva Trifásica Desbalanceada



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.16 – Características do Perfil B2

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	127	0	5
Vb	115,9	0	
Vc	138	0	
Ia	7,87	0	37,9
Ib	14,58	0	
Ic	3,75	0	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.17 – Perfil B2 Carga Indutiva Trifásica Desbalanceada

Perfil	Configuração das Cargas
B2	11,5 Ω e 30mH 7 Ω e 10mH 14 Ω e 90mH

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.18 – potências do Perfil B2

Método usado	potência reativa (KVar)	Erro (%)
IEEE (Q1+)	2,019	-
Q1	2,029	0,457
PQ	2,029	0,469
CPT	1,981	1,882
Yokogawa	1,981	1,882

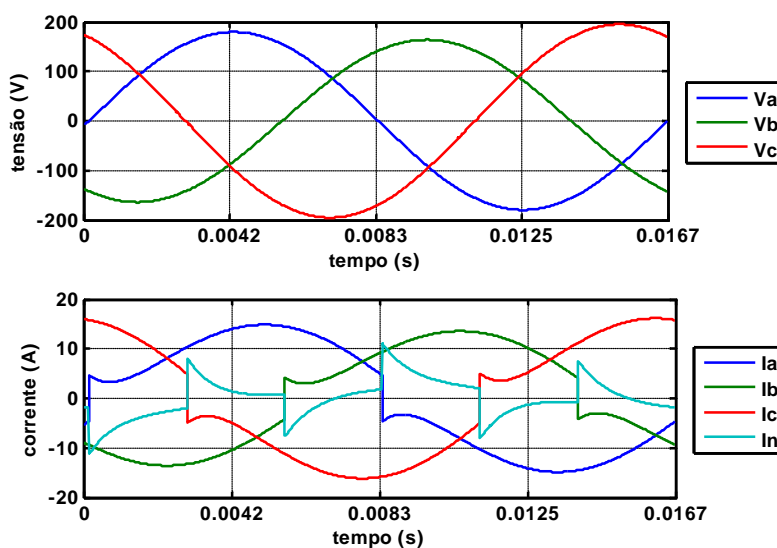
Fonte: Fazio Junior (2011)

Neste caso o erro apresentado foi maior em relação ao perfil anterior, ou seja, um desbalanço na carga adiciona mais erros em um sistema com tensão desbalanceada.

4.2.3 (B3) CARGA NÃO LINEAR (3 RETIFICADORES MONOFÁSICOS CARGA RL BALANCEADA).

4.2.3.1 (B3.1) CARGA NÃO LINEAR (THD 15,6%).

Figura 4.7 – Perfil B3.1 com Carga Não Linear Trifásica Balanceada (THD 15,6%)



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.19 – Características do Perfil B3.1

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	127	0	
Vb	115,9	0	5
Vc	138	0	
Ia	10,71	15,65	
Ib	9,77	15,66	5
Ic	11,63	15,62	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.20 – Perfil B3.1 Carga Não Linear Trifásica Balanceada (THD 15,6%)

Perfil	Configuração das Cargas
B3.1	11,5 Ω e 10mH

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.21 – potências do Perfil B3.1

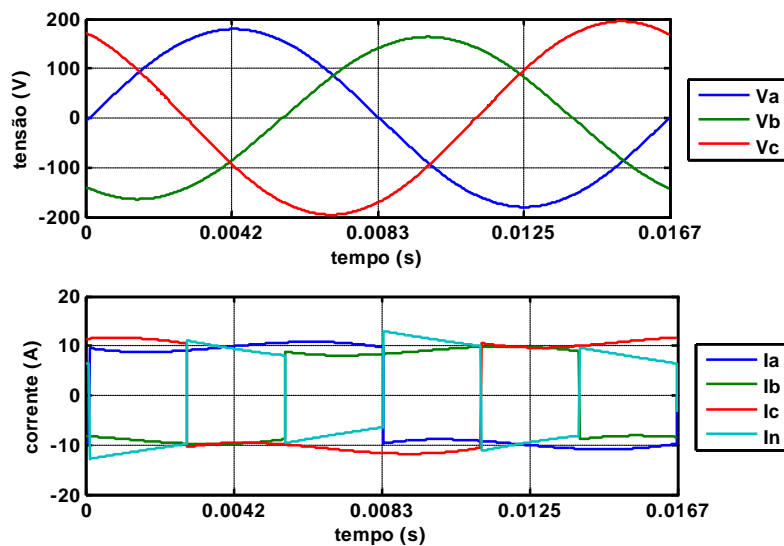
Método usado	potência reativa (VAr)	Erro (%)
IEEE (Q1+)	775,9	-
Q1	773,8	0,267
PQ	777,5	0,213
CPT	783,5	0,982
Yokogawa	783,5	0,982

Fonte: Fazio Junior (2011)

O erro no perfil B3.1 cresceu em relação ao B1 para as metodologia CPT e o cálculo do analisador de energia, pois agora há componentes não senoidais. No entanto o erro de Q1 e PQ manteve-se constante.

4.2.3.2 (B3.2) CARGA NÃO LINEAR (THD 47%).

Figura 4.8 – Perfil B3.2 com Carga Não Linear Trifásica Balanceada (THD 47%)



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.22 – Características do Perfil B3.2

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	127	0	5
Vb	115,9	0	
Vc	138	0	
Ia	9,87	46,9	5,1
Ib	9,0	47,2	
Ic	10,72	46,8	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.23 – Perfil B3.2 Carga Não Linear Trifásica Balanceada (THD 47%)

Perfil	Configuração das Cargas
B3.2	11,5Ω e 100mH

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.24 – potências do Perfil B3.2

Método usado	potência reativa (VAr)	Erro (%)
IEEE (Q1+)	239	-
Q1	254,9	6,645
PQ	245,3	2,644
CPT	247,2	3,425
Yokogawa	247,2	3,425

Fonte: Fazio Junior (2011)

Este perfil apresentou os maiores erros em relação aos perfis anteriores pois, o IEEE apenas leva em consideração a componente fundamental de sequência positiva.

4.3 PERFIL (C): TENSÃO NÃO SENOIDAL (THD 12,25%) E BALANCEADA.

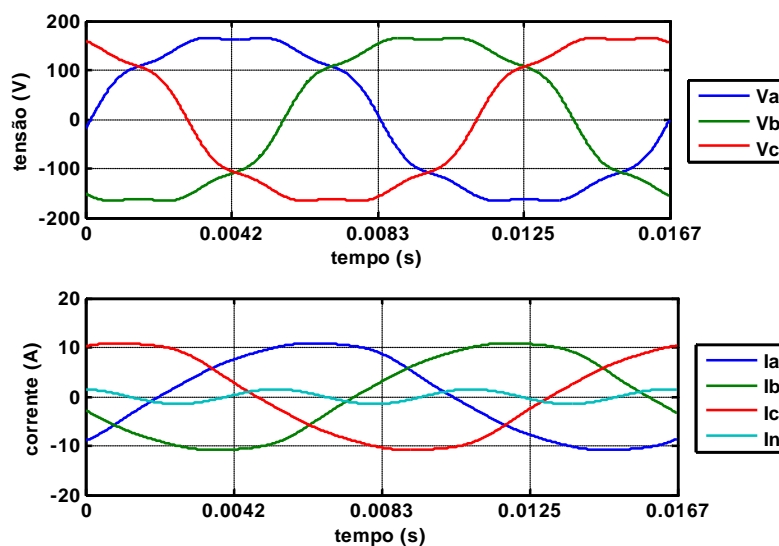
Fase A (127V@60Hz, 12,7V@180Hz, 6,35V@300Hz, 6,35V@420Hz)

Fase B (127V@60Hz, 12,7V@180Hz, 6,35V@300Hz, 6,35V@420Hz)

Fase C (127V@60Hz, 12,7V@180Hz, 6,35V@300Hz, 6,35V@420Hz)

4.3.1 (C1) CARGA INDUTIVA TRIFÁSICA BALANCEADA COM RETORNO

Figura 4.9 – Perfil C1 com Carga Linear Trifásica Balanceada



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.25 – Características do Perfil C1

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	127,9	12,25	
Vb	127,9	12,25	0
Vc	127,9	12,25	
Ia	7,88	4,82	
Ib	7,88	4,82	0
Ic	7,88	4,82	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.26 – Perfil C1 com Carga Linear Trifásica Balanceada

Perfil	Configuração das Cargas
C1	11,5 Ω e 30mH

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.27 – potências do Perfil C1

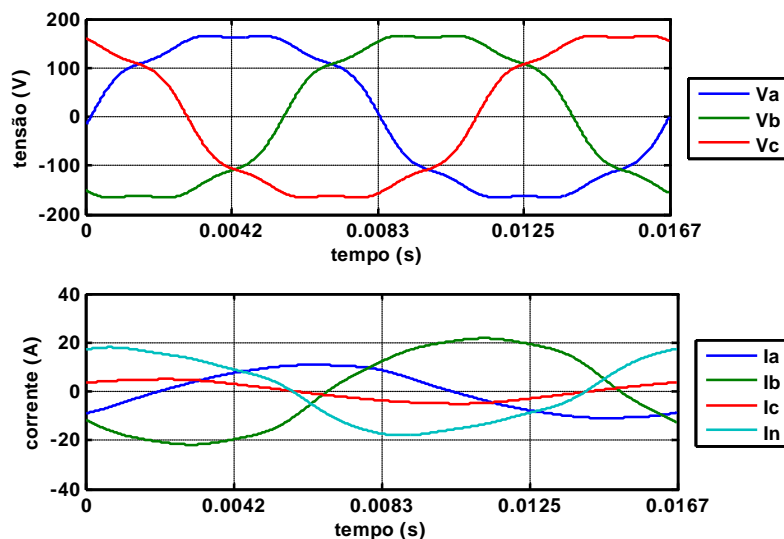
Método usado	potência reativa (KVAr)	Erro (%)
IEEE (Q1+)	2103	-
Q1	2103	0
PQ	2103	0
CPT	2108	0,232
Yokogawa	2120	0,777

Fonte: Fazio Junior (2011)

O perfil C1 foi o primeiro até o momento onde os valores entre CPT e Yokogawa divergiram. Como a tensão é distorcida, esta diferença se deve à presença de componentes harmônicas na tensão, e que parece não ter influenciado no cálculo da potência PQ e Q1.

4.3.2 (C2) CARGA INDUTIVA TRIFÁSICA DESBALANCEADA CONEXÃO Y

Figura 4.10 – Perfil C2 com Carga Linear Trifásica Desbalanceada



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.28 – Características do Perfil C2

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	127,9	12,2	
Vb	127,9	12,2	0,0
Vc	127,9	12,2	
Ia	7,88	4,8	
Ib	16,01	6,5	41,5
Ic	3,46	3,8	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.29 – Perfil C2 com Carga Linear Trifásica Desbalanceada

Perfil	Configuração das Cargas
C2	11,5Ω e 30mH 7Ω e 10mH 14Ω e 90mH

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.30 – potências do Perfil C2

Método usado	potência reativa (KVar)	Erro (%)
IEEE (Q1+)	2,069	-
Q1	2,070	0,011
PQ	2,068	0,034
CPT	2,075	0,300
Yokogawa	2,090	1,017

Fonte: Fazio Junior (2011)

Neste caso o erro apresentado foi maior em relação ao perfil anterior, ou seja, um desbalanço na carga adiciona mais erros em um sistema com tensão balanceada e distorcida. O desbalanço da carga influencia nas médias de PQ e Q1 para este tipo de tensão.

4.4 PERFIL (D): TENSÃO NÃO SENOIDAL (THD 12,25%) E DESBALANCEADA (5%).

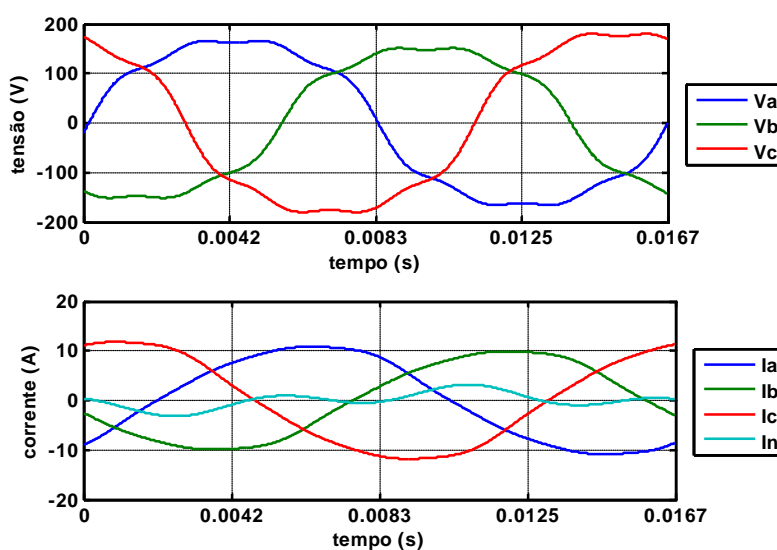
Fase A (127v@60Hz, 12,7v@180Hz, 6,35V@300Hz, 6,35V@420Hz)

Fase B (115,9v@60Hz 11,59v@180Hz, 5,79V@300Hz, 5,79V@420Hz)

Fase C (138v@60Hz, 13,8v@180Hz, 6,9V@300Hz, 6,9V@420Hz)

4.4.1 (D1) CARGA INDUTIVA TRIFÁSICA BALANCEADA COM RETORNO

Figura 4.11 – Perfil D1 com Carga Linear Trifásica Balanceada



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.31 – Características do Perfil D1

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	127,9	12,25	
Vb	116,8	12,25	5
Vc	139	12,25	
Ia	7,88	4,82	
Ib	7,19	4,82	5
Ic	8,56	4,82	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.32 – Perfil D1 com Carga Linear Trifásica Balanceada

Perfil	Configuração das Cargas
D1	11,5 Ω e 30mH

Fonte: Fazio Junior (2011)

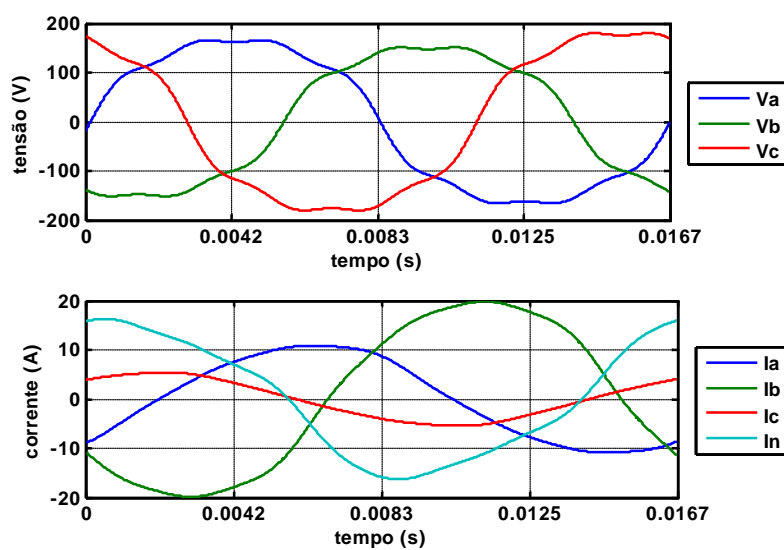
Tabela 4.33 – potências do Perfil D1

Método usado	potência reativa (KVar)	Erro (%)
IEEE (Q1+)	2102	-
Q1	2097	0,256
PQ	2097	0,279
CPT	2118	0,738
Yokogawa	2129	1,286

Fonte: Fazio Junior (2011)

4.4.2 (D2) CARGA INDUTIVA TRIFÁSICA DESBALANCEADA CONEXÃO Y

Figura 4.12 – Perfil D2 com Carga Linear Trifásica Desbalanceada



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.34 – Características do Perfil D2

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	127,9	12,25	5
Vb	116,8	12,25	
Vc	139	12,25	
Ia	7,88	4,82	37,9
Ib	14,61	6,46	
Ic	3,76	3,82	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.35 – Perfil D2 com Carga Linear Trifásica Desbalanceada

Perfil	Configuração das Cargas
D2	11,5 Ω e 30mH 7 Ω e 10mH 14 Ω e 90mH

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 4.36 – potências do Perfil D2

Método usado	potência reativa (KVar)	Erro (%)
IEEE (Q1+)	2,019	-
Q1	2,029	0,457
PQ	2,028	0,441
CPT	1,987	1,601
Yokogawa	2,000	0,936

Fonte: Fazio Junior (2011)

Este último perfil apresentou um erro maior do que o perfil C2, com exceção do Yokogawa, mostrando mais uma vez que o desequilíbrio de tensão provoca um erro nas medições de potência reativa.

4.5 CONCLUSÃO

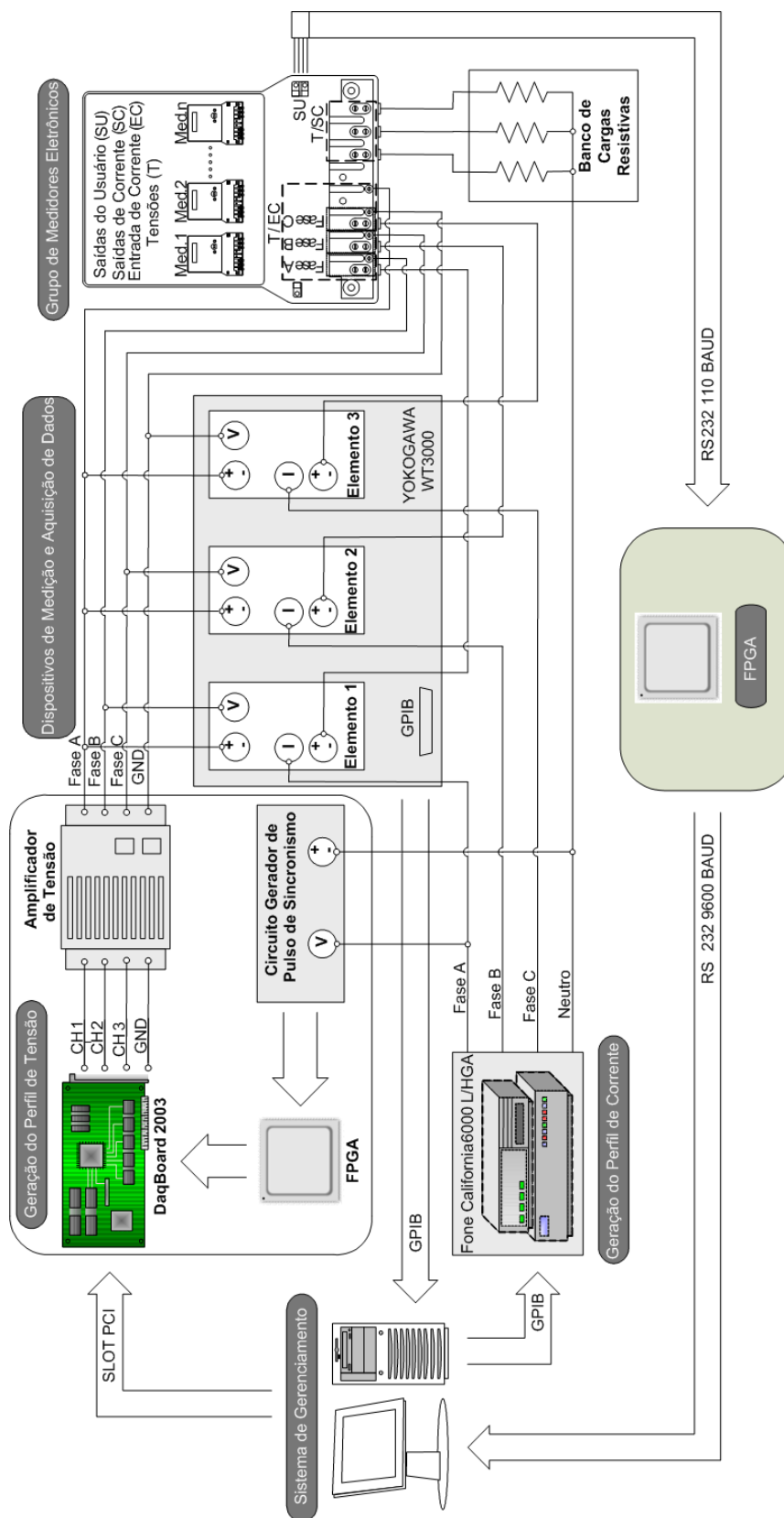
As simulações permitiram investigar e analisar como as teorias se comportam com relação às tensões não senoidais e/ou desequilibradas, além de situações cujas cargas não são lineares. É interessante observar que os erros aparecem pela primeira vez, quando a tensão é puramente senoidal e balanceada, alimentando cargas não lineares e balanceadas, sendo que o erro tende a crescer à medida que a distorção de corrente aumenta. O erro começa a surgir também para tensões desequilibradas, mesmo as cargas sendo lineares. Portanto os erros estão relacionados principalmente com desequilíbrios e distorções na tensão, como também nas não linearidades das cargas. Um ponto a destacar, é que as potências calculadas pela teoria CPT e pelo Método do Yokogawa são iguais quando as tensões são senoidais balanceadas ou desbalanceadas, elas divergem apenas quando as tensões são distorcidas.

5 ARRANJO LABORATORIAL UTILIZADO

Este trabalho utilizou para a comparação experimental os dados obtidos pelo projeto de pesquisa e desenvolvimento, realizado pela equipe do Laboratório de Eletrônica de Potência da FEIS-UNESP, ou seja, a análise dos erros de medição de equipamentos eletrônicos de VARh sujeitos a distorções harmônicas de tensões e correntes distintas (com amplitudes e conteúdos harmônicos distintos).

O experimento é composto basicamente por um gerador de perfis de tensão e corrente onde são aplicados em medidores de energia comerciais e no Yokogawa WT3000. Um dispositivo FPGA faz o trabalho de sincronismo entre os perfis de tensão e corrente aplicados aos medidores, e também faz as aquisições simultaneamente das medições de todos os medidores, através da saída do usuário de cada medidor, e as envia a um microcomputador para armazenamento no banco de dados. A Figura 5.1 apresenta um diagrama geral de blocos do experimento para a realização dos ensaios, conforme metodologia proposta para o projeto de pesquisa, a Figura 5.2 mostra uma foto feita de todo o conjunto. Cada dispositivo será detalhado quanto ao seu funcionamento nos próximos capítulos.

Figura 5.1 – Diagrama geral de blocos do experimento proposto para ensaios dos medidores eletrônicos de energia elétrica.



Fonte: Fazio Junior (2011)

Figura 5.2 – Fotografia do sistema de medição e monitoramento para medidores eletrônicos de energia elétrica



Fonte: Fazio Junior (2011)

5.1 MONTAGEM EXPERIMENTAL DE MEDIDORES

5.1.1 GERAÇÃO DOS PERFIZ DE TENSÃO

A geração de sinais analógicos de tensão é feita por uma placa com conexão PCI (DaqBoard 2003 marca IOtech) integrada a um microcomputador, esta placa é configurada pelo aplicativo desenvolvido, que envia as formas de onda trifásicas em forma de tabela de dados, para então serem gravados na memória da placa.

Com as formas de onda armazenadas na placa geradora de sinais analógicos, um dispositivo FPGA controla os conversores D/A presentes na DaqBoard 2003 a uma taxa de conversão de 48KHz e o sincronismo das formas de onda de tensão, tomando-se como referência a fase A das formas de onda da corrente geradas pela fonte trifásica 6000L.

Figura 5.3: (a) Placa de geração de sinais com quatro canais controlada através de conexão PCI internamente ao PC e (b) apresenta o amplificador de tensão



Fonte: Fazio Junior (2011)

A Figura 5.3 (a) apresenta a placa DaqBoard 2003 e a Figura 5.3 (b) apresenta um amplificador de tensão utilizado para elevar os sinais de tensão com valores de pico máximos de 10V para tensões com valores eficazes na ordem de 127V ou 220V compatível com as bobinas de tensão dos medidores, podendo reproduzir formas de onda com componentes de até 5kHz.

5.1.2 GERAÇÃO DOS PERFIS DE CORRENTE

A metodologia empregada consiste em aplicar uma forma de onda de tensão pré-determinada a uma carga resistiva e injetar a corrente resultante nas bobinas de corrente dos medidores sob ensaio. Desta maneira, consegue-se impor um perfil de forma de onda de corrente para o medidor ensaiado através da imposição de uma forma de onda de tensão controlada.

Para a geração dos perfis de corrente que submeterão os medidores aos ensaios experimentais, utilizou-se uma fonte de alimentação trifásica modelo 6000L acoplada a um dispositivo gerador e analisador de formas de onda HGA (*Harmonic Generator/Analyser*), ambos fabricados pela *Califórnia Instruments*, Figura 5.4, e um banco de carga resistiva trifásica configurada em estrela.

O dispositivo HGA é o controlador da fonte trifásica com capacidade para armazenar formas de onda pré-programadas via microcomputador, que processa as informações de amplitude, ângulo de defasagem e ordem harmônica de cada uma das três fases, transformando-as em uma tabela de pontos, que posteriormente são enviados e armazenados na memória do HGA. O conjunto de equipamentos HGA/Fonte pode

reproduzir formas de onda que contemplem componentes harmônicas até a quinquagésima ordem.

A configuração do perfil de tensão é efetuada por meio aplicativo de gerenciamento, onde são inseridos os dados contendo todos os valores de amplitude e defasagem angular das componentes harmônicas através de tabelas.

Figura 5.4: Fonte trifásica 6000L e HGA (California Instruments)



Fonte: Fazio Junior (2011)

5.2 SISTEMA DE SINCRONISMO ENTRE TENSÃO E CORRENTE

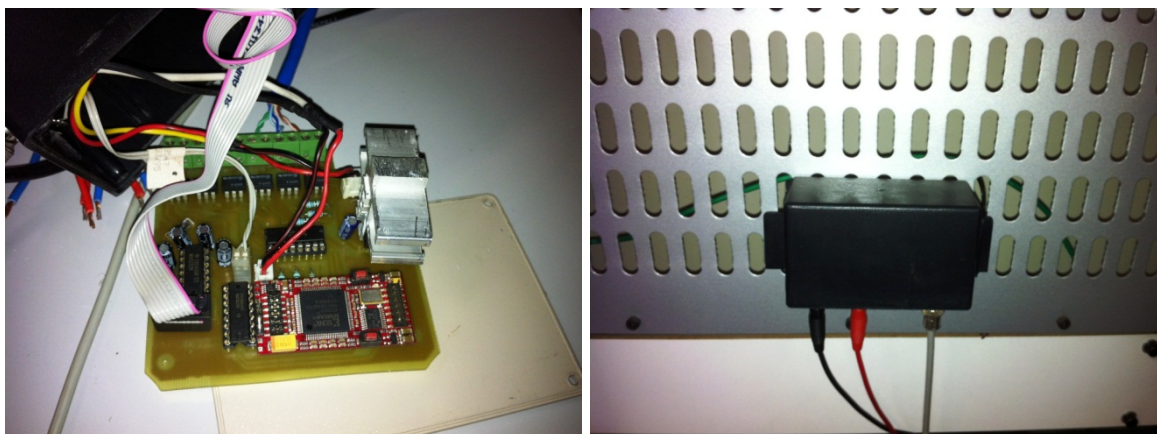
As formas de onda de tensão e corrente, apesar de serem impostas aos medidores sob ensaio por fontes independentes (Amplificador e fonte California Instruments), devem manter adequada defasagem angular, em conformidade com os perfis adotados para ensaios.

Neste contexto, utilizou-se um detector de cruzamento por zero para monitorar uma das fases da tensão de saída da fonte California (responsável pelas correntes com distorções harmônicas pré-selecionadas) para estabelecer o sincronismo entre as correntes e as tensões obtidas pela placa geradora de sinais (Placa DaqBoard/2003), responsável pela geração de tensões que contemplem as distorções harmônicas pré-selecionadas.

Considerando-se que o sincronismo entre os sinais de corrente e de tensão deve ser estável e ainda que os atrasos gerados pelo detector de cruzamento por zero devem ser compensados, impondo um adequado ângulo de fase pré-determinado entre os sinais de tensão e corrente, tornou-se necessário o desenvolvimento de uma lógica de controle, implementada em um dispositivo lógico programável do tipo FPGA (Field Programmable

Gate Array Device), para gerenciar e impor a fase entre as tais grandezas. A Figura 5.5 apresenta fotos dos circuitos de sincronismo implementados.

Figura 5.5 – Circuitos de sincronismo e comunicação implementados, (a) FPGA Xilinx, (b) Sincronismo via detecção de passagem por zero.



Fonte: Fazio Junior (2011)

5.2.1 MEDIÇÃO E AQUISIÇÃO DOS DADOS

Para a medição das formas de onda de tensão e corrente, assim como para o cálculo das potências ativa, reativa e aparente que circulam pelos medidores eletrônicos de energia elétrica sob ensaio, foi utilizado o analisador de potência WT3000 (Yokogawa) mostrado na Figura 5.6, denominado como medidor padrão para estes ensaios.

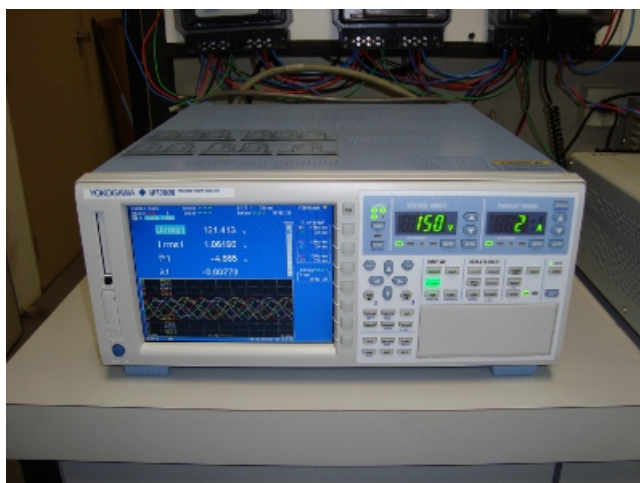
A precisão na medição efetuada pelo analisador de potência WT3000 está apresentada na Tabela 5.1, sendo que para os cálculos de tensão e corrente, o equipamento utiliza as equações integrais das definições teóricas para valores médios e eficazes. Para o cálculo das potências são utilizadas equações que se encontram em conformidade com a norma IEC para compatibilidade de componentes harmônicas IEC61000-3-2 e IEC61000-3-4, utilizando uma taxa de aquisição de 200.000 pontos por segundo.

Tabela 5.1: Precisão do analisador de potência WT3000

Corrente	0.05%
Tensão	0.05%
potência	0.10%

Fonte: Manual do Yokogawa.

Figura 5.6: Analisador de energia WT3000



Fonte: Fazio Junior (2011)

A transferência dos dados coletados pelo medidor padrão é feita através de comunicação GPIB realizada entre o WT3000 e um microcomputador contendo o aplicativo desenvolvido.

5.2.2 MEDIDORES SOB ENSAIO

Para este experimento uma quantidade de até seis medidores podem ser ensaiadas de uma única vez, avaliando suas respostas para as mesmas formas de onda de tensão e corrente. A Figura 5.7 apresenta uma amostra de medidores utilizados como teste nos ensaios de preparação e calibração dos equipamentos envolvidos.

Figura 5.7: Medidores sob ensaio



Fonte: Fazio Junior (2011)

Para a coleta dos valores de energia obtidos pelos medidores é utilizado um FPGA que coleta os valores simultaneamente de todos os medidores via saída do usuário,

(presente nos medidores), e as envia através da porta serial do microcomputador por meio de comunicação RS232.

5.3 MEDIÇÃO DAS ENERGIAS REGISTRADAS NOS MEDIDORES ELETRÔNICOS

A leitura dos medidores eletrônicos de energia elétrica é realizada pela saída do usuário, uma conexão mono-direcional prevista inicialmente pelo item 4.2 da resolução DNAEE 044 de 15 de março de 1988 e seu protocolo de comunicação pode ser encontrado na norma NBR14522.

São inúmeras as vantagens em monitorar os dados através da saída do usuário, uma vez que esta conexão é padrão e obrigatória por norma para todos os medidores eletrônicos trifásicos, deve ser feita através de acoplador ótico, garantindo isolação elétrica entre os sistemas e os dados disponibilizados são reproduzidos a partir dos registros tarifários internos do medidor, garantindo a confiabilidade dos valores monitorados.

Além disso, este tipo de monitoramento proporciona a coleta automática dos tempos, potência ativa e potência reativa de vários medidores simultaneamente, uma vez que tais dados podem adquiridos pelo FPGA para então serem enviados para um aplicativo de gerenciamento instalado em microcomputador.

5.3.1 SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS E DETERMINAÇÃO DE CONSUMO

Em função do set estabelecido para ensaios e da necessidade de redução de erros na aquisição dos sinais de leitura dos instrumentos de medição e sob teste, houve a necessidade do desenvolvimento de um automatismo, de tal forma que, eletronicamente, os dados pudessem ser computados, processados e armazenados, para posterior análise, evitando-se erros grosseiros de medição.

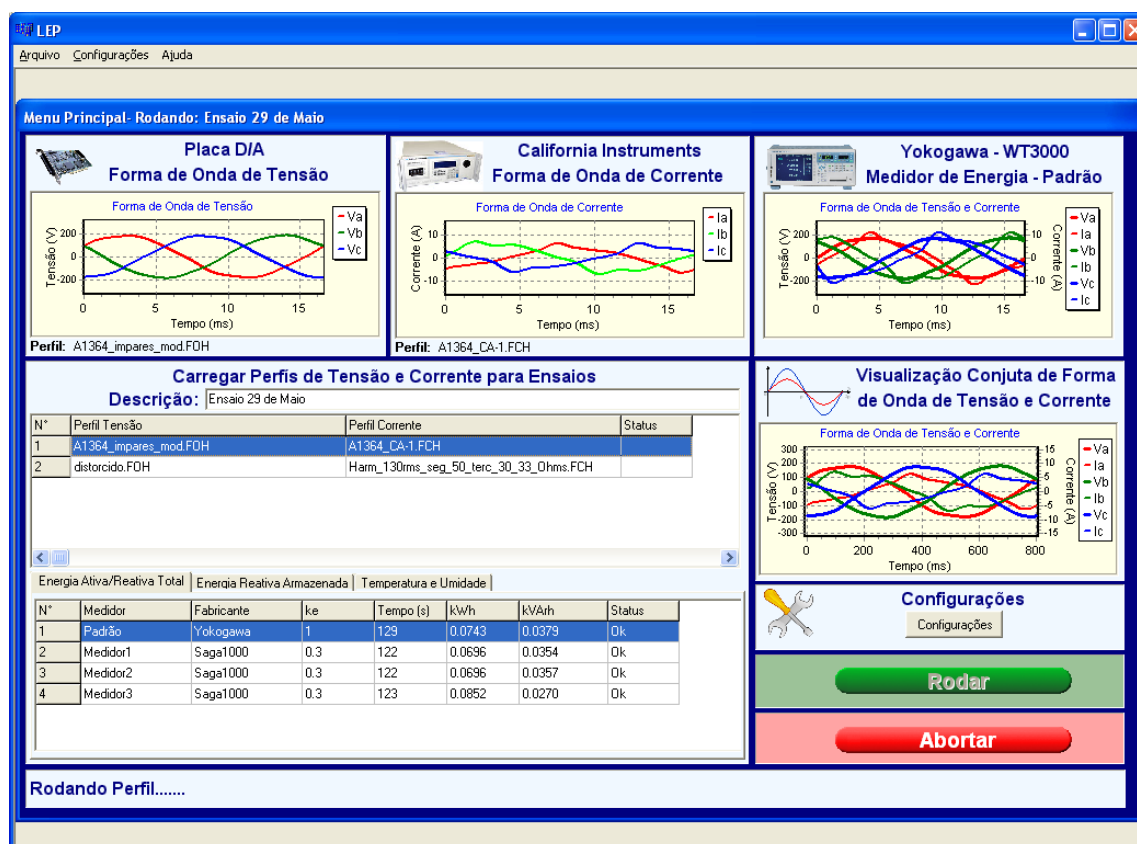
Assim, o sistema empregado é composto por um microcomputador do tipo PC executando aplicativos desenvolvidos por linguagem C++ Builder, uma placa de comunicação do tipo GPIB, um FPGA capaz de gerenciar os dados de seis medidores simultaneamente e um equipamento de medição de potência trifásica modelo WT3000 de marca Yokogawa que fornece intensidades padrão dos dados aferidos (potência ativa, potência reativa, potência aparente, correntes e tensões eficazes em cada fase, consumo ativo total em watt-hora e consumo reativo total em volt-ampere-hora) e será denominado a partir daqui como medidor padrão.

Para o aplicativo desenvolvido para gerenciamento dos ensaios laboratoriais, foi utilizada a linguagem de programação C++ Builder 6.0 (Borland®). Esta opção teve como principais motivos a robustez e o acervo de bibliotecas de comunicação, dando suporte aos instrumentos utilizados no ensaio.

Os instrumentos utilizados no ensaio possuem comunicação GPIB, e para o interfaceamento da comunicação com o aplicativo desenvolvido utilizou-se tanto o cabo GPIB/USB quanto as bibliotecas da National Instruments, respeitando o protocolo de comunicação de cada instrumento. Para a placa de geração de sinais D/A, utilizou-se as bibliotecas da própria fabricante, IOtech.

O aplicativo desenvolvido tem a capacidade de gerenciar e analisar todos os equipamentos de instrumentação conectados com o microcomputador. Desta forma, a tela principal do aplicativo de gerenciamento apresenta todo o conteúdo necessário para realizar os ensaios dos medidores eletrônicos de energia elétrica, conforme ilustrado na Fonte: Fazio Junior (2011).

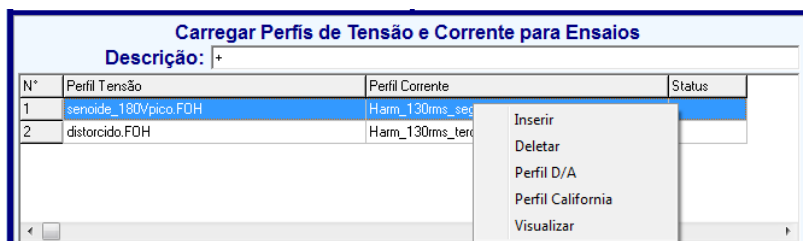
Figura 5.8 – Aplicativo de gerenciamento.



Fonte: Fazio Junior (2011)

Para iniciar um novo ensaio devem ser inseridos os perfis de tensão e os perfis de corrente que serão enviados, respectivamente, para a placa D/A e para a Califórnia Instruments. A Figura 5.9 detalha a operação.

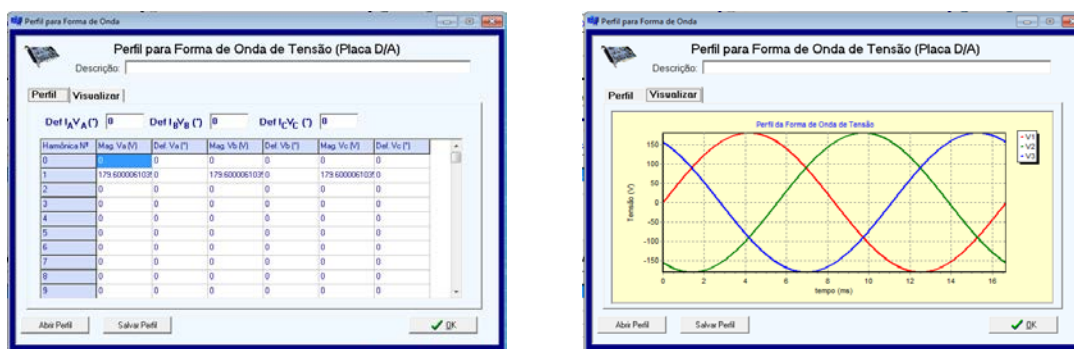
Figura 5.9 – Manipulação dos Perfis de Tensão e Corrente para Ensaios.



Fonte: Fazio Junior (2011)

Ao clicar em Perfil D/A é apresentada uma tabela para o preenchimento da magnitude e da fase, da fundamental até a 50ª ordem que compõem as tensões A, B e C. Na aba “Visualizar” pode-se verificar as formas de onda de tensão programadas anteriormente na aba “Perfil”. A Figura 5.10 ilustra a tela para a criação/visualização de perfil de tensão.

Figura 5.10 – Tela para criação/visualização de Perfil de Tensão.



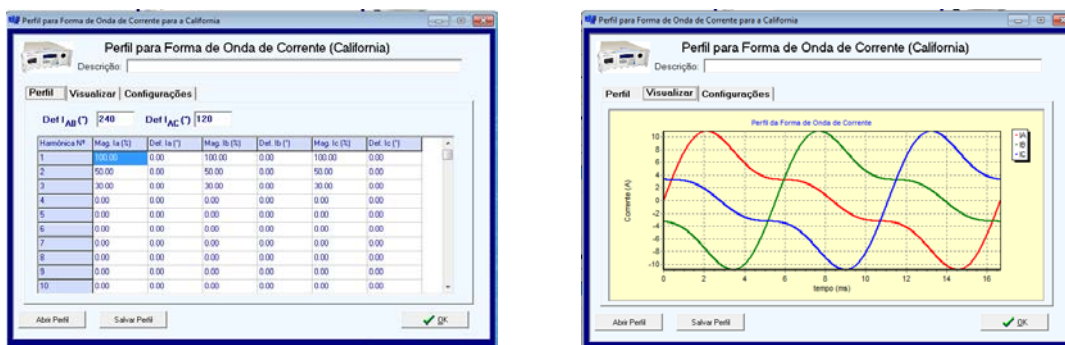
(a) Criação de Perfil.

(b) Visualização de Perfil.

Fonte: Fazio Junior (2011)

Ao clicar em Perfil Califórnia é apresentada uma tabela para o preenchimento da magnitude e da fase da fundamental até a 50ª ordem que compõem as correntes A, B e C. Na aba “Visualizar” pode-se verificar as formas de onda de corrente programadas na aba “Perfil” e na aba “Configurações” deve-se configurar o nível de tensão que será solicitada para a fonte da Califórnia a fim de se produzir o nível de corrente necessário, conforme resistência informada/conectada ao sistema. A Figura 5.11 ilustra a tela para a criação/visualização de perfil de corrente.

Figura 5.11 – Tela para criação/visualização de Perfil de Corrente.



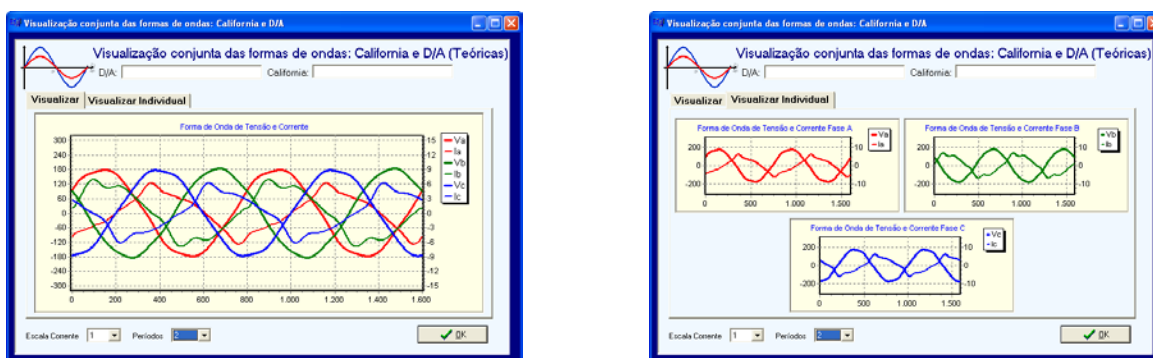
(a) Criação de Perfil.

(b) Visualização de Perfil.

Fonte: Fazio Junior (2011)

O aplicativo possibilita a visualização conjunta dos perfis de tensão e corrente sem a necessidade de rodar o ensaio, desta forma, é possível verificar se o perfil inserido no sistema está dentro dos moldes desejados para avaliação, para isso, basta clicar em visualizar no menu exibido na Figura 5.9

Figura 5.12 – Visualização de Perfis de Tensão e Corrente- Pré-Ensaio.



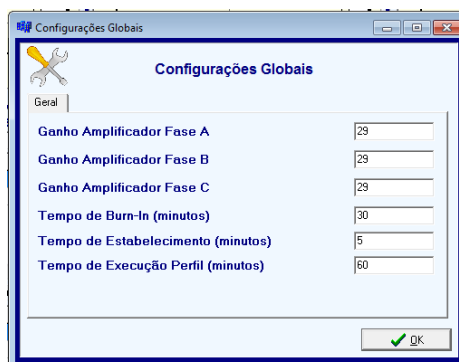
(a) Visualização Geral.

(b) Visualização por Fase.

Fonte: Fazio Junior (2011)

Ao iniciar o processo de ensaio, o aplicativo realizará o Burn-In e em seguida entrará no processo de ensaio dos medidores, e na troca de perfil, ele utilizará o tempo de estabelecimento, uma vez que os medidores e as cargas já estão nas conformidades estabelecidas pelas normas. A Figura 5.13 ilustra a janela de configurações.

Figura 5.13 – Configurações do Sistema.



Fonte: Fazio Junior (2011)

Para iniciar os ensaios dos medidores deve-se clicar no botão “Rodar”. O aplicativo pedirá para informar o nome do ensaio. Esse nome deve referir de forma adequada ao ensaio realizado, e.g. referenciar o nome dos medidores avaliados, a data do ensaio, utilizar mecanismos facilitadores para uma identificação a posteriori do ensaio. Após essa especificação, será verificado se todos os dados necessários para o ensaio foram informados adequadamente, se houve gravação de linhas em branco nas tabelas e se os instrumentos (gerador de sinais de tensão, fonte trifásica e medidor padrão) estão conectados com o sistema.

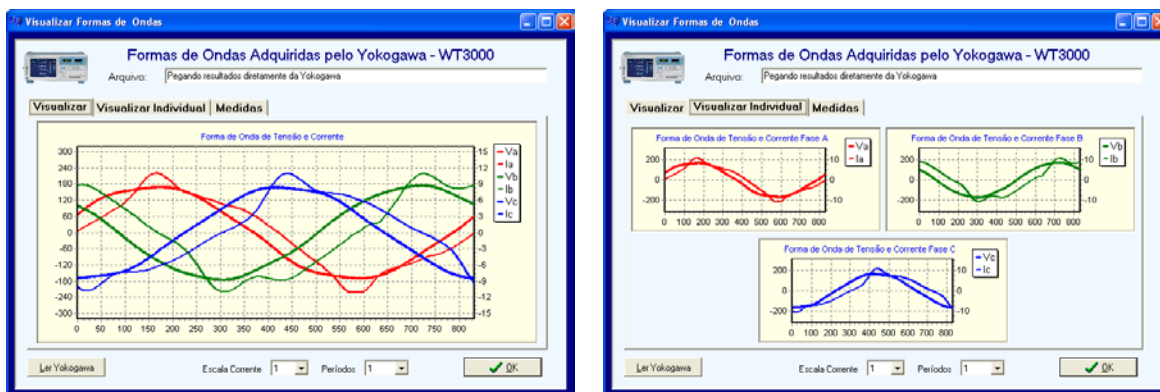
Estando todos os medidores conectados corretamente, transfere-se a tabela de dados referentes às formas de onda de corrente para a fonte trifásica e transfere-se a tabela de dados referentes às formas de onda de tensão para a placa geradora dos sinais de tensão e envia-se um sinal de sincronismo para o FPGA, informando que a sincronização entre as tensões e correntes pode ser iniciada. Na sequência, inicia-se o processo de *Burn-In*, uma etapa com a duração de 30 minutos, conforme recomendações normativas. Passado o tempo de *Burn-In*, inicia-se o ensaio dos medidores, informando ao medidor padrão que inicie a integração da energia e inicia-se a coleta de todos os dados de interesse do sistema, o que inclui o medidor padrão e os medidores eletrônicos de energia elétrica.

Alguns espaços da janela principal apresentam informações apenas durante o ensaio. Para exemplificar, destaca-se que o quadro de apresentação das formas de onda de tensão e de corrente mostra informações assim que os perfis de tensão e de corrente são enviados para os instrumentos, indicando que tais formas de ondas foram gravadas na memória de cada equipamento.

O medidor padrão inicia a integração da Energia ativa e reativa após o processo de *Burn-In*, assim, o acesso às informações desse equipamento somente estarão disponíveis após essa etapa. Além da gama de dados pertinentes ao projeto, o medidor padrão

possibilita a captura das formas de ondas de tensão e de corrente processadas pelos medidores, e todas essas informações são apresentadas em telas separadas do aplicativo conforme ilustra a Figura 5.14

Figura 5.14 – Leitura de Formas de Onda de Tensão e Correntes e de energia das Fases A, B e C providas pelo medidor padrão.



(a) Visualização conjunta.

(b) Visualização Individual.



(c) Principais medidas de energia do ensaio.

Fonte: Fazio Junior (2011)

Ao pressionar o botão “Rodar”, abre-se uma janela para a escolha de um nome para o ensaio e então uma pasta é criada com o nome informado. Nessa pasta são gerados vários arquivos contendo as informações de interesse organizadas de acordo com a extensão de cada arquivo. São essas informações, os perfis de tensão e corrente, as configurações do sistema, as formas de ondas de tensão e corrente e as medições adquiridas pelo medidor padrão, as medições ponto a ponto de Energia reativa e as medições acumuladas de Energia ativa/reativa de cada perfil ensaiado. Os arquivos são gerados no formato “texto puro”, de forma a permitir que os dados sejam importados em

qualquer programa de computador, e.g. planilha de dados, processadores de textos e banco de dados.

Durante o processo de ensaio, o sistema informa ao usuário os eventos que estão ocorrendo no sistema, como a transferência de dados para configuração dos equipamentos, a leitura dos medidores, a realização do *Burn-In*, além de outros eventos, o que é feito com a utilização de uma barra de Status disposta na parte inferior da tela principal.

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

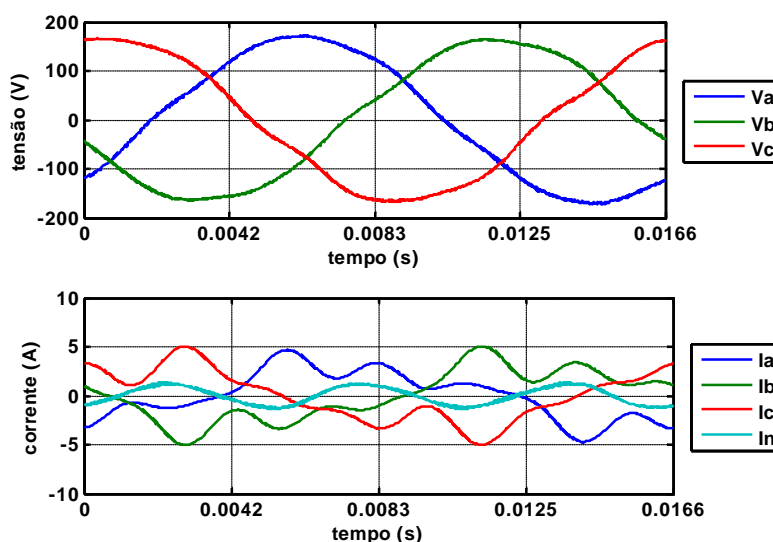
Os perfis de tensão e corrente apresentados neste capítulo, foram programados e inseridos no “set experimental” de medidores como descrito no capítulo anterior. A apresentação dos resultados segue aproximadamente o padrão feito no capítulo Resultados de Simulações, sendo que a tabela dos resultados das energias calculadas será acrescida de duas linhas sendo uma referente ao Yokogawa e outra sendo o valor médio de três amostras de medidores. Desta forma busca-se identificar os fenômenos que causam divergências no resultado das metodologias apresentadas, nos medidores sob ensaio e no Yokogawa WT3000. O banco de dados produzido pelo ensaio experimental foi processado pela ferramenta de simulação mostrado no Anexo II, para obter os resultados medidos pelas teorias de potências elétricas.

6.1 PERFIL COM TENSÃO E CORRENTE ORIGINAL

Os perfis a seguir não sofreram modificações e estão da forma que foram adquiridos pela aquisição em campo.

6.1.1 PERFIL 1 THDV(3,6%) THDI(43,5%)

Figura 6.1 – Perfil 1 THDV(3,6%) e THDI(43,5%)



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 6.1 – Características do Perfil 1

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	120	2,83	0,63
Vb	117	3,65	
Vc	118,3	4,50	
Ia	2,37	43,72	4,08
Ib	2,51	43,92	
Ic	2,51	43,02	

Fonte: Fazio Junior (2011).

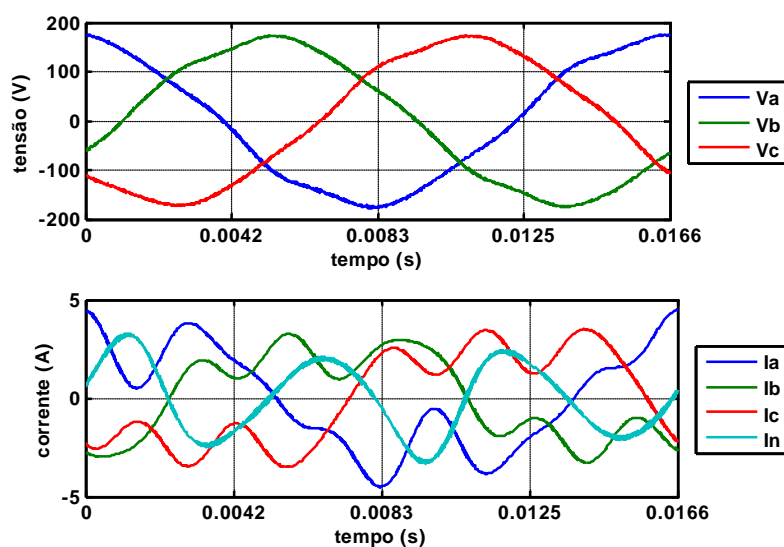
Tabela 6.2 – Energias reativas medidas no Perfil 1

Método Usado	Energia reativa (KVarh)	Erro (%)	
IEEE (Q1+)	0,2686	-	
Q1	0,2687	0,043	
PQ	0,2663	0,847	
CPT	0,2684	0,054	
Cálculo Yokogawa	0,2679	0,256	
Yokogawa	0,2704	0,686	
Medidor Comercial	Valor médio das amostras 1, 2 e 3	0,2738	1,952

Fonte: Fazio Junior (2011)

6.1.2 PERFIL 2 THDV(4%) THDI(48%)

Figura 6.2 – Perfil 2 THDV(4%) e THDI(48%)



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 6.3 – Características do Perfil 2

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	119,6	4,57	0
Vb	118,5	3,82	
Vc	118,8	3,81	
Ia	2,51	49,4	12,1
Ib	2,08	48,4	
Ic	2,29	47,1	

Fonte: Fazio Junior (2011).

Tabela 6.4 – Energias reativas medidas no Perfil 2

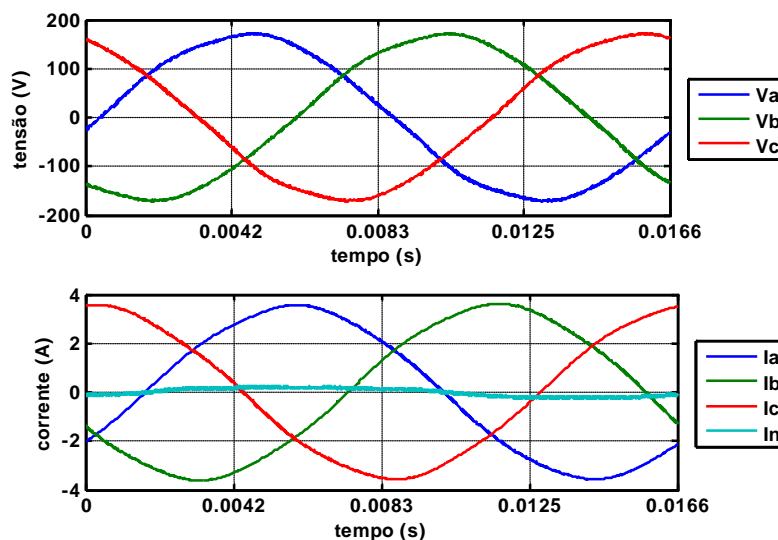
Método Usado	Energia reativa (kVArh)	erro (%)	
IEEE (Q1+)	0,3752	-	
Q1	0,3752	0	
PQ	0,3785	0,887	
CPT	0,3746	0,149	
Cálculo Yokogawa	0,3731	0,557	
Yokogawa	0,3756	0,117	
Medidor Comercial	Valor médio das amostras 1, 2 e 3	0,3737	0,389

Fonte: Fazio Junior (2011)

6.2 PERFIL COM TENSÃO BALANCEADA

6.2.1 PERFIL 3 – CARGA LINEAR BALANCEADA

Figura 6.3 – Perfil 3 THDV(4%) e THDI(20%)



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 6.5 – Características do Perfil 3

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	120	1,9	
Vb	119,8	1,8	0,2
Vc	119,7	1,9	
Ia	2,48	1,5	
Ib	2,51	2	1,8
Ic	2,48	1,9	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 6.6 – Energias reativas medidas no Perfil 3

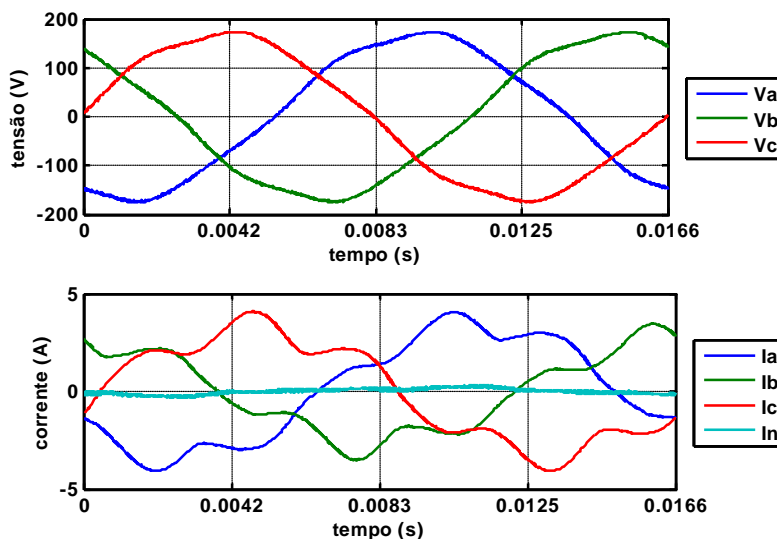
Método Usado	Energia reativa (KVarh)	Erro (%)
IEEE (Q1+)	0,4224	-
Q1	0,4222	0,063
PQ	0,4229	0,115
CPT	0,4241	0,384
Cálculo Yokogawa	0,4232	0,190
Yokogawa	0,4233	0,201
Medidor Comercial	Valor médio das amostras 1, 2 e 3	0,4234
		0,22

Fonte: Fazio Junior (2011)

Neste perfil não foi apresentado diferença significativa no cálculo dos métodos. Portanto para perfis equilibrados e senoidais todas as metodologias são equivalentes.

6.2.2 PERFIL 4 – CARGA NÃO LINEAR DESBALANCEADA

Figura 6.4 – Perfil 4 THDV(4%) e THDI(20%)



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 6.7 – Características do Perfil 4

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	119,7	3,9	
Vb	119,8	4,1	0,2
Vc	120,3	4,1	
Ia	2,52	16,8	
Ib	1,97	23,8	16,7
Ic	2,41	22,1	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 6.8 – Energias reativas medidas no Perfil 4

Método Usado		Energia reativa (KVarh)	Erro (%)
IEEE (Q1+)		0,3531	-
Q1		0,3531	0,0
PQ		0,3554	0,667
CPT		0,3540	0,256
Cálculo Yokogawa		0,3522	0,267
Yokogawa		0,3538	0,199
Medidor Comercial	Valor médio das amostras 1, 2 e 3	0,3544	0,369

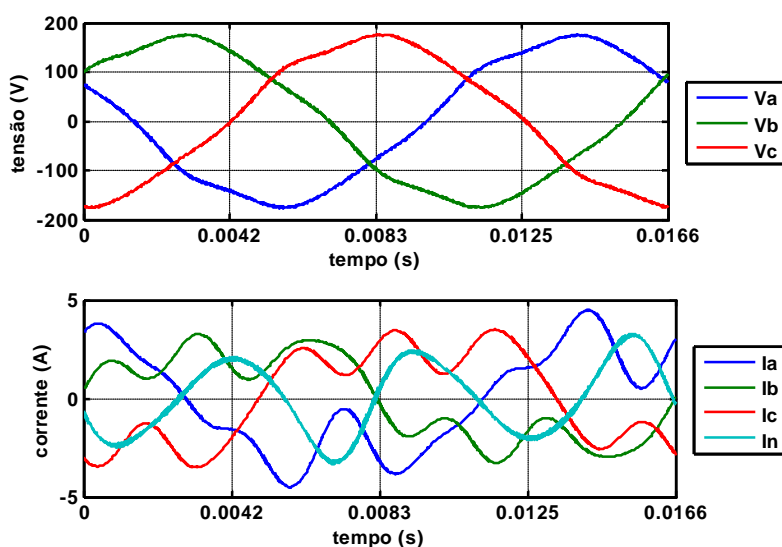
Fonte: Fazio Junior (2011)

O Perfil 4 possui características compatíveis ao do perfil A3.1 do Capítulo 4 portanto, deve apresentar um comportamento semelhante. Como pode ser visto, as teorias

que computam formas de onda distorcidas apresentam um valor ligeiramente diferente daquelas que consideram componentes fundamentais. Neste perfil os medidores apresentaram um valor próximo a teoria CPT.

6.2.3 PERFIL 5 CARGA NÃO LINEAR DESBALANCEADA

Figura 6.5 – Perfil 5 THDV(4,6%) e THDI(48%)



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 6.9 – Características do Perfil 5

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	120,1	4,5	0,2
Vb	120,0	4,6	
Vc	119,7	4,6	
Ia	2,51	49,3	12,3
Ib	2,09	48,7	
Ic	2,29	47,3	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 6.10 – Energias reativas medidas no Perfil 5

Método Usado		Energia reativa (KVarh)	Erro (%)
IEEE (Q1+)		0,3782	-
Q1		0,3780	0,050
PQ		0,3829	1,240
CPT		0,3780	0,050
Cálculo Yokogawa		0,3768	0,3695
Yokogawa		0,3803	0,5636
Medidor Comercial	Valor médio das amostras 1, 2 e 3	0,3773	0,2297

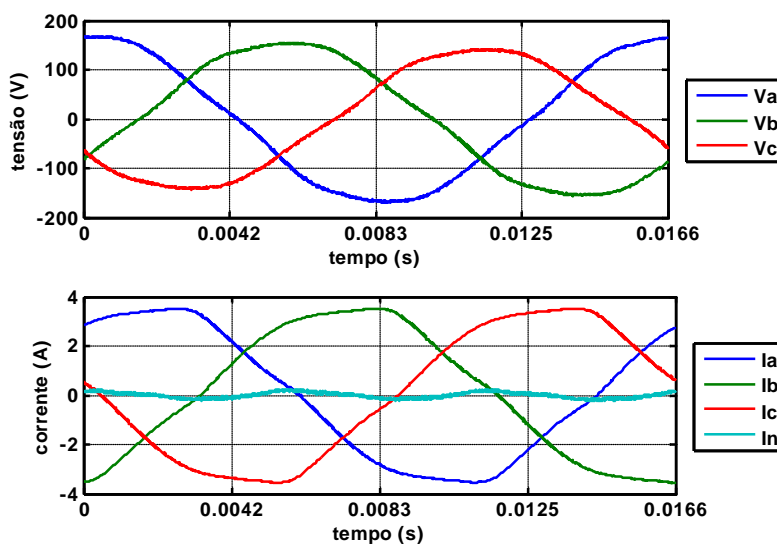
Fonte: Fazio Junior (2011)

Este perfil possui um THD maior em relação ao perfil anterior, e por este motivo deve possuir uma diferença maior nos cálculos. A Tabela 6.10 mostra que os erros aumentaram de forma quase insignificante para o Cálculo do Yokogawa, o valor medido pelo mesmo e o valor médio dos medidores.

6.3 PERFIL COM TENSÃO DESBALANCEADA (5%)

6.3.1 PERFIL 6 THDV(3,4%) THDI(4,7%)

Figura 6.6 – Perfil 6 THDV(3,4%) e THDI(4,7%)



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 6.11 – Características do Perfil 6

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	119,6	3,2	
Vb	110,5	3,4	4,8
Vc	101	3,6	
Ia	2,52	4,7	
Ib	2,51	4,7	0,0
Ic	2,52	4,7	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 6.12– Energias reativas medidas no Perfil 6

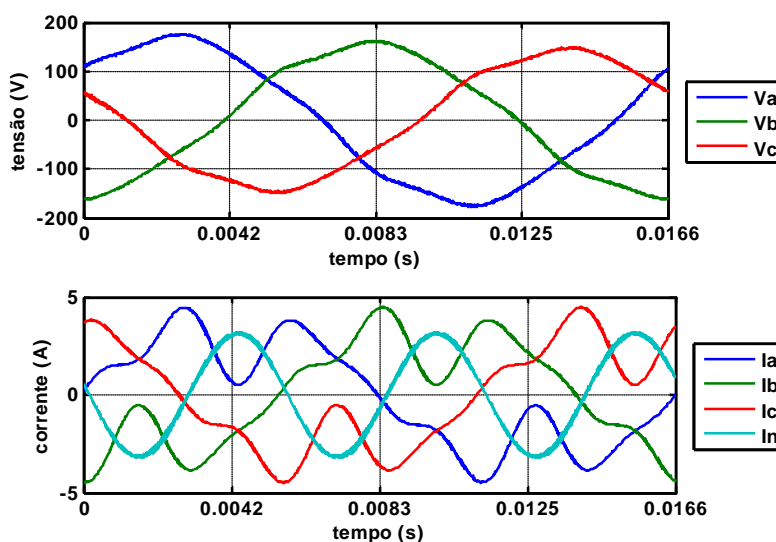
Método Usado		Energia reativa (KVarh)	Erro (%)
IEEE (Q1+)		0,4875	-
Q1		0,4871	0,064
PQ		0,4882	0,144
CPT		0,4890	0,315
Cálculo Yokogawa		0,4882	0,157
Yokogawa		0,4898	0,481
Medidor Comercial	Valor médio das amostras 1, 2 e 3	0,4899	0,501

Fonte: Fazio Junior (2011)

Neste perfil não foi apresentado erros muito significativos no cálculo dos métodos. Portanto para perfis equilibrados e senoidais todas as metodologias são equivalentes.

6.3.2 PERFIL 7 THDV(4,5%) THDI(49,4%)

Figura 6.7 – Perfil 7 THDV(4,5%) e THDI(49,4%)



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 6.13 – Características do Perfil 7

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	120	4,5	
Vb	110,1	4,6	5,0
Vc	101	4,5	
Ia	2,52	49,4	
Ib	2,50	49,4	0,4
Ic	2,51	49,2	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 6.14– Energias reativas medidas no Perfil 7

Método Usado	Energia reativa (KVarh)	Erro (%)
IEEE (Q1+)	0,4177	-
Q1	0,4173	0,093
PQ	0,4270	2,224
CPT	0,4181	0,107
Cálculo Yokogawa	0,4134	1,015
Yokogawa	0,4146	0,732
Medidor Comercial Valor médio das amostras 1, 2 e 3	0,4130	1,116

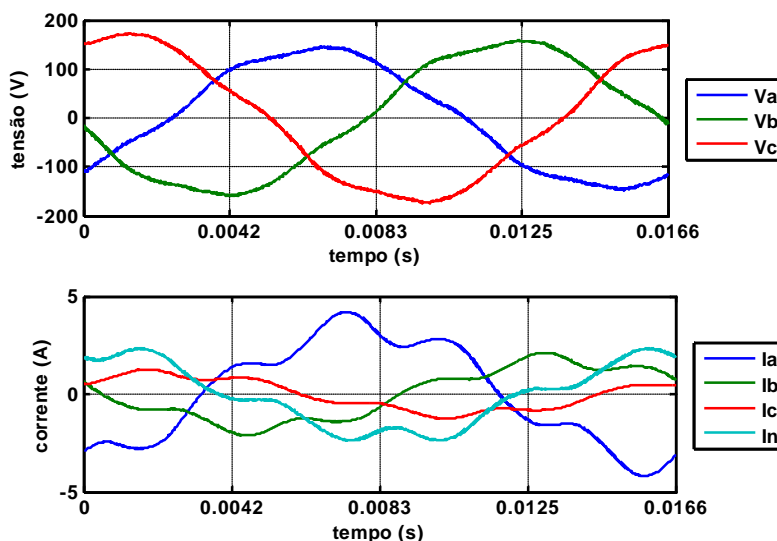
Fonte: Fazio Junior (2011)

O perfil 7 era esperado um erro relativamente maior que o apresentado naqueles métodos que computam a potência reativa para formas de onda não senoidais.

6.4 PERFIL COM TENSÃO E CORRENTE DESBALANCEADAS

6.4.1 PERFIL 8 THDV(5,5%) THDI(20,5%)

Figura 6.8 – Perfil 8 THDV(5,5%) e THDI(20,5%)



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 6.15 – Características do Perfil 8

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	100,8	5,5	
Vb	110,6	5,5	5,0
Vc	119,8	5,4	
Ia	2,52	20,5	
Ib	1,27	20,7	34,5
Ic	0,75	20,3	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 6.16– Energias reativas medidas no Perfil 8

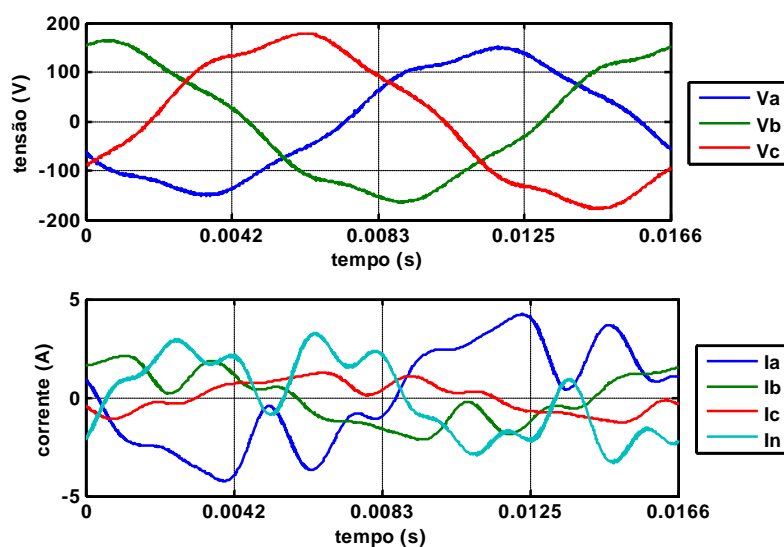
Método Usado	Energia reativa (KVarh)	Erro (%)
IEEE (Q1+)	0,2187	-
Q1	0,2237	2,313
PQ	0,2273	3,929
CPT	0,2118	3,125
Cálculo Yokogawa	0,2090	4,425
Yokogawa	0,2098	4,060
Medidor Comercial	Valor médio das amostras 1, 2 e 3 0,2098	4,060

Fonte: Fazio Junior (2011)

O perfil 8 além da tensão ser desequilibrada, possui uma corrente distorcida e desbalanceada. O erro foi em torno de 4% para a maioria dos valores apresentados, e é esperado para perfis com estes distúrbios.

6.4.2 PERFIL 9 THDV(6,7%) THDI(43%)

Figura 6.9 – Perfil 9 THDV(6,7%) e THDI(43%)



Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 6.17 – Características do Perfil 9

	RMS	THD (%)	Desbalanço (%)
Va	101	6,8	
Vb	110,2	6,7	4,9
Vc	120,1	6,6	
Ia	2,54	41,9	
Ib	1,27	45,0	35,0
Ic	0,75	41,1	

Fonte: Fazio Junior (2011)

Tabela 6.18– Energias reativas medidas no Perfil 9

Método Usado	Energia reativa (KVArh)	Erro (%)	
IEEE (Q1+)	0,1770	-	
Q1	0,1818	2,723	
PQ	0,1856	4,870	
CPT	0,1713	3,208	
Cálculo Yokogawa	0,1697	4,127	
Yokogawa	0,1698	4,046	
Medidor Comercial	Valor médio das amostras 1, 2 e 3	0,1678	5,177

Fonte: Fazio Junior (2011)

Este último perfil possui as características do perfil anterior, porém com um THD maior na corrente. Observa-se que o erro também foi grande, sendo que para o medidor comercial e para a teoria PQ aumentou.

A fim de identificar o fenômeno que mais influencia na diferença nos valores das medições, foi feito uma tabela com escala gradual de cores, onde cor próxima do verde indica valores de baixa magnitude e valores próximos do vermelho são valores de alta magnitude referentes características dos perfis. A Figura 6.10 mostra a tabela onde é evidente que o desequilíbrio da tensão provocou as maiores diferenças nos valores das medições, os perfis onde isto acontece são aqueles com maior graduação na cor vermelha, ou seja os perfis G e H.

Figura 6.10 – Tabela de cores para identificação dos erros de medição

Experimental											
Perfil	Características					Erros (%)					
	V desb	I desb	THDV	THDI	Err_Q1	Err_PQ	Err_CPT	Err_calc_yok	Err_Yok	Err_Medidores	
A	PerfI1	0,000	12,100	4,070	48,300	0,000	0,887	0,150	0,557	0,684	1,186
	PerfI2	0,360	14,160	3,610	44,690	0,022	1,334	0,066	0,452	0,192	0,504
	PerfI3	0,630	4,080	3,660	43,560	0,043	0,847	0,055	0,256	0,120	1,136
B	PerfI1	0,180	9,840	5,530	41,170	0,000	1,170	0,142	0,688	0,491	1,291
	PerfI2	0,570	11,050	2,200	37,580	0,106	0,415	0,041	0,561	0,737	0,677
	PerfI3	0,480	26,070	3,700	35,250	0,377	0,739	0,629	0,794	0,030	0,182
C	PerfI1	0,230	12,280	4,600	48,450	0,051	1,240	0,056	0,370	0,241	1,028
	PerfI2	0,190	13,400	3,670	44,490	0,035	1,124	0,191	0,767	1,160	1,840
	PerfI3	0,210	3,730	4,660	43,380	0,011	0,363	0,016	0,009	0,296	0,960
D	PerfI1	0,320	3,000	1,960	8,000	0,016	0,165	0,053	0,248	0,351	0,234
	PerfI2	0,170	8,670	2,800	6,100	0,012	0,228	0,020	0,189	0,397	0,374
	PerfI3	0,280	9,450	3,200	4,050	0,042	0,011	0,016	0,036	0,103	0,083
E	PerfI1	2,730	0,200	4,100	16,700	0,007	0,654	0,059	0,430	0,547	1,045
	PerfI2	2,770	0,240	3,470	13,560	0,019	1,712	0,314	1,531	1,635	1,681
	PerfI3	3,120	0,340	3,100	9,900	0,030	0,032	0,042	0,124	0,500	0,624
F	PerfI1	5,100	0,200	4,110	23,770	0,007	0,166	0,029	0,061	0,273	0,321
	PerfI2	4,800	0,330	5,400	20,420	0,022	1,331	0,270	1,299	1,255	1,309
	PerfI3	4,700	0,030	4,000	18,620	0,000	1,248	0,204	0,989	0,909	1,170
G	PerfI1	4,800	34,680	4,680	49,07	2,282	4,505	3,593	4,528	4,336	5,293
	PerfI2	5,080	44,570	3,760	44,57	3,322	5,179	3,980	4,863	4,947	5,774
	PerfI3	5,200	34,730	4,600	43,97	3,323	2,569	3,635	3,531	3,659	2,577
H	PerfI1	5,167	34,700	3,950	18,660	2,970	4,173	3,803	4,495	4,921	5,190
	PerfI2	4,800	34,550	4,230	16,740	2,536	1,868	3,145	2,759	2,933	2,507
	PerfI3	5,220	34,640	3,310	13,610	3,661	5,292	3,797	5,135	5,232	5,547

Fonte: Fazio Junior (2011)

6.5 CONCLUSÃO

Os resultados experimentais não seguiram os mesmos padrões apresentados pelas simulações para alguns perfis, entretanto observa-se que os erros tendem a crescer a medida que as formas de onda se tornam distorcidas e desbalanceadas. Pelo fato de alguns perfis não terem apresentado o resultado esperado, como visto nos comentários e simulações do capítulo 4, necessita-se investigar outros tipos de perfis que apresentem resultados semelhantes.

Além desta investigação seria necessário implementar experimentalmente os algoritmos de cálculo das metodologias em um hardware, como um dispositivo FPGA, ou por meio de instrumentação virtual, a fim de realizar o processamento das medições em tempo real, possibilitando uma melhor precisão.

7 CONCLUSÃO GERAL

As principais abordagens de potência elétrica foram apresentadas de forma concisa, onde foi possível conhecer a problemática que envolve o conceito a respeito das potências não ativas e a dificuldade da interpretação dos sentidos físicos envolvidos pela observação da enorme quantidade de componentes de corrente definida por cada autor. A Energia reativa ainda é um problema quanto ao correto método empregado para seu cálculo. Uma grande diversidade de material presente na literatura é foco de intensa discussão a respeito do tema. Desde o surgimento da energia elétrica, e até então, não há um consenso entre os pesquisadores sobre as diversas decomposições de correntes e uma teoria generalizada que seja aplicada a sistemas não-senoidais e/ou condições desbalanceadas.

O presente trabalho possibilitou a comparação das diversas teorias analisando as vantagens e desvantagem de acordo com cada aplicação. Permitindo desta forma, escolher aquelas que poderiam se aplicadas à medição de Energia reativa. A proposta do IEEE e a teoria CPT apresentaram um bom entendimento no sentido físico (PAREDES, MARAFÃO; SILVA, 2009) (MARAFÃO; PAREDES; SILVA, 2009) das potências, ademais o IEEE parece estar relacionado com a utilização da rede, enquanto que a CPT esta relacionada com os fenômenos da carga (MARAFÃO; PAREDES; SILVA, 2010) Estas teorias são boas referencias para o cálculo das parcelas de energia relacionadas aos fenômenos elétricos como também do fator de potência, quando se consideram as situações atuais do sistema elétrico.

Os resultados experimentais apresentados, apesar de algumas divergências com os resultados simulados, mostraram consistentes para as maiorias dos perfis. Obviamente, como exposto na revisão bibliográfica, cada teoria possui suas características particulares, desde significados físicos, como também diferentes o modo de se calcular. Elas agregam em seus cálculos características próprias, e a escolha de qual Método utilizar depende da aplicação e também das ferramentas utilizadas para implementação dos algoritmos.

A proposta de Tenti utiliza o conceito de homo variáveis de fácil implementação para as ferramentas atuais, ela parece ser mais adequada ao correto cálculo da Energia reativa, pois este método é valido para sistemas não senoidais e desbalanceados. Ademais a teoria CPT conseguiu atribuir um sentido físico a ela, representada pela energia

armazenada em elementos indutivos e capacitivos presentes nos sistemas de energia elétrica.

8 REFERÊNCIAS

- AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. In: INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS CONFERENCE- IPEC, 83., 1983. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 1983.
- BUCHHOLZ, F. **The Systematic of maximal power, active power and total non-active power.** Munich: [s.n.], 1950.
- BUDEANU, C. I. **Puissances reactives et fictives.** [S.l.], Instytut Romain de l'Energie, 1927.
- CZARNECKI, L. S. Orthogonal decomposition of the currents in a 3-phase nonlinear asymmetrical circuit with a nonsinusoidal voltage source. **IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement**, Piscataway, n. 37, p. 30-34, March 1988.
- DEPENBROCK, M. **Active and non-active powers of periodic currentes in single and multi-conductor systems with periodic voltages of arbitrary time function.** [S.l.: s.n.], 1979.
- DEPENBROCK, M. The fdb-method, a generally applicable tool for analyzing power relations. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND POWER SYSTEMS-ICHPS, 1992. **Conference...** [S.l.: s.n.], 1992. p. 135-141.
- FRYZE, S. Active, non active and apparent power in electrical circuits with non sinusoidal time function current and voltage, in German Language. **ETZ : Elektrotechnische zeitschrift**, Wupperta, ., v. 53, 1932.
- IEEE STANDARD 1459-2010. **IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced or unbalanced conditions.** [S.l.: s.n.], , 2000. ISBN 0-7381-1963-6.
- JEON, S. J. Unification and evaluation of instantaneous reactive power theories. **IEEE Transactions on Power Electronics**, Piscataway, v. 23, p. 1502-1510. 23, 2008. 1502-1510.
- KIMBARK, E. W. Direct current transmission. **Interscience**, Manila, v. 1, 1971.
- MARAFÃO, F. P. **Definições de potências elétricas: histórico e discussão.** 2004. 259 f. Tese (Doutorado em Análise e Controle da Energia Elétrica através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais)- Campinas , 2004.
- MARAFÃO, F. P.; PAREDES, H. K. M.; SILVA, L. C. P. da. **Critical evaluation of FBD, PQ and CPT current decompositions for four-wire circuits.** In: BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE, 2009, Bonito. **Conference...** Bonito: [s.n.], 2009.
- MARAFÃO, F. P.; PAREDES, H. K. M.; DA SILVA, L. C. P. Three-phase four-wire circuits interpretation by means of different power theories. **International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation**, Lagów, p. 15-18, Junho 2010.

MOREIRA, A. C. et al. Virtual instrumentation applied to the implementation of IEEE STD 1459-2000 power definitions. In: POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE- PESC, 2005. **Conference...** [S.l.: s.n.], 2005.

PAREDES, H. K. M. et al. Conservative power theory discussion and evaluation by means of virtual instrumentation. In: BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE COBEP, 2009, Bonito, **Conference...** Bonito: [s.n.]. 2009.

PAREDES, H. K. M.; MARAFÃO, F. P.; SILVA, C. P. L. da. A Comparative analysis of FBD, PQ and CPT current decompositions - part I: threee-phase three-wire systems. In: IEEE BUCHAREST POWER TECH CONFERENCE, 28., 2009, Bucharest. **Conference...** Bucharest: [s.n.], 2009.

ROSSETTO, L.; TENTI, P. Evaluation of instantaneous power terms in multi-phase systems: Techniques and applications to power-conditioning equipments. **European Transaction on Electrical Power Engineering-ETEP**, Bognor Regis, n. 4, p. 469-475, 1994.

SHEPHERD, W.; ZAKIKHANI, P. Suggested definitions of reactive power for nonsinusoidal systems. **IEE Proceedings**, Stevenage, n. 119, p. 1361-1362, September 1972.

STAUDT, V. Fryze - buchholz - depenbrock: a time-domain power theory. **IEEE International school on nonsinusoidal currents and compensation**, [S.l.], 2008.

TEDESCHI, E. et al. Cooperative control of electronic power processors in micro-grids. In: BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE- COBEP, 2009, Bonito. **Conferende...** Bonito: [s.n.]. 2009.

TENTI, P.; MATTAVELLI, P. A Time-domain approach to power term definitions under non-sinusoidal conditions. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON POWER DEFINITIONS AND MEASUREMENTS UNDER NON-SINUSOIDAL CONDITIONS, 6., 2003. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2003.

TENTI, P.; MATTAVELLI, P.; PAREDES, H. K. M. Conservative Power Theory, Sequence Components and Accountability in Smart Grids. **International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation**, [S.l.], Junho 2010.

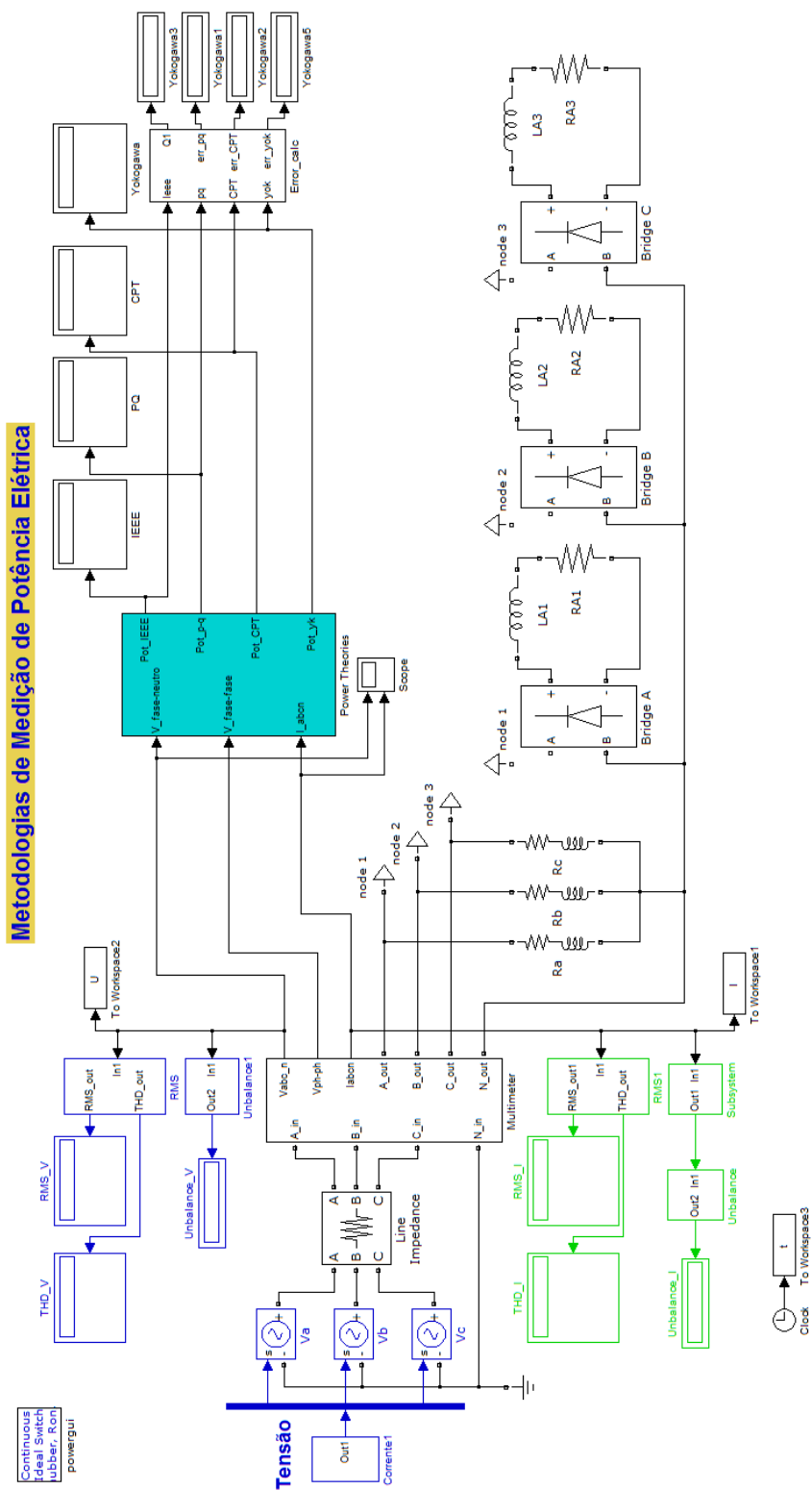
TOGASAWA, S. et al. Reactive power compensation based on a novel cross-vector theory. **IEE J Trans. Ind. Appl.**, [S.l.], v. 114, n. 3,p. 340-341, 1994..

WATANABE, E. H.; AREDES, M. **Teoria de potência ativa e reativa instantânea e aplicações - filtros ativos e fACTS**. [S.l.: s.n., 200-]].

WILLEMS, J. L. A new interpretation of the akagi-nabae power components for nonsinusoidal three-phase situations. **IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement**, Piscataway, n. 41, p. 523-527, august 1992..

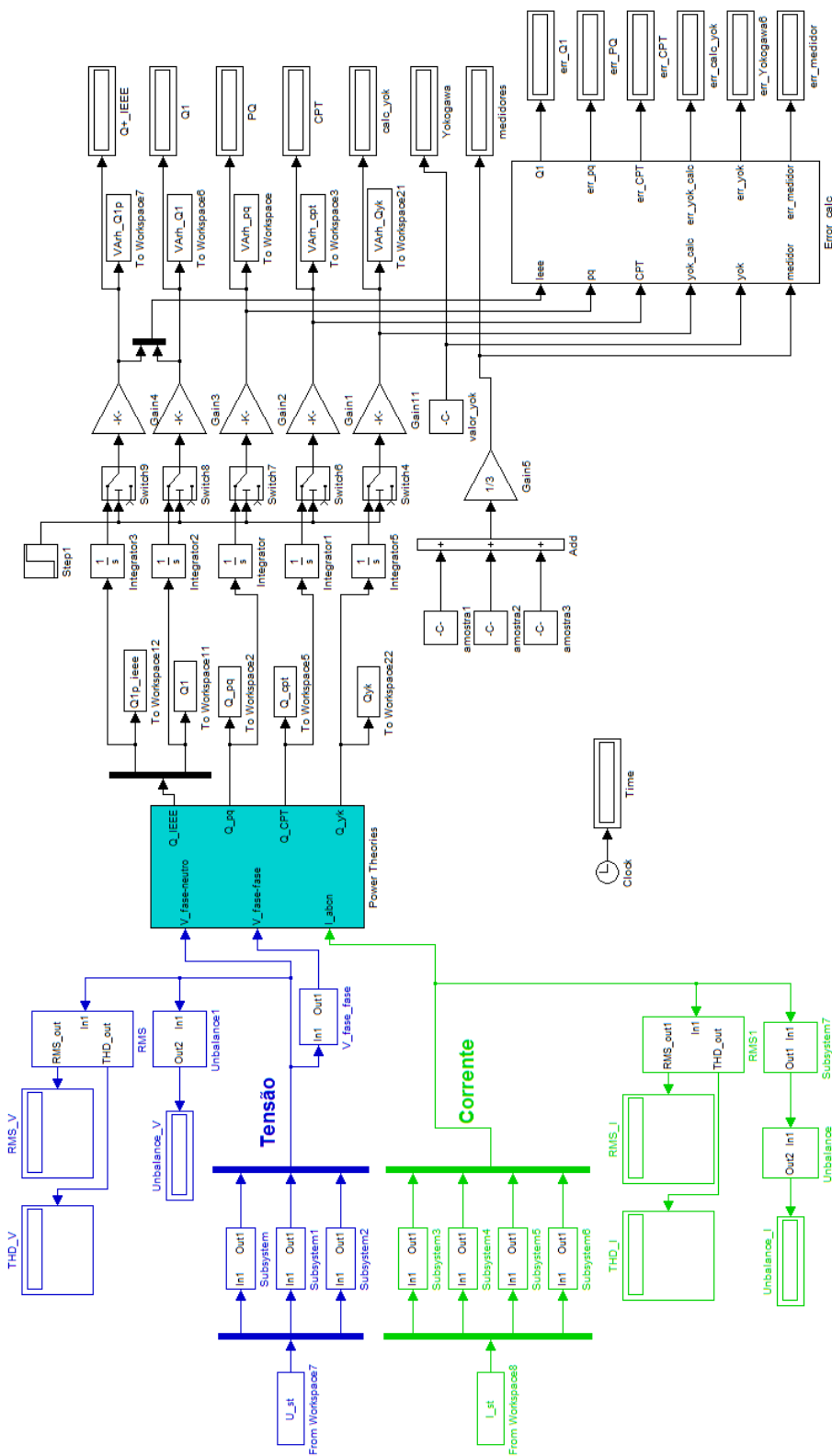
9 ANEXO I

Figura 9.1 – Esquema utilizado para realizar as simulações das cargas.



Fonte: Fazio Junior (2011).

Figura 9.2 - Esquema utilizado para processar os cálculos experimentais.



Fonte: Fazio Junior (2011).