

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Proposta metodológica para determinação do fator
de potência sob condições distorcidas e
desequilibradas

Diego Augusto de Lima Santana

Uberlândia

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Proposta metodológica para determinação do fator
de potência sob condições distorcidas e
desequilibradas

Dissertação apresentada por Diego Augusto de Lima Santana à Universidade Federal de
Uberlândia para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Banca Examinadora:

José Rubens Macedo Junior, Dr. (Orientador) – UFU

Isaque Nogueira Gondim, Dr. – UFU

Paulo Henrique Oliveira Rezende, Dr. – UFTM

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S232p
2017 Santana, Diego Augusto de Lima, 1990
Proposta metodológica para determinação do fator de potência /
Diego Augusto de Lima Santana. - 2017.
139 f. : il.

Orientador: José Rubens Macedo Junior.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.118>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Fator de potência - Teses. 3.
Energia elétrica - Medição - Teses. 4. Sistemas de energia elétrica -
Controle de qualidade - Teses. I. Macedo Junior, José Rubens. II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Proposta metodológica para determinação do fator de potência sob condições distorcidas e desequilibradas

Diego Augusto de Lima Santana

Dissertação apresentada por Diego Augusto de Lima Santana à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Uberlândia, 20 de dezembro de 2017

José Rubens Macedo Júnior, Dr.
(orientador) – UFU

Alexandre Cardoso, Dr. (Coordenador
do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica) – UFU

Dedico este trabalho à minha Mãe Keila, ao meu Pai Luciano, aos meus avós Carmém e Antônio (in memoriam) e a todos que de alguma forma contribuíram para esta realização.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à Deus pelo objetivo alcançado. Agradeço à Ele também pela boa saúde e bem-estar de meus familiares e amigos.

Agradeço aos meus pais, Luciano e Keila, pela dedicação, incentivo e carinho.

Ao meu orientador, Prof. José Rubens Macedo Júnior, deixo expresso meus sinceros agradecimentos por toda a confiança e ensinamentos, fundamentais para a concretização deste trabalho.

Aos meus grandes amigos Arnaldo, Isaque e Leandro, pela força ativa para conclusão desse trabalho.

Aos meus colegas de Celg Geração e Transmissão pela compreensão e incentivo a educação.

Enfim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Esse trabalho tem como foco principal a análise da influência que as distorções harmônicas e os desequilíbrios exercem nos erros de medição de energia elétrica em medidores de faturamento trifásicos de potência ativa e reativa. Tais equipamentos tipicamente são concebidos para serem instalados em plantas elétricas totalmente equilibradas e simétricas, fato esse que não reflete as atuais condições da rede de distribuição. Inicialmente, levantou-se as metodologias de cálculo de potência mais relevantes da literatura, sendo suas equações implementadas em ambiente computacional (MATLAB), visando obter indicadores comparativos entre elas. Obtidos os resultados comparativos, montou-se uma estrutura laboratorial padrão para ensaios de medidores de energia, onde os mesmos foram submetidos a uma bateria de ensaios com diferentes níveis de distorções harmônicas e desequilíbrios, conforme o caderno de testes proposto. Realizados os ensaios, notou-se uma grande incoerência entres os resultados obtidos por cada medidor, sendo assim necessário recomendar uma metodologia de cálculo alternativa capaz de padronizar as medições de modo a não prejudicar as partes envolvidas, seja a concessionária de energia elétrica ou o consumidor final. Com base na recomendação feita, a mesma foi implementada em um protótipo de medidor, juntamente com as demais metodologias, para fins comparativos. Por fim, foi realizada uma campanha de medição em diferentes plantas, com o protótipo, onde os resultados obtidos para medição de potência ativa apresentaram baixo desvios em relação a classe de exatidão dos medidores. No entanto, quando considerada a energia reativa, as diferentes metodologias apresentaram desvios superiores a 20 por cento em algumas plantas.

Palavras-chave: fator de potência, medidores de energia elétrica, qualidade da energia elétrica, resultados experimentais.

ABSTRACT

This work has as main focus the analysis of the influence that the harmonic distortions and the imbalances exert in the errors of measurement of electric energy in three-phase billing meters of active and reactive power. Such equipment is typically designed to be installed in fully balanced and symmetrical power plants, a fact that does not reflect the current conditions of the distribution network. Initially, the most relevant power calculation methodologies of the literature were raised, and their equations were implemented in a computational environment (MATLAB), in order to obtain comparative indicators between them. After obtaining the comparative results, a standard laboratory structure was set up for tests of energy meters, where they were submitted to a battery of tests with different levels of harmonic distortions and imbalances, according to the proposed test book. Once the tests were carried out, there was a great inconsistency between the results obtained by each meter, so it is necessary to recommend an alternative calculation methodology capable of standardizing the measurements in a way that does not harm the parties involved, whether the electricity utility or the final consumer. Based on the recommendation made, it was implemented in a prototype meter, along with the other methodologies, for comparative purposes. Finally, a measurement campaign was carried out in different plants, with the prototype, where the results obtained for active power measurement showed low deviations in relation to the accuracy class of the meters. However, when considering the reactive energy, the different methodologies showed deviations of more than 20 percent in some plants.

Key words: power factor, electric energy meters, electric power quality, experimental results.

SUMÁRIO

Capítulo I

Introdução	22
1.1 – Considerações iniciais	22
1.4 – Estrutura da dissertação	24

Capítulo II

Estado da Arte	26
2.1 – Considerações iniciais	26
2.2 – Definições Tradicionais (Frequência Fundamental).....	27
2.3 – Teoria de Budeanu.....	29
2.4 – Teoria de Fryze.....	31
2.5 – Teoria de Czarnecki.....	34
2.6 – Teoria PQ.....	37
2.7 – Teoria FBD (Fryze-Buchholz-Depenbrock).....	40
2.7.1 – Circuitos monofásicos não-senoidais	41
2.7.2 – Circuitos trifásicos não-senoidais	44
2.8 – IEEE 1459-2010	46
2.8.1 – Circuitos monofásicos não-senoidais	47
2.8.2 – Circuitos trifásicos não-senoidais desbalanceados	49
2.9 – Métodos de medição de potência reativa.....	52
2.9.1 – Método do triângulo de potências	52
2.9.2 – Método do deslocamento de 90°	53
2.9.3 – Método de integração	54
2.9.4 – Método da derivação	54
2.10 – Resumo das Teorias.....	54

Capítulo III

Implementação Computacional das Teorias de Potência e Métodos de Medição de Potência Reativa	57
3.1 – Considerações iniciais	57
3.2 – Desenvolvimento do aplicativo computacional.....	57
3.3 – Definição dos estudos de caso	59
3.4 – Apresentação dos resultados.....	60
3.5 – Análise dos resultados	64

Capítulo IV

Testes de desempenho dos medidores comerciais	66
4.1 – Considerações iniciais	66
4.2 – Documentação nacional e internacional	66
4.3 – Definição dos módulos gerais associados com os grupos de ensaios	67
4.4 – Detalhamento dos testes por módulos de ensaios.....	68
4.5 – Estrutura laboratorial montada	71
4.5.1 – Fonte controlada de tensão e corrente	72
4.5.2 – Cossefímetro	73
4.5.3 – Computador	73
4.5.4 – Comentários gerais	73
4.5.5 – Medidores	74
4.6 – Metodologia para a realização dos testes nos medidores	76
4.7 – Resultados e análise crítica.....	79
4.7.1 – Módulo X - Tensão puramente senoidal e correntes de chaveamento (retificador de meia-onda e dimmer).....	79
4.8 – Síntese dos resultados.....	80

Capítulo V

Proposição de Metodologia Para Cálculo de Fator de Potência.....	82
5.1 – Considerações iniciais	82
5.2 – Propostas elementares encontradas na literatura	82
5.3 – Nova proposição para o cálculo do fator de potência.....	83
5.4 – Análise das componentes simétricas em termos de potência	84
5.5 – Proposta para o cálculo do fator de potência	86

Capítulo VI

Implementação em Protótipo de Medidor e Medições de Teste.....	90
6.1 – Considerações iniciais	90
6.2 – Medidor e pontos de medição.....	90
6.3 – Resultados das medições em campo.....	91

Capítulo VII

Conclusões.....	96
------------------------	-----------

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas	98
---	-----------

Apêndices

Apêndice I – Caderno de Testes.....	100
Apêndice II – Ensaio em laboratório dos medidores	109
Apêndice III – Resultados das medições do protótipo de medidor	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estratificação de potência aparente de circuitos elétricos segundo Constantin Budeanu [4].	30
Figura 2.2 – Circuito representativo das definições segundo Fryze [4].	32
Figura 2.3 – Circuito representativo das definições segundo Czarnecki [4].	34
Figura 2.4 – Diagrama fasorial para a tensão e correntes fundamental segundo a teoria FBD [4].	42
Figura 2.5 – Definição de potência aparente segundo Depenbrock [4].	44
Figura 2.6 – Método FBD: (a) Circuito atual (b) Circuito equivalente com o ponto virtual de neutro [4].	45
Figura 2.7 – Estratificação de potência aparente de circuitos monofásicos não-senoidais segundo a metodologia proposta por Emanuel (IEEE 1459-2010) [4].	49
Figura 2.8 – Estratificação de potência aparente de circuitos trifásicos desbalanceados não-senoidais segundo a metodologia proposta por Emanuel (IEEE 1459-2010) [4]. ..	52
Figura 3.2 – Triângulo de Potências. 53	
Figura 3.1 – Interface da fonte programável desenvolvida.	58
Figura 3.2 – Interface da fonte programável desenvolvida.	59
Figura 4.1 - Composição estrutural para o laboratório de testes.72	
Figura 4.2 - Composição estrutural para o laboratório de testes.	74
Figura 4.3 - Composição estrutural para o laboratório de testes.	77
Figura 4.4 - Interface <i>software</i> PQ Signal Generator.	78
Figura 4.5 - Interface <i>software</i> TransPlay.	78
Figura 5.1 – Fluxo de potência ativa em um sistema trifásico a três fios com carga desequilibrada.	84
Figura 5.2 – Diagrama de blocos ilustrativo do cálculo do fator de potência de sequência positiva.	88
Figura 5.3 – Diagrama de blocos ilustrativo do cálculo das potências ativa e reativa de sequência positiva.	89
Figura 6.1 – Medidor de energia elétrica para cálculo da nova metodologia.	91
Figura 6.2 – Resultados das medições de potência ativa através das metodologias consideradas.	94
Figura 6.3 – Resultados das medições de potência reativa através das metodologias consideradas.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resumo das Definições Metodologias de Cálculo de Potência	54
Tabela 3.1 – Características dos sinais analisados no caso 1.	59
Tabela 3.3 – Características dos sinais analisados no caso 2.	59
Tabela 3.4 – Características dos sinais analisados no caso 3.	60
Tabela 3.5 – Características dos sinais analisados no caso 4.	60
Tabela 3.6 – Resultados obtidos a partir das definições tradicionais.	60
Tabela 3.7 – Resultados obtidos a partir da teoria de Budeanu.....	61
Tabela 3.8 – Resultados obtidos a partir da teoria de Fryze.....	62
Tabela 3.9 – Resultados obtidos a partir da teoria de Czarnecki.....	62
Tabela 3.10 – Características dos sinais analisados no caso 4.	63
Tabela 3.11 – Resultados obtidos a partir da teoria FDB.....	63
Tabela 3.12 – Resultados obtidos a partir da teoria FDB.....	63
Tabela 3.13 – Resultados obtidos a partir da teoria IEEE 1459-2010.....	64
Tabela 3.14 – Resultados obtidos a partir da teoria IEEE 1459-2010. Erro! Indicador não definido.	
Tabela 4.1 - Descrição dos Testes do Módulo I.	68
Tabela 4.3 - Descrição dos Testes do Módulo I.	69
Tabela 4.4 - Descrição dos Testes do Módulo I.	69
Tabela 4.5 - Descrição dos Testes do Módulo I.	69
Tabela 4.6 - Descrição dos Testes do Módulo I.	69
Tabela 4.7 - Descrição dos Testes do Módulo I.	70
Tabela 4.8 - Descrição dos Testes do Módulo I.	70
Tabela 4.9 - Descrição dos Testes do Módulo I.	70
Tabela 4.10 - Descrição dos Testes do Módulo I.	71
Tabela 4.11 - Descrição dos Testes do Módulo I.	71
Tabela 4.12 – Medidores Ensaçados e seus Códigos de Referência. Erro! Indicador não definido.	
Tabela 4.13 – Medidores de energia.....	75
Tabela 4.14 – Desvios dos medidores no Módulo X.....	80
Tabela 4.15 – Desvios dos medidores no Módulo I.	80
Tabela 6. 1 – Pontos medição protótipo com metodologias.....	91
Tabela 6.2 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto).....	92
Tabela 6.3 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão).	92

Tabela 6.4 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente).....	92
Tabela 6.5 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão).	92
Tabela 6.6 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão).....	93
Tabela 6.7 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental).....	93
Tabela 6.8 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva).....	93

Tabelas Apêndice

Tabela 1 - Desvios dos medidores no Módulo I.....	109
Tabela 2 - Desvios dos medidores no Módulo II.....	110
Tabela 3 - Desvios dos medidores no Módulo III.	111
Tabela 4 - Desvios dos medidores no Módulo IV.....	112
Tabela 5 - Desvios dos medidores no Módulo V.	113
Tabela 6 - Desvios dos medidores no Módulo VI.....	114
Tabela 7 - Desvios dos medidores no Módulo VII.....	114
Tabela 8 - Desvios dos medidores no Módulo VIII.	115
Tabela 9 - Desvios dos medidores no Módulo IX.....	116
Tabela 10 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto) - BAUMINAS.....	118
Tabela 11 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão) - BAUMINAS.....	118
Tabela 12 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente) - BAUMINAS.....	118
Tabela 13 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão) - BAUMINAS.....	118
Tabela 14 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão) - BAUMINAS.....	118
Tabela 15 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental) - BAUMINAS..	119
Tabela 16 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva) - BAUMINAS.	119
Tabela 17 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto) - BELA ISCHIA.....	119
Tabela 18 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão) - BELA ISCHIA.....	119
Tabela 19 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente) - BELA ISCHIA.....	120
Tabela 20 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão) - BELA ISCHIA.....	120
Tabela 21 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão) - BELA ISCHIA.....	120

Tabela 22 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental) - BELA ISCHIA.	120
Tabela 23 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva) - BELA ISCHIA.....	120
Tabela 24 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto) - HORII.	121
Tabela 25 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão) - HORII.	121
Tabela 26 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente) - HORII.	121
Tabela 27 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão) - HORII.	121
Tabela 28 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão) - HORII.	122
Tabela 29 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental) - HORII.	122
Tabela 30 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva) - HORII.....	122
Tabela 31 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto) - INTERCEMENT.....	122
Tabela 32 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão) - INTERCEMENT.....	122
Tabela 33 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente) - INTERCEMENT.....	123
Tabela 34 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão) - INTERCEMENT.....	123
Tabela 35 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão) - INTERCEMENT.....	123
Tabela 36 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental) - INTERCEMENT.	123
Tabela 37 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva) - INTERCEMENT. .	124
Tabela 38 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto) - TCIL.	124
Tabela 39 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão) - TCIL.	124
Tabela 40 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente) - TCIL.	124
Tabela 41 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão) - TCIL.	124
Tabela 42 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão) - TCIL.	125
Tabela 43 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental) - TCIL.	125

Tabela 44 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva) - TCIL.....	125
Tabela 45 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto) - UBA FERROMINAS.	125
Tabela 46 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão) - UBA FERROMINAS.	126
Tabela 47 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente) - UBA FERROMINAS.	126
Tabela 48 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão) - UBA FERROMINAS.	126
Tabela 49 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão) - UBA FERROMINAS.	126
Tabela 50 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental) - UBA FERROMINAS.	126
Tabela 51 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva) - UBA FERROMINAS.	127
Tabela 52 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto) - VOTORANTIN.....	127
Tabela 53 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão) - VOTORANTIN.....	127
Tabela 54 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente) - VOTORANTIN.....	127
Tabela 55 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão) - VOTORANTIN.....	128
Tabela 56 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão) - VOTORANTIN.....	128
Tabela 57 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental) - VOTORANTIN.	128
Tabela 58 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva) - VOTORANTIN. ...	128
Tabela 59 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto).....	129
Tabela 60 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão).	129
Tabela 61 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente).....	129
Tabela 62 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão).	129
Tabela 63 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão).....	129
Tabela 64 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental).....	130
Tabela 65 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva).	130
Tabela 66 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto).....	130
Tabela 67 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão).	130
Tabela 68 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente).....	130

Tabela 69 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão).	131
Tabela 70 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão).	131
Tabela 71 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental).	131
Tabela 72 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva).	131
Tabela 73 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto).	132
Tabela 74 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão).	132
Tabela 75 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente).	132
Tabela 76 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão).	132
Tabela 77 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão).	133
Tabela 78 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental).	133
Tabela 79 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva).	133
Tabela 80 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto).	133
Tabela 81 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão).	133
Tabela 82 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente).	134
Tabela 83 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão).	134
Tabela 84 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão).	134
Tabela 85 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental).	134
Tabela 86 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva).	134
Tabela 87 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto).	135
Tabela 88 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão).	135
Tabela 89 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente).	135
Tabela 90 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão).	135
Tabela 91 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão).	136
Tabela 92 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental).	136
Tabela 93 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva).	136
Tabela 94 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto).	136
Tabela 95 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão).	137
Tabela 96 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente).	137
Tabela 97 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão).	137
Tabela 98 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão).	137
Tabela 99 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental).	137
Tabela 100 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva).	138
Tabela 101 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto).	138
Tabela 102 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão).	138

Tabela 103 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente).....	138
Tabela 104 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão).	138
Tabela 105 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão).....	139
Tabela 106 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental).....	139
Tabela 107 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva).	139

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ATP –Alternative Transient Program

FBD – Fryze, Buchochozl, Depenbrock

IEC - International Electrotechnical Commission

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

LED – Light Emitting Diode

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

OSH – Optical Scanning Head

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

PAC – Ponto de Acoplamento Comum

PQ – Power Quality

TOP – The Output Processor

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

YEW - Yokogawa Electric Works

LISTA DE SÍMBOLOS

R	– Resistência,
V	– Tensão
V_h	– Tensão Harmônica de Ordem h
V_m	– Tensão Máxima
I	– Corrente
\hat{i}	- Corrente Fasorial
I_h	- Corrente Harmônica de Ordem h
f	– Frequência
P	– Potência Ativa total
S	– Potência Aparente total
Q, Q_B, Q_F	- Potência Reativo total
fp	– Fator de Potência
P_1	– Potência Ativa Fundamental
S_1	– Potência Aparente Fundamental
Q_1	- Potência Reativo
v_a, v_b, v_c	– Tensão Instantânea de fase
i_a, i_b, i_c	– Corrente Instantânea de fase
\hat{V}	- Valor de Pico da Tensão
\hat{I}	- Valor de Pico da Corrente
ω	- Frequência Angular
t	- tempo
α, α_h	- Ângulo de Defasamento
θ	- Ângulo de Defasamento entre Tensão e Corrente, em graus (°)
θ_h	- Ângulo de fase entre Tensão e Corrente Harmônica
p	- Potência Instantânea
p_p	- Componente Ativa da Potência Instantânea
p_q	- Componente Reativa da Potência Instantânea
P_a, P_b, P_c	- Potência Ativa de fase
Q_a, Q_b, Q_c	- Potência Reativo de fase
S_a, S_b, S_c	- Potência Aparente de fase
fp_1	- Fator de Potência fundamental

D_B	- Potência de Distorção
i_a	- corrente ativa instantânea
G, G_e	- Condutância
T	- Período
PF_b	- Fator de Potência não Ativo
i_r	- corrente reativa instantânea
i_s	- corrente de dispersão
i_u	- desbalanço de cargas
i_g	- Correntes Harmônicas
$i_{\alpha p}$	- Corrente Ativa Instantânea eixo α
$i_{\beta p}$	- Corrente Ativa Instantânea eixo β
v_0	- Componente da tensão de Sequencia Zero transformada Clarke
v_α	- Componente da tensão de Sequencia α transformada Clarke
v_β	- Componente da tensão de Sequencia β transformada Clarke
i_0	- Componente da corrente de Sequencia Zero transformada Clarke
i_α	- Componente da tensão de Sequencia α transformada Clarke
i_β	- Componente da tensão de Sequencia β transformada Clarke
$i_{\alpha q}$	- Corrente Reativa Instantânea eixo α
$i_{\beta q}$	- Corrente Reativa Instantânea eixo β
Q_F	- Potência Reativa de Fryze
v_{AN}, v_{BN}, v_{CN}	- tensão fase neutro
DTI	- distorção total de corrente
DTT	- distorção total de tensão
K_{sh}, K_{snh}	- combinação do efeito skin das diversas ordens harmônicas presentes nos condutores de linha e no condutor neutro, respectivamente;
r_{dc} e r_{ndc}	- são as resistências de corrente contínua dos condutores de linha e do condutor neutro, respectivamente;
K_{s1}	- é o efeito skin para uma frequência igual à frequência fundamental;
I_e	- corrente efetiva
V_e	- tensão equivalente do circuito fictício
S_e	- potência aparente efetiva
S_{e1}	- potência aparente efetiva fundamental

S_{eN}	- potência aparente efetiva não fundamental
D_{eI}	- potência de distorção de corrente
D_{eV}	- potência de distorção de tensão
S_{eH}	- potência aparente harmônica
P_{eH}	- potência não ativa
D_{eH}	- potência harmônica de distorção
FP_1^+	- fator de potência fundamental

Introdução

1.1 – Considerações iniciais

A Qualidade da Energia Elétrica é, nos dias de hoje, um dos temas mais relevantes para o setor elétrico. Dentro deste tema, encontra-se definidas a Qualidade do Produto e a Qualidade do Serviço, subáreas igualmente importantes sob o ponto de vista do atendimento dos consumidores e, também, sob o ponto de vista de operação e planejamento das distribuidoras de energia elétrica.

Em suma, os problemas definidos pela Qualidade do Produto são: distorções harmônicas, desequilíbrios, variações de tensão de curta duração, variações de tensão de longa duração, transitórios eletromagnéticos e flutuações de tensão. Todos os fenômenos citados influenciam diretamente nas redes elétricas, e causam desde paradas de operação de processos industriais até o desligamento de partes inteiras dos sistemas elétricos. Tais fenômenos, muitas das vezes, estão diretamente relacionadas ao comportamento das cargas elétricas utilizadas nas instalações dos consumidores finais.

Tendo em vista essas e outras características das cargas e dos sistemas elétricos, é necessário, antes de tudo, ressaltar a importância da medição das grandezas elétricas e do faturamento de energia. Tais procedimentos são de extrema importância para os consumidores e distribuidoras, uma vez que o montante de energia comprado/vendido está diretamente relacionado com o rendimento de ambas as partes. Dentro deste contexto, é de senso comum que os fenômenos da QEE (Qualidade da Energia Elétrica) afetam de alguma forma esses procedimentos.

Os distúrbios relacionados à QEE, a exemplo das distorções harmônicas e os desequilíbrios merecem destaque por serem fenômenos que sofreram notável intensificação de ocorrência nos últimos anos. Os harmônicos são associados com deformações nas formas de onda das tensões e

correntes e os desequilíbrios são distúrbios caracterizados, em se tratando de sistemas elétricos trifásicos, onde as fases apresentam módulos ou/e defasagens diferentes dos padrões estabelecidos.

Diante dos fenômenos citados nas redes de distribuição, as conceituações desenvolvidas ao longo dos anos, onde levam em consideração sistemas elétricos puramente senoidais e equilibrados, podem encontrar algumas limitações, no que concerne ao método de apuração e faturamento da energia elétrica, podendo ocasionar erros nos equipamentos de medição, prejudicando financeiramente a concessionária ou o consumidor final, no entanto, apesar de pesquisas terem comprovado tal correlação, ainda hoje não há um consenso de quais protocolos são necessários para a correta medição das grandezas elétricas.

O equipamento utilizado para faturamento da energia elétrica é o medidor de energia. No entanto, estes podem apresentar diferentes resultados para uma mesma situação, em se tratando de uma rede poluída, carregada de distorções harmônicas e desequilíbrios. Logo, percebe-se que cada medidor calcula as potências de formas distintas, seja ela para cálculo de potência ativa ou reativa, implicando diretamente no cálculo do fator de potência. Tal fato é explicado devido a implementação de diferentes algoritmos, adotados pelos fabricantes.

Diante desse contexto, existe uma preocupação em relação aos medidores de faturamento existentes no mercado, se de fato, quantificam a potência ativa e reativa de uma mesma forma, ou seja, quais os métodos de cálculos são empregados para quantificar a potência reativa e se existe isonomia em sua medição.

Tendo em vista as particularidades apresentadas, esse trabalho sugere uma metodologia para o cálculo das potências ativa e reativa e, conseqüentemente, do fator de potência. É apresentado que a inclusão das distorções harmônicas e dos desequilíbrios não se mostra adequado pois não integram o processo de conversão eletromecânica da energia elétrica. No entanto, vale destacar que as correntes harmônicas e componentes de sequência negativa e zero comprometem a capacidade de transferência de potência, ou seja, ocupam espaço no condutor, ocasionando efeitos indesejáveis, como sobrecargas, sobreaquecimentos provenientes da dissipação de calor, efeito Joule.

Com as considerações e conceitos solidificados em relação ao método de cálculo a ser proposto e, em conjunto com um parceiro tecnológico, implementou-se em um protótipo de medidor as metodologias utilizadas no setor elétrico, e adicionalmente, o método proposto nesse trabalho. Em seguida foram feitas algumas medições em diversas plantas industriais e comerciais, onde verificou-se que para os níveis de distorções harmônicas e desequilíbrios existentes na rede os desvios encontrados para potência ativa ficaram abaixo da classe de exatidão dos medidores, quando verificado a potência reativa as diferentes metodologias de cálculo apresentaram desvios significativos sendo esses ainda mais acentuados na presença de cargas do tipo forno a arco.

1.4 – Estrutura da dissertação

Além do capítulo introdutório, o presente trabalho encontra-se estruturado da seguinte forma:

Capítulo II Estado da Arte

O presente capítulo apresenta o estado da arte relacionado com o tema proposto, exibindo, de forma detalhada, as metodologias de cálculo de potências e fator de potência, bem como as metodologias de medição geralmente empregadas por fabricantes de medidores de energia.

Capítulo III Implementação computacional das metodologias de cálculo do fator de potência e análise crítica

Neste capítulo, as metodologias apresentadas e detalhadas, no capítulo II, serão implementadas no *software* MATLAB® para quantificação das mesmas em diferentes situações, as quais podem ser vivenciadas em um sistema elétrico convencional. Com base nos resultados quantitativos, serão feitas análises críticas acerca de cada uma das metodologias, afim de identificar consistências e inconsistências de cada uma delas.

Capítulo IV Testes de Desempenho dos Medidores Comerciais

Com o intuito de verificar o desempenho de medidores de energia elétrica conforme suas metodologias de cálculo empregadas, este capítulo apresenta os resultados dos testes em laboratório de alguns [medidores encontrados no mercado nacional. A partir das respostas verificadas, será feita uma análise da conformidade dos sinais aplicados e o resultados apresentados pelos equipamentos de medição e faturamento.

Capítulo V Proposição de Metodologia Para Cálculo de Fator de Potência

Este capítulo apresenta uma proposta de metodologia de cálculo de fator de potência desenvolvida com base nos resultados anteriormente expostos, afim de tornar padrão as estratégias de medição implementadas nos medidores comerciais.

Capítulo VI Implementação em Protótipo de Medidor e Medições de Teste

Após a proposição da metodologia de cálculo de fator de potência, apresenta-se um protótipo de medidor dotado da metodologia em pauta, que proporcionará resultados que serão comparados as demais metodologias, evidenciando, assim, os aspectos qualitativos da nova estratégia de cálculo.

Capítulo VII Conclusões

Por fim, são apresentadas as considerações finais acerca do trabalho desenvolvido.

Estado da Arte

2.1 – Considerações iniciais

O desenvolvimento de teorias sobre o comportamento da potência elétrica na presença de sinais distorcidos e desequilibrados é, sem dúvidas, um tema instigante de análises e merecedor de atenção. Já por volta de 1927, pesquisadores de diversas localidades somaram esforços no sentido do estabelecer um entendimento comum sobre o assunto. Porém, o fato é que, decorridas décadas, nenhum consenso pode ser considerado como universalmente aceito e estabelecido. De fato, o que se pode constatar na atualidade é que muitos resultados de pesquisas divergem entre si, o que se deve, sobremaneira, aos fundamentos e interpretação dados pelos diferentes grupos e autores.

Uma vez que analisar a totalidade dos trabalhos relacionados ao assunto, já publicados ao longo desses anos seria impraticável, este trabalho preza por explorar as teorias de autores mais influentes e que receberam maior notoriedade dentro do contexto do tema.

Isto posto segue que as discussões contempladas neste estudo, elaborado com base nas metodologias já existentes e devidamente reconhecidas no campo da engenharia elétrica, visto suas publicações nos mais diversos veículos de divulgação, são consonantes com as seguintes teorias e princípios:

- Definições Tradicionais (frequência fundamental); [1][2]
- Teoria de Budeanu (1927); [3]
- Teoria de Fryze (1932); [5]
- Teoria de Czarnecki (1984); [6]
- Teoria PQ (1984); [9]

- Teoria FBD - Fryze-Buchholz-Depenbrock (1993); [11]
- Teoria Emanuel (IEEE 1459-2010). [4]

Dentro desse cenário, na sequência são exploradas as nove metodologias destacadas, sendo que, para cada uma delas, são apresentados aspectos introdutórios, descrições, formulações e análises críticas.

2.2 – Metodologias mais tradicionais para formulação de Potência

2.2.1 – Definições Tradicionais (Frequência Fundamental)

Em 1893, Charles Proteus Steinmetz revolucionou o estudo de circuitos em corrente alternada [1], simplificando a sua análise ao utilizar números complexos e a representação fasorial. As contribuições desse pesquisador são, evidentemente, de importância indiscutível no contexto da engenharia elétrica.

Em 1897, Steinmetz definiu os três tipos de potências que usualmente conhecemos como: aparente (S), ativa (P) e reativa (Q). O mesmo autor também propôs o uso do “fator de potência” como sendo a razão entre a potência ativa e aparente [2].

Assumindo um sistema trifásico equilibrado com tensões e correntes não distorcidas, tem-se que:

$$v_a = \hat{V} \sin(\omega t + \alpha) \quad (2.1)$$

$$v_b = \hat{V} \sin(\omega t - 120^\circ + \alpha) \quad (2.2)$$

$$v_c = \hat{V} \sin(\omega t + 120^\circ + \alpha) \quad (2.3)$$

$$i_a = \hat{I} \sin(\omega t + \alpha - \theta) \quad (2.4)$$

$$i_b = \hat{I} \sin(\omega t - 120^\circ + \alpha - \theta) \quad (2.5)$$

$$i_c = \hat{I} \sin(\omega t + 120^\circ + \alpha - \theta) \quad (2.6)$$

A potência instantânea é, pois, definida como sendo:

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = p_p + p_q \quad (2.7)$$

A componente ativa de p , denominada p_p , pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} p_p = VI \cos(\theta) [1 - \cos(2\omega t + 2\alpha)] + VI \cos(\theta) [1 - \cos(2\omega t - 240^\circ + 2\alpha)] \\ + VI \cos(\theta) [1 - \cos(2\omega t + 240^\circ + 2\alpha)] = 3VI \cos(\theta) = P \end{aligned} \quad (2.8)$$

Já a componente reativa de p , nomeada p_q , é obtida a partir de:

$$p_p = -VI \sin(\theta) [1 - \cos(2\omega t + 2\alpha)] - VI \sin(\theta) [1 - \cos(2\omega t - 240^\circ + 2\alpha)] - VI \sin(\theta) [1 - \cos(2\omega t + 240^\circ + 2\alpha)] = 0 \quad (2.9)$$

De acordo com as equações (2.2) e (2.3), a contribuição de cada fase para a potência ativa pode ser expressa como:

$$P_a = P_b = P_c = VI \cos(\theta) \quad (2.10)$$

Enquanto que as potências reativas são:

$$Q_a = Q_b = Q_c = VI \sin(\theta) \quad (2.11)$$

Por fim, surge o conceito denominado por potência aparente, a qual é definida como:

$$S_a = S_b = S_c = \dot{V}\dot{I}^* = P_a + jQ_a \quad (2.12)$$

Onde a corrente $\dot{I}^* = I \angle \theta$ é o conjugado da corrente de linha $\dot{I} = I \angle -\theta$.

Para um sistema trifásico, tem-se, portanto:

$$P = 3P_a = 3VI \cos(\theta) \quad (2.13)$$

$$Q = 3Q_a = 3VI \sin(\theta) \quad (2.14)$$

$$S = P + jQ \quad (2.15)$$

Uma vez que se considera, neste momento, o sistema como sendo equilibrado e desprovido de distorções, pode-se então concluir que:

$$S = P + jQ = P_1 + jQ_1 = S_1 \quad (2.16)$$

O conceito de fator de potência (fp), nos termos acima postos, é definido como a relação entre P_1 e S_1 , como indicado a seguir.

$$fp_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (2.17)$$

As definições apresentadas são clássicas e perfeitamente aplicáveis em sistemas equilibrados, alimentados com tensão puramente senoidal e com cargas exclusivamente lineares.

O fator de potência (fp_1) está relacionado unicamente à defasagem entre tensão e corrente de frequência fundamental. Quando, porém, desequilíbrios e/ou distorções se fazem presentes, outras interações nos processos de transferência de energia surgem e as definições associadas ao modelo tradicional tornam-se insuficientes para compreensão dos fenômenos físicos que ocorrem nos circuitos elétricos em situações não ideais.

2.2.2 – Teoria de Budeanu

Em 1927, Constantin I. Budeanu apresentou os primeiros conceitos visando a adequação dos fundamentos atrelados com o transporte da energia elétrica sob condições tais que os sinais de tensão e corrente não fossem caracterizados das grandezas puramente senoidais. Sintetizando, a proposta reflexiva deste pesquisador, contida em [3], conduziram às considerações a seguir.

Uma dada corrente harmônica, expressa pelo seu correspondente valor eficaz, pode ser dividida em dois termos ortogonais:

$$I_h^2 = (I_h \cos(\theta_h))^2 + (I_h \sen(\theta_h))^2 \quad (2.18)$$

Onde θ_h é o ângulo de fase entre a correspondente tensão harmônica V_h e a mencionada corrente I_h .

Da equação (2.18), e consonante com os princípios já postos, a potência aparente seria, por conseguinte, dada por:

$$S^2 = V^2 I^2 = \sum_{h=1}^v V_h^2 \left\{ \sum_{h=1}^v [I_h \cos(\theta_h)]^2 \right\} + \sum_{h=1}^v V_h^2 \left\{ \sum_{h=1}^v [I_h \sen(\theta_h)]^2 \right\} \quad (2.19)$$

$$\sum_{h=1}^v A_h^2 \sum_{h=1}^v B_h^2 = \left(\sum_{h=1}^v A_h B_h \right)^2 + \sum_{m=1}^{v-1} \sum_{n=m+1}^v (A_m B_n - A_n B_m)^2 \quad (2.20)$$

Portanto:

$$\begin{aligned} S^2 &= \left(\sum_{h=1}^v V_h I_h \cos(\theta_h) \right)^2 + \left(\sum_{h=1}^v V_h I_h \sen(\theta_h) \right)^2 \\ &+ + \sum_{m=1}^{v-1} \sum_{n=m+1}^v [V_m I_n \cos(\theta_n) - V_n I_m \cos(\theta_m)]^2 \\ &+ + \sum_{m=1}^{v-1} \sum_{n=m+1}^v [V_m I_n \sen(\theta_n) - V_n I_m \sen(\theta_m)]^2 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Assim:

$$S^2 = \left(\sum_{h=1}^v V_h I_h \cos(\theta_h) \right)^2 + \left(\sum_{h=1}^v V_h I_h \sin(\theta_h) \right)^2 + \sum_{m=1}^{v-1} \sum_{n=m+1}^v [(V_m I_n)^2 + (V_n I_m)^2 - 2 V_m V_n I_m I_n \cos(\theta_m - \theta_n)] \quad (2.22)$$

Disto resulta que a potência aparente pode ser considerada como contendo três componentes distintas e ortogonais entre si:

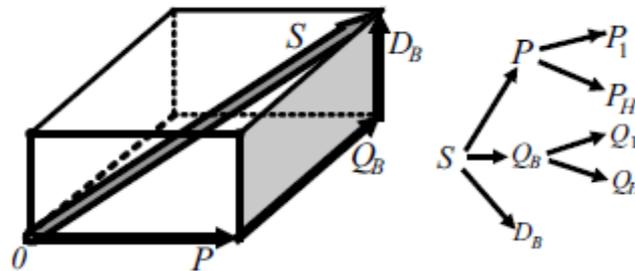


Figura 2.1 – Estratificação de potência aparente de circuitos elétricos segundo Constantin Budeanu [4].

$$S = \sqrt{P^2 + Q_B^2 + D_B^2} \quad (2.23)$$

O primeiro termo da equação (2.2.6) destina-se a contemplar a potência ativa total (P) envolvida no processo da transferência de energia. O segundo termo, por sua vez, representa uma potência reativa, em atenção à proposta estabelecida por Budeanu (Q_B). No que tange ao termo (D_B), este visa representar as contribuições associadas com as distorções presentes nas formas de onda das tensões e correntes.

$$P = \sum_{h=1}^v V_h I_h \cos(\theta_h) \quad (2.24)$$

$$Q_B = \sum_{h=1}^v V_h I_h \sin(\theta_h) \quad (2.25)$$

$$D_B = \sqrt{\sum_{m=1}^{v-1} \sum_{n=m+1}^v [(V_m I_n)^2 + (V_n I_m)^2 - 2 V_m V_n I_m I_n \cos(\theta_m - \theta_n)]} = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2} = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.26)$$

Por fim, o fator de potência, segundo a metodologia em pauta, é obtido de acordo com o equacionamento a seguir:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_B^2 + D_B^2}} \quad (2.27)$$

Não obstante o reconhecimento que a metodologia proposta por Budeanu é precursora das discussões relacionadas com a análise dos circuitos elétricos com tensões e correntes não-senoidais, a mesma não tem sido reconhecida como uma proposta aceita pela engenharia. Isto se deve ao fato que a metodologia aponta para uma potência reativa total (Q_B) que, para algumas situações (notadamente quando da presença de componentes não-senoidais de tensão e/ou corrente), se mostra inferior à potência reativa fundamental (Q_1) do circuito. Da mesma forma, há críticas quanto a definição e os fundamentos do que denominou por componente D_B , visto que tal grandeza, enquanto dependente do valor de Q_B , leva a valores igualmente incoerentes.

2.2.3 – Teoria de Fryze

Em 1932, Stanislaw Fryze propôs uma modelagem [5] acerca das definições de potências e fator de potência quando da presença de sinais não ideais.

Basicamente, Fryze sugeriu a decomposição da corrente em duas componentes ortogonais. Uma delas com a mesma forma de onda e em fase com o sinal de tensão (componente ativa), e outra, associada com uma parcela residual (que foi denominada por componente não ativa).

Dessa forma, a componente da corrente instantânea que apresenta a forma de onda da tensão, chamada de corrente ativa instantânea (i_a), está dimensionada para se obter a potência ativa fornecida pela tensão (v) e pela corrente instantânea real (i).

Em (2.28) e (2.29) são apresentadas as expressões genéricas de v e i , respectivamente, enquanto (2.30) exhibe a maneira de se obter a parcela ativa da corrente total.

$$v = \sum_h \hat{V}_h \text{sen}(h\omega t + \alpha_h) \quad (2.28)$$

$$i = \sum_h \hat{I}_h \text{sen}(h\omega t + \alpha_h - \theta_h) \quad (2.29)$$

$$i_a = \sum_h i_{ah} = Gv = G \sum_h \hat{V}_h \text{sen}(h\omega t + \alpha_h) \quad (2.30)$$

O coeficiente G representa uma condutância com as seguintes propriedades matemáticas:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{i_{a1}}{v_1} = \dots = \frac{i_{ah}}{v_h} = \dots = \frac{P}{V^2} = \frac{I_a}{V} \quad (2.31)$$

A segunda parcela da corrente total instantânea, denominada de componente não ativa (i_b), pode ser obtida, então, a partir de (2.3.5).

$$i_b = i - i_a \quad (2.32)$$

A potência ativa é calculada a partir da equação (2.33), ou, caso se queira partir da definição de i_a , pode-se utilizar a expressão (2.33).

$$P = G \sum_h V_h^2 = GV^2 \quad (2.33)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T vi \, dt = \frac{1}{T} \int_0^T vi_a \, dt \quad (2.34)$$

Seguindo a linha de raciocínio de (2.34), ao encontrar a potência associada à corrente i_b , é possível concluir que seu valor médio é nulo, como indicado em (2.35).

$$\frac{1}{T} \int_0^T vi_b \, dt = \frac{1}{T} \int_0^T v(i - i_a) \, dt = 0 \quad (2.35)$$

A partir destas análises Fryze concluiu que uma carga suprida por uma fonte de tensão não senoidal pode ser modelada com a ajuda de uma condutância linear G em paralelo com uma condutância variável com o tempo $G'(t) = i_b(t)/v(t) = 1/R'(t)$, o que também pode ser representado por uma fonte de corrente igual a i_b . A Figura 2.2 representa um circuito equivalente representativo dos conceitos e definições formuladas por Fryze.

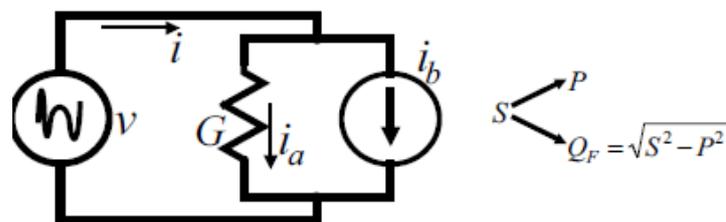


Figura 2.2 – Circuito representativo das definições segundo Fryze [4].

A relação entre os valores eficazes I , I_a e I_b pode ser obtida através da equação:

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (i_a^2 + i_b^2) \, dt = \frac{1}{T} \int_0^T (i_a^2 + i_b^2 + 2i_a i_b) \, dt \quad (2.36)$$

Também, (2.37) mostra que o valor médio da integral do termo $i_a i_b$ é nulo.

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_a i_b dt = G \frac{1}{T} \int_0^T v i_b dt = 0 \quad (2.37)$$

Então, (2.38) expressa a relação procurada entre os valores eficazes das correntes de acordo com o modelo de Fryze.

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (i_a^2 + i_b^2) dt = I_a^2 + I_b^2 \quad (2.38)$$

Em decorrência dos desenvolvimentos apresentados, é possível chegar às formulações para as potências aparente, ativa e reativa, como mostram (2.39), (2.40) e (2.41), respectivamente.

$$S = \sqrt{P^2 + Q_F^2} = VI \quad (2.39)$$

$$P = VI_a \quad (2.40)$$

$$Q_F = VI_b \quad (2.41)$$

No que diz respeito ao fator de potência, além da definição básica (FP), exibida em (2.42), Fryze também define o conceito de fator de potência não ativo (FP_b), como exposto em (2.43).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{I_a}{I} \quad (2.42)$$

$$FP_b = \frac{Q_F}{S} = \frac{I_b}{I} \quad (2.43)$$

Por fim, tais definições de fator de potência (PF e PF_b) podem ser relacionadas conforme mostrado em (2.44).

$$PF = \sqrt{1 - (PF_b)^2} \quad (2.44)$$

Como ressaltado, a proposição de Fryze apresentou um significativo avanço ao estado da arte, pois introduziu o conceito de ortogonalidade não entre as parcelas de potência, mas sim em sua origem, ou seja, entre as componentes da corrente. Além disso, dispensou a necessidade de realização de análises em frequência, como vinha sendo proposto por autores da época. Contudo, a proposta se fundamentou em um modelo bastante simplificado, o qual não permite o aprofundamento dos estudos sobre cada tipo de fenômeno físico envolvido na transferência de energia, bem como não oferece meios para a monitoração visando à tarifação ou à compensação “seletiva” de determinadas parcelas de corrente e potência.

Nesse sentido, o modelo de Fryze não proporciona informações claras a respeito das componentes de potência ativa e reativa de frequência fundamental, uma vez que $\sum_h P_h = \sum_h P_{ah} = P$, porém $P_1 = V_1 I_1 \cos\theta_1 \neq P_{a1}$ e $P_h \neq P_{ah}$. E ainda, o modelo não foi prontamente desenvolvido definido para sistemas polifásicos.

Apesar do modelo ora referido ter apresentado um forte impacto nas discussões sobre o assunto, desenvolvidas a partir da segunda metade do século passado, o procedimento concebido não foi adotado em escala mundial devido a uma série de dificuldades associadas à sua concepção física. Destaca-se, não obstante a isto, que a teoria proposta por Fryze apresentou aspectos interessantes e inovadores para a época, uma vez que é baseada em desenvolvimentos no domínio do tempo, não necessitando da decomposição do sinal em suas componentes harmônicas. Este último fator era considerado especialmente atrativo por volta de 1930, devido à indisponibilidade de instrumentos capazes de realizar análises envolvendo séries de Fourier.

2..2.4 – Teoria de Czarnecki

Em 1984 Leszek Czarnecki apresentou uma metodologia [6] cujas primícias estavam enraizadas às definições apresentadas por Fryze. Depois de tecer diversas opiniões críticas a respeito das definições de Budeanu [7], Czarnecki propôs uma abordagem desenvolvida no domínio da frequência, que se aplica tanto a sistemas monofásicos como polifásicos. A proposta se baseia em uma nova forma de decomposição de correntes e potências, a qual busca a compreensão dos fenômenos físicos associados à operação dos sistemas elétricos quando da presença de sinais não ideais.

Inicialmente Czarnecki propôs a decomposição da corrente em três componentes, as quais são denominadas: corrente ativa instantânea (i_a), corrente reativa instantânea (i_r) e corrente de dispersão instantânea (i_s). A Figura 2.3 apresenta o circuito representativo que congrega os conceitos apresentados.

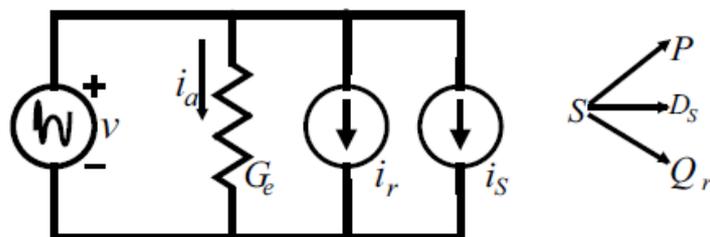


Figura 2.3 – Circuito representativo das definições segundo Czarnecki [4].

A corrente ativa instantânea (i_a) possui, exatamente, a mesma definição apresentada por Fryze, ou seja, se apresenta constituída pela parcela da corrente que possui a mesma forma de onda da tensão. Assim, ao considerar uma tensão instantânea (v) e uma corrente instantânea (i),

representadas respectivamente por (2.45) e (2.46), a componente ativa da corrente (i_a) pode ser obtida a partir de (2.47).

$$v = \sum_h \hat{V}_h \text{sen}(h\omega t + \alpha_h) \quad (2.45)$$

$$i = \sum_h \hat{I}_h \text{sen}(h\omega t + \alpha_h - \theta_h) \quad (2.46)$$

$$i_a = \sum_h i_{ah} = G_e v = G_e \sum_h \hat{V}_h \text{sen}(h\omega t + \alpha_h) \quad (2.47)$$

O coeficiente G_e representa uma condutância como mostra (2.48):

$$G = \frac{1}{R} = \frac{i_{a1}}{v_1} = \dots = \frac{i_{ah}}{v_h} = \dots = \frac{P}{V^2} = \frac{I_a}{V} \quad (2.48)$$

Alternativamente, pode-se reescrever (2.47) em função agora do valor eficaz da corrente ativa, como mostra (2.49).

$$I_a = G_e V = G_e \sum_h V_h^2 \quad (2.49)$$

A segunda parcela da corrente, nomeada de corrente reativa, pode ser calculada com o auxílio da expressão (2.50).

$$I_r = \sqrt{\sum_h (B_{he} V_h)^2} \quad (2.50)$$

O coeficiente B_{he} representa uma susceptância equivalente, a qual é obtida a partir de (2.51).

$$B_{he} = -\frac{Q_h}{V_h^2} \quad (2.51)$$

A terceira parcela da corrente, ou seja, a corrente de dispersão, esta parcela é calculada por meio de (2.52).

$$I_s = \sqrt{\sum_h (G_{he} - G_e)^2 V_h^2} \quad (2.52)$$

Para o cálculo da condutância G_{he} utiliza-se da expressão (2.53).

$$G_{he} = \frac{P_h}{V_h^2} \quad (2.53)$$

Posteriormente, ao estender a metodologia para sistemas polifásicos, Czarnecki propõe ainda a existência de mais duas parcelas de corrente, quais sejam: uma primeira destinada a representar um possível desbalanço das cargas (i_u) e, uma outra, visando as correntes harmônicas (i_g). Estas encontram-se relacionada às distorções que surgem devido a não linearidade da carga, ou seja, aquelas componentes com frequências distintas da tensão.

As componentes i_u e i_g podem ser obtidas a partir das expressões (2.54) e (2.55), respectivamente.

$$I_u = \sqrt{\sum_h (I_h^2 - (G_{he}^2 + B_{he}^2) V_h^2)} \quad (2.54)$$

$$I_g = \sqrt{\sum_{h \in M} I_h^2} \quad (2.55)$$

Onde M representa o conjunto de componentes harmônicas geradas exclusivamente pela carga não linear.

Com base nessas definições, a relação entre as cinco parcelas de corrente apresentadas é expressa por (2.56).

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 + I_s^2 + I_u^2 + I_g^2 \quad (2.56)$$

Multiplicando ambos os termos da equação (2.57) por V^2 , obtém-se as parcelas de potência associadas a cada uma das componentes de corrente. Isto é indicado pelas expressões (2.57) e (2.58).

$$V^2 I^2 = V^2 I_a^2 + V^2 I_r^2 + V^2 I_s^2 + V^2 I_u^2 + V^2 I_g^2 \quad (2.57)$$

$$S^2 = P^2 + Q_r^2 + D_s^2 + D_u^2 + D_g^2 \quad (2.58)$$

Finalmente, o valor do fator de potência pode ser obtido a partir de (2.59).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{I_a}{I} \quad (2.59)$$

Comparativamente às demais metodologias existentes na ocasião das proposições feitas por Czarnecki, sua teoria resulta em um bom detalhamento dos fenômenos envolvidos na operação dos sistemas elétricos, entretanto apresenta maior complexidade no equacionamento no domínio da frequência.

Observa-se que determinados conceitos, como da corrente dispersa, são matematicamente bem definidos, no entanto não encontram suporte nas teorias clássicas. Assim, o entendimento dos procedimentos propostos não se dá a partir da identificação de parcelas com correspondências físicas, mas sim, apenas como entidades matemáticas associadas ao comportamento da carga.

Nota-se ainda que, por ter sido derivada da teoria de Fryze e basear-se no conceito de corrente ativa (I_a), esta proposição não abrange a obtenção da potência ativa fundamental separadamente, ou seja, $P_1 = V_1 I_1 \cos \theta_1 \neq P_{a1}$.

2.2.5 – Teoria PQ

Em 1982, Akagi, Kanazawa e Nabae publicaram os primeiros conceitos atrelados com a teoria conhecida como Teoria de Potência Instantânea PQ [8]. Os seus fundamentos foram divulgados numa conferência internacional [9] e, em 1984, um trabalho mais completo foi publicado no IEEE [10].

A teoria de potência ativa e reativa instantânea, mais conhecida por teoria PQ, foi desenvolvida com o propósito de estabelecer os fundamentos para o controle de filtros ativos [8]. Seus desenvolvimentos contemplam o emprego da Transformada de Clarke das tensões e correntes de sistemas trifásicos (a, b, c) para as coordenadas ortogonais (α , β , 0). As potências em sistemas trifásicos a três fios são tratadas na forma de duas componentes instantâneas: a real (p) e a imaginária (q). Introduzindo a potência instantânea de sequência zero, p_0 , a teoria PQ pode ser então estendida para sistemas trifásicos a quatro fios.

O primeiro passo para o estabelecimento da metodologia consiste em realizar a transformação das variáveis do sistema abc para o sistema nas coordenadas α , β , 0 através da Transformação de Clarke. Assim, o vetor de tensões de fase, nas coordenadas α , β , 0, é dado por:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = C_1 \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

Observa-se que, para sistemas trifásicos a três condutores, as tensões são medidas em relação ao ponto estrela virtual e, para sistemas a quatro condutores, estas grandezas são determinadas em relação ao condutor de retorno (neutro). Similarmente, as correntes instantâneas i_a , i_b e i_c são, também, transformadas para as coordenadas α , β , 0.

A Teoria PQ descreve as propriedades de potência de sistemas trifásicos a quatro condutores por meio de três principais componentes de potências instantâneas: a real (p), a imaginária (q) e a de sequência zero (p_0). A saber:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

A composição de p_0 e p resulta na potência trifásica instantânea tradicional ativa (watt):

$$p_{3\phi} = p + p_0 = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (2.62)$$

Na sequência, os autores introduziram o conceito de potência instantânea imaginária q , em Volt-Ampère-Imaginário (vai). Esta é definida como sendo:

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta \quad (2.63)$$

A partir das potências instantâneas p e q , as correntes ortogonais i_α e i_β podem ser decompostas em correntes ativas instantâneas nos eixo α e β ($i_{\alpha p}$ e $i_{\beta p}$) e correntes reativas instantâneas nos eixos α e β ($i_{\alpha q}$ e $i_{\beta q}$), como segue:

$$i_{\alpha p} = \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}^2} p \quad (2.64)$$

$$i_{\beta p} = \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}^2} p \quad (2.65)$$

$$i_{\alpha q} = \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}^2} q \quad (2.66)$$

$$i_{\beta q} = -\frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}^2} q \quad (2.67)$$

$$v_{\alpha\beta}^2 = v_\alpha^2 + v_\beta^2 \quad (2.68)$$

Portanto, as correntes instantâneas de sequência zero, ativa e reativa, de cada fase, podem ser calculadas em termos de suas coordenadas originais, por meio da transformação inversa de Clarke:

$$\begin{bmatrix} i_{a0} \\ i_{b0} \\ i_{c0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = C_1 \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} = C_2 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

$$\begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = C_2 \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

Assim, as correntes trifásicas instantâneas (a, b e c) podem ser consideradas como decompostas nos termos que se seguem:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{a0} \\ i_{b0} \\ i_{c0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

Em consonância com a Teoria PQ, as potências instantâneas poderiam ser, ainda, decompostas em:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (2.73)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (2.74)$$

Onde \bar{p} e \tilde{p} representam as componentes média e oscilante de p , enquanto que \bar{q} e \tilde{q} representam as componentes média e oscilante de q .

Supondo-se que as partes oscilantes de p e q possam ser relacionadas à ocorrência de tensões e correntes desequilibradas e/ou distorcidas, a corrente instantânea ativa também pode ser decomposta nas componentes médias \bar{x} e \tilde{x} oscilatórias, como segue:

$$i_{ap} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \bar{p} + \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \tilde{p} = i_{\alpha \bar{p}} + i_{\alpha \tilde{p}} \quad (2.75)$$

$$i_{\beta p} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \bar{p} + \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \tilde{p} = i_{\beta \bar{p}} + i_{\beta \tilde{p}} \quad (2.76)$$

Isto resulta nas coordenadas a, b e c:

$$\begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} = C_2 \begin{bmatrix} 0 \\ i_{\alpha \bar{p}} \\ i_{\beta \bar{p}} \end{bmatrix} + C_2 \begin{bmatrix} 0 \\ i_{\alpha \tilde{p}} \\ i_{\beta \tilde{p}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha \bar{p}} \\ i_{\beta \bar{p}} \\ i_{c \bar{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha \tilde{p}} \\ i_{\beta \tilde{p}} \\ i_{c \tilde{p}} \end{bmatrix} \quad (2.77)$$

Assim, as correntes instantâneas de fase conduzem à seguinte relação:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{a0} \\ i_{b0} \\ i_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{a\bar{p}} \\ i_{b\bar{p}} \\ i_{c\bar{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{a\tilde{p}} \\ i_{b\tilde{p}} \\ i_{c\tilde{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{a0} \\ i_{b0} \\ i_{c0} \end{bmatrix} \quad (2.78)$$

Finalmente, de acordo com a Teoria PQ, as seguintes componentes de potência podem ser calculadas para o caso de sistemas trifásicos a três ou quatro condutores:

- P valor médio de p ($P = \bar{p}$);
- P_0 valor médio de p_0 ($P_0 = \bar{p}_0$);
- Q valor médio de q ($Q = \bar{q}$);
- \tilde{P} valor eficaz de \tilde{p} ;
- \tilde{P}_0 valor eficaz de \tilde{p}_0 ;
- \tilde{Q} valor eficaz de \tilde{q} .

É importante observar que a parcela de potência ativa média (\bar{p}) pode ser determinada através da aplicação de filtros passa-baixa na potência instantânea, não necessitando da informação do período dos sinais para o cálculo de seu valor médio. Esta característica permite a aplicação da teoria PQ, inclusive, para condições onde a frequência da rede apresente variações, como para o caso de micro redes de energia elétrica.

A Teoria PQ se apresenta como uma estratégia muito conhecida e aceita pela comunidade, com destaque pelos profissionais que labutam no campo da eletrônica de potência e seus reconhecidos recursos e dispositivos. Alguns autores tendem a considerá-la como uma ferramenta apropriada não apenas para o controle de filtros ativos, mas também, para as definições e/ou entendimento das propriedades e conceitos associados com as potências elétricas sob condições distorcidas e desequilibradas.

Um aspecto meritório de destaque refere-se ao fato que, do ponto de vista, por exemplo, da instrumentação e monitoração dos distúrbios na qualidade de energia, este procedimento de análise não permite, facilmente, separar e identificar a origem dos fenômenos que contribuem para a degradação dos indicadores de qualidade quando estes se fazem simultaneamente presentes.

Finalmente, vale destacar que o trabalho desenvolvido por Akagi e coautores se mostra, indiscutivelmente, numa metodologia de cálculo atrativa e se firma como uma grande contribuição ao tema aqui focado.

2.2.6 – Teoria FBD (Fryze-Buchholz-Depenbrock)

Em 1962, o Prof. Manfred Depenbrock desenvolveu uma metodologia de cálculo aplicável à sistemas elétricos constituídos por N condutores. Esta proposta, no domínio do tempo, utilizou como princípio, os trabalhos de Fryze e de Buchholz e as leis tradicionais aplicáveis aos circuitos elétricos.

O trabalho em pauta introduziu a consideração da corrente circulante pelo condutor neutro e conceitos relacionados com o que denominou por “power currents” e “powerless currents”, inovou com a introdução do “virtual star point” e, agrupando tais fundamentos, propôs o Método FBD (Fryze-Buchholz-Depenbrock), o qual foi difundido no mundo após sua publicação no IEEE [11] em 1993.

Depenbrock desenvolveu seu trabalho tendo em mente que as correntes não-ativas não contribuem para a transferência de energia de um sistema, sendo relacionadas apenas com perdas e problemas de interferência eletromagnética [12]. Assim, concluiu que as potências não-ativas são grandezas de importância secundária, uma vez que estas são derivadas das correntes não-ativas. Vale ressaltar que apenas a corrente ativa não se apresentou com controvérsias em relação ao estado da arte àquela época. Também, é importante reconhecer que a sua estratégia da decomposição da corrente não ativa em sub-componentes se mostrou relevante para diversas aplicações, como a grandeza focada nesta dissertação.

A proposta ora em foco tomou por base o fato que as componentes de corrente e tensão não senoidais podem ser separadas nos termos que se seguem.

2.2.6.1 – Circuitos monofásicos não-senoidais

Para circuitos monofásicos, as principais equações para as componentes de tensão e de corrente em circuitos monofásicos não-senoidais são dadas a seguir:

$$i = i_1 + i_H \quad (2.79)$$

$$i_1 = \hat{I}_1 \text{sen}(\omega t + \alpha_1 - \theta_1) \quad (2.80)$$

$$i_H = \sum_{h \neq 1} \hat{I}_h \text{sen}(h\omega t + \alpha_h - \theta_h) \quad (2.81)$$

$$v = v_1 + v_H \quad (2.82)$$

$$v_1 = \hat{V}_1 \text{sen}(\omega t + \alpha_1) \quad (2.83)$$

$$v_H = \sum_{h \neq 1} \hat{V}_h \text{sen}(h\omega t + \alpha_h) \quad (2.84)$$

No que tange à corrente i_1 esta é ainda separada em duas componentes: i_{p1} (em fase) e i_{q1} (em quadratura).

$$i = i_{p1} + i_{q1} \quad (2.85)$$

$$i_{p1} = \hat{I}_1 \cos(\theta_1) \text{sen}(\omega t + \alpha_1) \quad (2.86)$$

$$i_{q1} = -\hat{I}_1 \text{sen}(\theta_1) \cos(\omega t + \alpha_1) \quad (2.87)$$

$$I_{p1} = I_1 \cos(\theta_1) \quad (2.96)$$

$$I_{q1} = I_1 \sen(\theta_1) \quad (2.97)$$

As correntes instantâneas também relacionadas com o diagrama fasorial são dadas pelas equações a seguir:

$$i_1 = i_{a1} + i_{b1} \quad (2.98)$$

$$i_{v1} = \Delta G_1 v_1 \quad (2.99)$$

$$i_{b1} = i_{v1} + i_{q1} \quad (2.100)$$

A corrente total i_v é dada por:

$$i_v = i_{v1} + i_{vH} \quad (2.101)$$

$$i_{vH} = G_H v_H - G v_H = (G_H - G) v_H = \Delta G_H v_H \quad (2.102)$$

$$G_H = \frac{P_H}{V_H^2} \quad (2.103)$$

$$I_v = \sqrt{I_{v1}^2 + I_{vH}^2} \quad (2.104)$$

$$I_{vH} = |\Delta G_H| V_H \quad (2.105)$$

A corrente total de distorção é dada por:

$$i_D = i_b + i_{q1} = i - i_a - i_{q1} \quad (2.106)$$

Esta corrente está associada a uma potência não ativa que foi separada da corrente reativa.

$$i = i_a + i_b = G(v_1 + v_H) + i_b \quad (2.107)$$

$$i = i_1 + i_H = i_{p1} + i_{q1} + i_H \quad (2.108)$$

$$i_b = i - i_a = (i_{p1} + i_{q1} + i_H) - (G v_1 + G v_H) \quad (2.109)$$

$$= i_{v1} + i_{q1} + i_H - G v_H \quad (2.110)$$

$$i_b = i_{v1} + i_{q1} + i_{vH} - i_N \quad (2.111)$$

$$i_D = i_b - i_{q1} = i_{v1} + i_{vH} + i_N = i_v + i_N \quad (2.112)$$

$$i_D = i_b - i_{q1} = i_{v1} + i_{vH} + i_N = i_v + i_N \quad (2.113)$$

$$Q^2 = (V I_{q1})^2 = (V_1^2 + V_H^2) I_{q1}^2 = Q_1^2 + Q_c^2 \quad (2.114)$$

Baseadas nas correntes i_{a1} , i_{aH} , i_{q1} , i_{v1} , i_{vH} e i_N , as formulações para as potências são apresentadas a seguir:

$$S = VI = V\sqrt{I_{a1}^2 + I_{aH}^2 + I_{q1}^2 + I_{v1}^2 + I_{vH}^2 + I_N^2} \quad (2.115)$$

$$S^2 = P^2 + Q_F^2 \quad (2.116)$$

$$P = VI_a = V\sqrt{I_{a1}^2 + I_{aH}^2} \quad (2.117)$$

$$Q_F = VI_b \quad (2.118)$$

$$Q_F = \sqrt{D_D^2 + Q^2} \quad (2.119)$$

$$D_D = VI_D \quad (2.120)$$

$$D_D = \sqrt{D_C^2 + D_R^2} \quad (2.121)$$

$$D_C = VI_V = V\sqrt{I_{v1}^2 + I_{vH}^2} \quad (2.122)$$

$$D_R = VI_N \quad (2.123)$$

$$Q = \sqrt{Q_1^2 + Q_C^2} \quad (2.124)$$

$$Q = VI_{q1} = I_{q1}\sqrt{V_1^2 + V_H^2} \quad (2.125)$$

$$S = \sqrt{P^2 + D_C^2 + D_R^2 + Q_1^2 + Q_C^2} \quad (2.126)$$

A resolução da Potência Aparente segundo Depenbrock é representada na Figura 2.5.

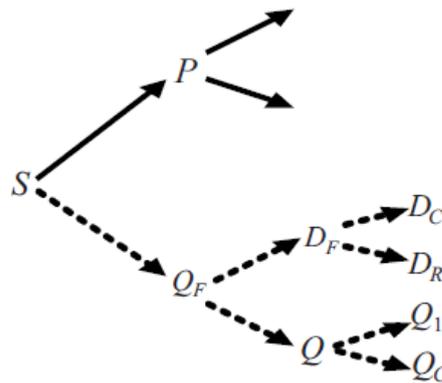


Figura 2.5 – Definição de potência aparente segundo Depenbrock [4].

2.2.6.2 – Circuitos trifásicos não-senoidais

Considerando um sistema trifásico suprindo uma carga desequilibrada, temos:

$$i_a + i_b + i_c + i_N = 0 \quad (2.127)$$

A análise é baseada para um equivalente de um sistema trifásico onde um ponto virtual de neutro é usado como ponto de referência. O ponto virtual de neutro tem que seguir as seguintes propriedades:

- A linha para a tensão do neutro v_{AN} , v_{BN} , v_{CN} permaneça inalterada;

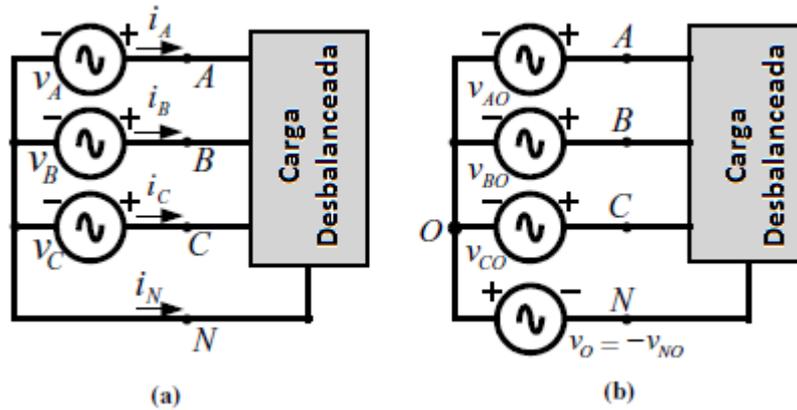


Figura 2.6 – Método FBD: (a) Circuito atual (b) Circuito equivalente com o ponto virtual de neutro [4].

- O nó N é considerado o terminal da quarta fase;
- As quatro tensões de fase seguem a seguinte relação:

$$v_{AO} + v_{BO} + v_{CO} + v_{NO} = 0 \quad (2.128)$$

$$v_{ON} = v_O \quad (2.129)$$

$$v_{AN} - v_O + v_{BN} - v_O + v_{CN} - v_O - v_O = 0 \quad (2.130)$$

$$v_{NO} = -v_O = -\frac{1}{4}(v_{AN} + v_{BN} + v_{CN}) \quad (2.131)$$

A tensão de fase usando o neutro artificial:

$$v_{AO} = v_A - v_O = v_{AN} - \frac{1}{4}(v_{AN} + v_{BN} + v_{CN}) \quad (2.132)$$

$$v_{BO} = v_B - v_O = v_{BN} - \frac{1}{4}(v_{AN} + v_{BN} + v_{CN}) \quad (2.133)$$

$$v_{CO} = v_C - v_O = v_{CN} - \frac{1}{4}(v_{AN} + v_{BN} + v_{CN}) \quad (2.134)$$

A tensão de linha usando o neutro artificial não é alterada:

$$v_{AB} = v_{AO} - v_{BO} = (v_A - v_O) - (v_B - v_O) = v_A - v_B \quad (2.135)$$

Isso significa que as correntes de linha i_A , i_B , i_C , e i_{AN} também permanecem inalterados. Além disso, o valor da potência instantânea p não é afetada por v_O ,

$$p = v_{AO}i_A + v_{BO}i_B + v_{CO}i_C - v_Oi_N \quad (2.136)$$

$$p = v_Ai_A + v_Bi_B + v_Ci_C - v_O(i_A + i_B + i_C + i_N) \quad (2.137)$$

$$p = v_Ai_A + v_Bi_B + v_Ci_C \quad (2.138)$$

Cada uma das quatro impedâncias do método de Depenbrock é suprida com uma potência aparente:

$$S_k = V_k I_k^* = P_k + jQ_k; k = A, B, C, N \quad (2.139)$$

O processo seguinte é similar aos cálculos realizados para um sistema monofásico demonstrando anteriormente.

Depenbrock tem sido um dos grandes responsáveis pela divulgação da potência aparente de Buchholz, bem como sobre a necessidade de definir um “ponto de referência virtual” para as medidas das tensões também sugeridas por Buchholz.

Em sistemas trifásicos com condutor de retorno (neutro), cargas desbalanceadas e/ou não lineares fazem com que flua corrente no condutor de neutro e de acordo com Depenbrock, tal condutor deve ser tratado como um condutor de fase.

O ponto estrela virtual pode ser bastante interessante em algumas aplicações, como medição das tensões em sistemas trifásicos a três condutores, onde não há presença do condutor neutro e, normalmente, não são medidas as tensões da fase. No entanto, na presença de componentes homopolares as medidas das tensões para o ponto estrela virtual podem não representar os valores eficazes ou os valores instantâneos das tensões sobre os terminais da carga.

A Teoria FBD tem sua origem na área de compensação de distúrbios, embora, com uma definição mais simples e sem o uso de transformações de coordenadas, tais como, $\alpha\beta 0$; $dq0$, etc. No entanto, esta teoria pode apresentar algumas limitações em termos de interpretação de fenômenos físicos, por exemplo, baseado no fato de não separar a componente reativa e a componente de desbalanço da corrente total.

Depenbrock apresenta uma metodologia, que não só formula uma definição de potências e propõe uma divisão das mesmas, como também estabelece as bases para a determinação de um circuito equivalente e, portanto, permite a compensação de potência não ativa [13].

2.2.7 – IEEE 1459-2010

A metodologia proposta por Emanuel, e utilizada na norma IEEE 1459-2010 [14], expõe as definições e conceitos aos usuários que desejam realizar medições e projetar medidores de energia e potência elétrica. Basicamente, a norma apresenta as formulações relacionadas com circuitos

monofásicos senoidais, circuitos monofásicos não-senoidais, circuitos trifásicos senoidais balanceados, circuitos senoidais desbalanceados e circuito não-senoidais desbalanceados.

Para a finalidade dessa dissertação de mestrado, julga-se necessário apenas a descrição das formulações de circuito monofásicos não-senoidais e de circuito trifásicos não-senoidais desbalanceados, uma vez que essas representam a realidade dos circuitos encontrados nos sistemas elétricos reais.

2.2.7.1 – Circuitos monofásicos não-senoidais

Para condições de regime permanente, uma tensão/corrente instantânea periódica e não-senoidal possui duas componentes distintas:

$$v = v_1 + v_H \quad (2.140)$$

$$i = i_1 + i_H \quad (2.141)$$

$$v_1 = \sqrt{2}V_1 \text{sen}(\omega t - \alpha_1) \quad (2.142)$$

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \text{sen}(\omega t - \beta_1) \quad (2.143)$$

$$v_H = V_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_h \text{sen}(\omega t - \alpha_h) \quad (2.144)$$

$$i_H = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \text{sen}(\omega t - \beta_h) \quad (2.145)$$

Nessas condições, a potência instantânea é dada a seguir, sendo p_a denominada de potência instantânea ativa, e p_q de potência instantânea reativa:

$$p = vi \quad (2.146)$$

$$p = p_a + p_q \quad (2.147)$$

$$p_a = V_0 I_0 + \sum_h V_h I_h \cos(\theta_h) [1 - \cos(2h\omega t - 2\alpha_h)] \quad (2.148)$$

$$p_q = - \sum_h V_h I_h \text{sen}(\theta_h) \text{sen}(2h\omega t - 2\alpha_h) + 2 \sum_n \sum_{m, m \neq n} V_m I_n \text{sen}(m\omega t - \alpha_m) \text{sen}(n\omega t - \alpha_n) + \sqrt{2}V_0 \sum_h I_h \text{sen}(h\omega t - \beta_h) + \sqrt{2}I_0 \sum_h V_h \text{sen}(h\omega t - \alpha_h) \quad (2.149)$$

A potência ativa, propriamente dita, é dada por:

$$P = P_1 + P_H \quad (2.150)$$

$$P_1 = V_1 I_1 \cos(\theta_1) \quad (2.151)$$

$$P_H = V_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos(\theta_h) \quad (2.152)$$

A potência reativa fundamental, por sua vez, é dada por:

$$Q_1 = V_1 I_1 \sen(\theta_1) \quad (2.153)$$

De posse das grandezas já definidas, a norma define algumas variáveis a partir da potência aparente, como se segue (potência aparente fundamental (S_1), potência aparente não fundamental (S_N), potência de distorção de corrente (D_I), potência de distorção de tensão (D_V), potência aparente harmônica (S_H), potência harmônica de distorção (D_H), potência não ativa (N):

$$S^2 = (VI)^2 = (V_1^2 + V_H^2)(I_1^2 + I_H^2) = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 \quad (2.154)$$

$$S_1 = V_1 I_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (2.155)$$

$$S_N^2 = S^2 - S_1^2 = D_I^2 + D_V^2 + S_H^2 \quad (2.156)$$

$$D_I = V_1 I_H \quad (2.157)$$

$$D_V = V_H I_1 \quad (2.158)$$

$$S_H = V_H I_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2} \quad (2.159)$$

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (2.160)$$

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.161)$$

Finalmente, com todas as grandezas definidas, a norma define as formas de cálculo do fator de potência (fator de potência fundamental (FP_1) e fator de potência (FP)), como se segue:

$$FP_1 = \cos(\theta_1) = \frac{P_1}{S_1} \quad (2.162)$$

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_N^2}} = \frac{P_1/S_1 [1 + P_H/P_1]}{\sqrt{1 + \left(\frac{S_N}{S_1}\right)^2}} \quad (2.163)$$

Para visualização das potências definidas, segue a Figura 2.7.

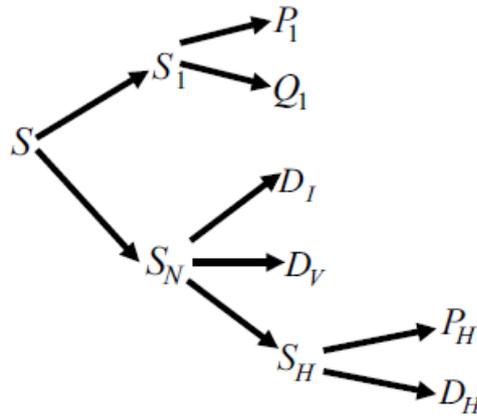


Figura 2.7 – Estratificação de potência aparente de circuitos monofásicos não-senoidais segundo a metodologia proposta por Emanuel (IEEE 1459-2010) [4].

2.2.7.2 – Circuitos trifásicos não-senoidais desbalanceados

Com o objetivo de definir os termos relacionados com circuitos trifásicos não-senoidais desbalanceados, a proposta metodológica apresentada por Emanuel traz uma conjuntura dos termos definidos para circuitos monofásicos não-senoidais e dos termos definidos para circuitos trifásicos não-senoidais desbalanceados.

Em se tratando de circuitos trifásicos desequilibrados com quatro fios, destaca-se a presença das correntes de linha e da corrente de neutro. Nesse sentido, a norma propõe que o circuito em pauta seja substituído por um circuito hipotético, o qual possui apenas correntes de sequência positiva, perfeitamente senoidais, com corrente de neutro nula. A perda de potência linha nesse circuito hipotético equivale à perda de potência real causada pelo estresse térmico. De forma matemática, isso se traduz na seguinte equação:

$$\Delta P = 3r_e I_e^2 = r_{dc} \sum_h K_{sh} (I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + I_{ch}^2) + r_{ndc} \sum_h K_{snh} I_{nh}^2 \quad (2.164)$$

Onde K_{sh} e K_{snh} são uma combinação do efeito skin das diversas ordens harmônicas presentes nos condutores de linha e no condutor neutro, respectivamente; r_{dc} e r_{ndc} são as resistências de corrente contínua dos condutores de linha e do condutor neutro, respectivamente; K_{s1} é o efeito skin para uma frequência igual à frequência fundamental (50 ou 60 Hz).

A chamada corrente efetiva (I_e), corrente que circula no circuito fictício, é obtida através da equação (2.165), e possui duas componentes ortogonais:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3} \left\{ \sum_h [K_h (I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + I_{ch}^2) + \rho_h I_{nh}^2] \right\}} = \sqrt{I_{e1}^2 + I_{eH}^2} \quad (2.165)$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{1}{3} [I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + \rho_1 I_{n1}^2]} \quad (2.166)$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{1}{3} \left\{ \sum_{h \neq 1} [K_h (I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + I_{ch}^2) + \rho_h I_{nh}^2] \right\}} \quad (2.167)$$

$$K_h = \frac{K_{sh}}{K_{s1}} \quad (2.168)$$

$$\rho_1 = \frac{K_{sn1} r_{ndc}}{K_{s1} r_{dc}} \quad (2.169)$$

$$\rho_h = \frac{K_{snh} r_{ndc}}{K_{s1} r_{dc}} \quad (2.170)$$

Mudanças de topologia de rede, mudanças de temperatura, e as mudanças sazonais na umidade e temperatura do solo tornam difícil a tarefa de determinar ou estimar os valores de ρ_1 , ρ_h e K_h (a norma IEEE 1459-2010 recomenda que sejam utilizados valores unitários para as variáveis em questão). Essa simplificação conduz às seguintes expressões:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3} (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2)} \quad (2.171)$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{1}{3} (I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2)} \quad (2.172)$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{1}{3} (I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2 + I_{nH}^2)} \quad (2.173)$$

Para circuitos trifásicos não-senoidais desbalanceados com três fios, basta fazer os termos referentes às correntes no neutro igual a zero.

De forma semelhante, define-se a tensão equivalente (V_e) do circuito fictício, a qual também é constituída de duas componentes ortogonais:

$$V_e = \sqrt{\frac{3 \sum_h (V_{ah}^2 + V_{bh}^2 + V_{ch}^2) + \xi \sum_h (V_{abh}^2 + V_{bch}^2 + V_{cah}^2)}{9(1 + \xi)}} = \sqrt{V_{e1}^2 + V_{eI}^2} \quad (2.174)$$

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + \xi(V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2)}{9(1 + \xi)}} \quad (2.175)$$

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{3 \sum_{h \neq 1} (V_{ah}^2 + V_{bh}^2 + V_{ch}^2) + \xi_h \sum_{h \neq 1} (V_{abh}^2 + V_{bch}^2 + V_{cah}^2)}{9(1 + \xi_h)}} \quad (2.176)$$

Onde ξ e ξ_h são variáveis cujos significados são detalhados na norma em pauta.

Novamente, encontram-se dificuldades para estimação dos valores de ξ e ξ_h e, mais uma vez, a norma sugere a unidade como valor alternativo, caso não haja maiores informações sobre o circuito real a ser estudado.

Finalmente, definem-se as potências como se segue (potência aparente efetiva (S_e), potência aparente efetiva fundamental (S_{e1}), potência aparente efetiva não fundamental (S_{eN}), potência de distorção de corrente (D_{eI}), potência de distorção de tensão (D_{eV}), potência aparente harmônica (S_{eH}), potência não ativa (P_{eH}), potência harmônica de distorção (D_{eH}):

$$S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eN}^2 \quad (2.177)$$

$$S_{e1} = 3V_{e1}I_{e1} \quad (2.178)$$

$$S_{eN}^2 = S_e^2 - S_{e1}^2 = D_{eI}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2 \quad (2.179)$$

$$D_{eI} = 3V_{e1}I_{eH} \quad (2.180)$$

$$D_{eV} = 3V_{eH}I_{e1} \quad (2.181)$$

$$S_{eH} = 3V_{eH}I_{eH} = \sqrt{P_{eH}^2 + D_{eH}^2} \quad (2.182)$$

$$P_{eH} = \sum_{h \neq 1} [V_{ah}I_{ah} \cos(\theta_{ah}) + V_{bh}I_{bh} \cos(\theta_{bh}) + V_{ch}I_{ch} \cos(\theta_{ch})] \quad (2.183)$$

$$D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 + P_{eH}^2} \quad (2.184)$$

Assim como em circuito monofásico não-senoidais, são definidos dois fatores de potência para circuitos trifásicos, o fator de potência fundamental (FP_1^+) e o fator de potência (FP):

$$FP_1^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+} \quad (2.185)$$

$$FP = \frac{P}{S_e} = \frac{P_1 + P_H}{S_e} \quad (2.186)$$

O sinal positivo no fator de potência fundamental indica que apenas a potência ativa e aparente relacionadas com as componentes de sequência positiva de tensão e correntes são consideradas. Tal

prática é detalhada na norma e está presente na seção que define as variáveis para circuitos trifásicos senoidais desbalanceados.

Para visualização das potências definidas, segue a Figura 2.8.

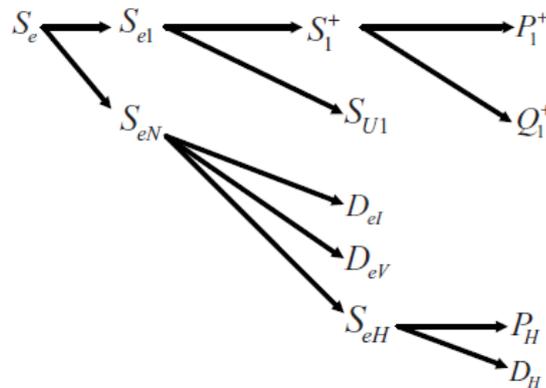


Figura 2.8 – Estratificação de potência aparente de circuitos trifásicos desbalanceados não-senoidais segundo a metodologia proposta por Emanuel (IEEE 1459-2010) [4].

As definições propostas por Emanuel (IEEE 1459-2010) possuem sua importância no que diz respeito à separação das componentes fundamentais e de sequência positiva, o que pode facilitar a compreensão dos fenômenos físicos, a medição e tarifação das potências e energias envolvidas. É importante notar que o método de cálculo da potência reativa não considera o efeito da defasagem entre tensão e corrente nas frequências superiores a fundamental de sequência positiva. Segundo Emanuel, somente as componentes fundamentais de tensão e corrente de sequência positiva têm participação efetiva no processo de conversão da energia elétrica em trabalho útil, apesar das demais componentes incrementarem as perdas Joule e ocuparem espaço nos condutores.

Por fim, deve-se destacar que tal teoria, dentre as demais teorias estudadas, é aquela que possibilita o melhor entendimento físico de alguns circuitos, notadamente aqueles associados à chaveamentos estáticos.

2.3 – Métodos de medição de potência reativa

Além das metodologias apresentadas até o presente momento, são implementadas diversas outras, nos medidores de energia, para cálculo das potências reativas[18]. A seguir, são descritas essas metodologias.

2.3.1 – Método do triângulo de potências

Em geral, os equipamentos eletrônicos de medição registram, a uma dada taxa de amostragem, os valores de tensão e corrente da instalação. Com esses dados, calcula-se a potência ativa por meio da multiplicação de cada amostra de tensão por sua equivalente no sinal de corrente ($P =$

$\frac{1}{T} \sum_{n=0}^T v[n]i[n]$). Do mesmo modo, de posse desses valores amostrados de tensão e corrente (V e I), obtém-se o valor eficaz dessas grandezas e, pela multiplicação desses valores eficazes, consegue-se determinar a potência aparente ($S = VI$).

Na técnica de medição em questão, de posse dos valores de P e S , utiliza-se a relação entre as potências ativa, reativa e aparente, estabelecida em regime senoidal, para obtenção da componente da potência reativa ($Q = \sqrt{S^2 - P^2}$).

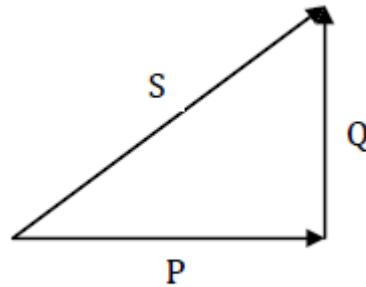


Figura 3.1 – Triângulo de Potências.

2.3.2 – Método do deslocamento de 90°

Em sistemas elétricos puramente senoidais, conforme apresentado no item III.1, a potência reativa é dada pelo produto entre tensão, corrente e $\text{sen}(\varphi)$. Similarmente, a potência ativa é dada pela multiplicação entre V , I e $\text{cos}(\varphi)$. Tendo em vista que $\text{cos}(\varphi) = \text{sen}(\varphi + 90^\circ)$, a potência reativa pode, nesse caso, ser obtida de forma similar à potência ativa, aplicando-se de um deslocamento de 90° no sinal de corrente ou de tensão.

Caso seja aplicado um deslocamento à corrente, a potência reativa medida pode ser definida por:

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i \left(t - \frac{T}{4} \right) dt \quad (3.1)$$

Devido às suas peculiaridades, essa forma de medição, quando aplicada a sinais de tensão e corrente não senoidais, resulta no seguinte valor:

$$Q = Q_1 - P_2 - Q_3 + P_4 + Q_5 \dots \quad (3.2)$$

2.3.3 – Método de integração

Ao se integrar digitalmente um sinal senoidal, a resposta é uma cossenoide, correspondente à senoide deslocada de 90°.

$$Q = \frac{\omega}{T} \int_0^T \left[\int v(t) dt \right] i(t) dt \quad (3.3)$$

Entretanto, quando essa técnica é aplicada a sinais de tensão e corrente com distorções harmônicas, a potência reativa resultante é:

$$Q = Q_1 + \frac{Q_2}{2} + \frac{Q_3}{3} + \frac{Q_4}{4} + \frac{Q_5}{5} \dots \quad (3.4)$$

2.3.4 – Método da derivação

Em vez de se integralizar o sinal de tensão, há medidores que realizam o deslocamento de 90° por meio da derivação desse sinal.

$$Q = \frac{-1}{\omega T} \int_0^T \frac{v(t)}{dt} i(t) dt \quad (3.5)$$

Nesses casos, a potência reativa medida é equivalente a:

$$Q = Q_1 + 2Q_2 + 3Q_3 + 4Q_4 + 5Q_5 \dots \quad (3.6)$$

2.4 – Resumo das Teorias

Para efeito de sintetização das informações apresentadas ao longo deste capítulo, a Tabela XV caracteriza os pontos de destaque de cada metodologia analisada.

Tabela 2.1 - Resumo das Definições Metodologias de Cálculo de Potência

Teoria	Pontos de destaque
Definições Tradicionais [C. P. Steinmetz, Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena. New York: McGraw-Hill, 1897.]	<ul style="list-style-type: none"> - Baseia-se nas definições clássicas de potência e considera apenas a frequência fundamental; - É perfeitamente aplicável em sistemas equilibrados, alimentados com tensão puramente senoidal e com cargas exclusivamente lineares. - Quando essas condições não são satisfeitas, as definições tradicionais não são suficientes para compreensão dos fenômenos de transferência de energia.

<p>Teoria de Budeanu (1927) [C. I. Budeanu, “Puissances R’actives et Fictives,” Inst. National Roumain pour l’ Etude de l’Am’énagement et de l’Utilisation des Sources d’Energie, Bucarest, 1927.]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Precursora das discussões ligadas à análise de circuitos elétricos com sinais não-senoidais; - Possui como deficiência o fato da potência reativa total (Q_B) poder ser menor que a potência reativa fundamental (Q_1) do circuito; - Como a componente D_B da potência total é calculada a partir de Q_B, tem-se que também essa grandeza leva a resultados deficientes; - Não há um significado físico associado à grandeza D_B.
<p>Teoria de Fryze (1932) [Fryze S.: “Effective, Wattless and Apparent Power in Circuits with Nonsinusoidal Waveforms of Current and Voltage,” Elektrotechnische Zeitschrift,” No. 25, June 23, 1932, pp. 596–99, 625–27, 700–702.]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Apresentou avanços ao introduzir o conceito de ortogonalidade entre componentes de corrente; - Dispensou a necessidade de realização de análises em frequência, como vinha sendo proposto por autores da época; - A proposta se fundamentou em um modelo ainda bastante simplificado, sem oferecer meios para a monitoração visando à tarifação ou à compensação “seletiva” de determinadas parcelas de corrente e potência. - Não proporciona informações claras a respeito das componentes de potência ativa e reativa de frequência fundamental; - Modelo não definido para sistemas polifásicos.
<p>Teoria de Czarnecki (1984) [Czarnecki L. S.: “Considerations on the Reactive Power in Nonsinusoidal Situations,” IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 34, No. 3, Sept. 1984, pp. 399–404.]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Czarnecki, sua teoria resulta em um melhor detalhamento dos fenômenos envolvidos na operação dos sistemas elétricos, abrindo novas possibilidades para a realização de compensação; - Determinados conceitos, como da corrente dispersa, são matematicamente bem definidos, no entanto não encontram suporte nas teorias clássicas de campos eletromagnéticos; - Assim como Fryze, esta proposição não abrange a obtenção da potência ativa fundamental separadamente.
<p>Teoria PQ (1984) [H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, “Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components,” IEEE Trans. On Industrial Application, vol. IA-20, no. 3, pp. 625-630, May/June 1984.]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Alguns autores tendem a considerar esta teoria como uma ferramenta teórica para o controle de filtros ativos e para o entendimento das propriedades de potência; - Do ponto de vista de instrumentação e monitoração de distúrbios na qualidade de energia, esta teoria não permite separar e identificar a origem da deterioração quando vários fatores estão presentes simultaneamente. - Do ponto de vista de compensação, pode ser aplicada com dois objetivos principais: 1) o de garantir potência constante no ponto de acoplamento comum ou 2) o de garantir correntes senoidais e equilibradas no PAC; - Estes dois objetivos só podem ser atendidos simultaneamente quando as tensões no PAC forem

	<p>senoidais e equilibradas. Em quaisquer outras condições, os objetivos só podem ser atendidos isoladamente.</p>
<p>Teoria FDB (1993) [M. Depenbrock, “The FBD-Method, A Generally Applicable Tool for Analyzing Power Relations,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, nº 2, pp. 381-387, May 1993.]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Evidencia a necessidade de definir um “ponto de referência virtual” para as medidas das tensões, além de defender que o condutor neutro seja tratado como um condutor de fase, em sistemas com sinais não senoidais e/ou desequilibrados; - Na presença de componentes homopolares as medidas das tensões para o ponto estrela virtual podem não representar os valores eficazes ou os valores instantâneos das tensões sobre os terminais da carga; - A teoria pode apresentar algumas limitações em termos de interpretação de fenômenos físicos, pelo fato de não separar a componente reativa e a componente de desbalanço da corrente total.
<p>Teoria de Emanuel (IEEE 1459-2010) [IEEE Std 1459–2000, “IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions.”]</p>	<ul style="list-style-type: none"> - É capaz de realizar a separação das componentes fundamentais e de sequência positiva dos sinais, o que pode facilitar a compreensão dos fenômenos físicos, a medição e tarifação das potências; - O método de cálculo da potência reativa não considera o efeito da defasagem entre tensão e corrente nas frequências superiores a fundamental de sequência positiva; - Apresenta uma definição clara para sistemas trifásicos com sinais distorcidos e desequilibrados, características essas normalmente encontradas na realidade dos sistemas elétricos; - dentre as demais teorias estudadas, é aquela que possibilita o melhor entendimento físico de alguns circuitos, notadamente aqueles associados a chaveamentos estáticos.

Implementação Computacional das Teorias de Potência e Métodos de Medição de Potência Reativa

3.1 – Considerações iniciais

Uma vez apresentadas as metodologias de cálculo de potência, bem como o fator de potência, o presente capítulo, numa tentativa de quantificar de forma completa as características e considerações de cada uma delas, as mesmas são implementadas em ambiente computacional.

3.2 – Desenvolvimento do aplicativo computacional

Para implementação das metodologias foi concebido um aplicativo computacional a partir da utilização do software MATLAB.

Os desenvolvimentos envolveram a execução de duas etapas bem definidas, quais sejam:

- Utilização do recurso de interface gráfica para implementação de uma fonte programável capaz de gerar sinais de tensão e corrente com diferentes níveis de distorção harmônica e desequilíbrio. A fonte recebe como entrada informações relacionadas à frequência fundamental dos sinais, número de amostras por ciclo e valores de magnitude e ângulo dos fasores de tensão e corrente de cada fase, em todas as frequências que o usuário queira considerar. De acordo com os dados inseridos, o aplicativo permite a visualização das formas

de onda geradas, além da possibilidade de salvar os dados em um arquivo de Excel. A Figura 3.1 apresenta a interface da fonte programável desenvolvida.

- Programação usando o script m.file do MATLAB, para a implementação da fundamentação matemática das seguintes metodologias: definição tradicional, Teoria de Budeanu, Teoria de Fryze, Teoria de Czarnecki, Teoria PQ, Teoria FDB, Teoria de Emanuel (IEEE 1459-2010) e proposições da norma IEC 61000-1-7. Ao ser executado, o programa solicita o carregamento de um arquivo de dados, de extensão .xlsx (planilha do Excel), o qual deve conter os sinais de tensão e corrente a serem analisados. Após processamento, são exibidos na janela de trabalho do MATLAB os valores relacionados ao fator de potência e à estratificação da potência total segundo cada metodologia e, como recurso adicional, é permitido ainda que o usuário salve esses resultados em um arquivo de Excel. A Figura 3.2 retrata a janela de comandos do MATLAB durante o início da execução do programa.

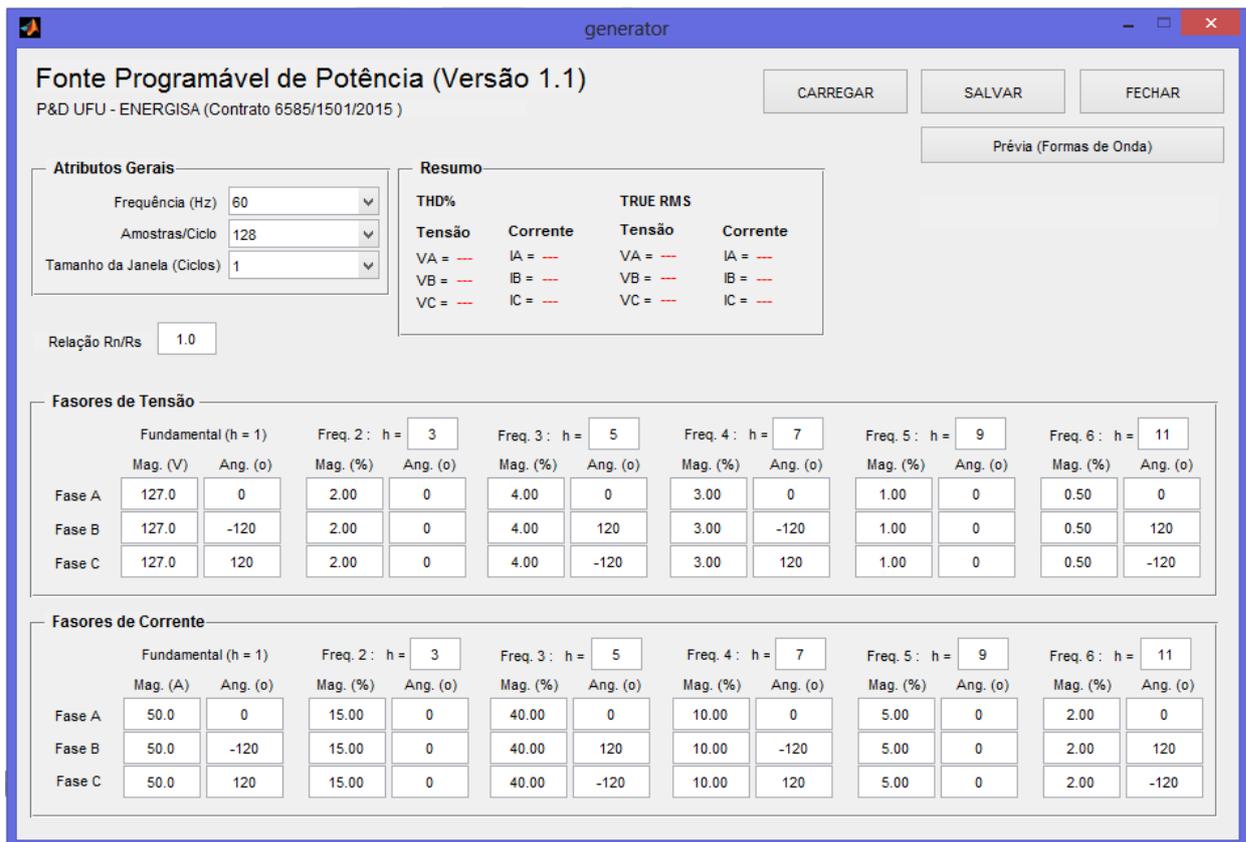


Figura 3.1 – Interface da fonte programável desenvolvida.

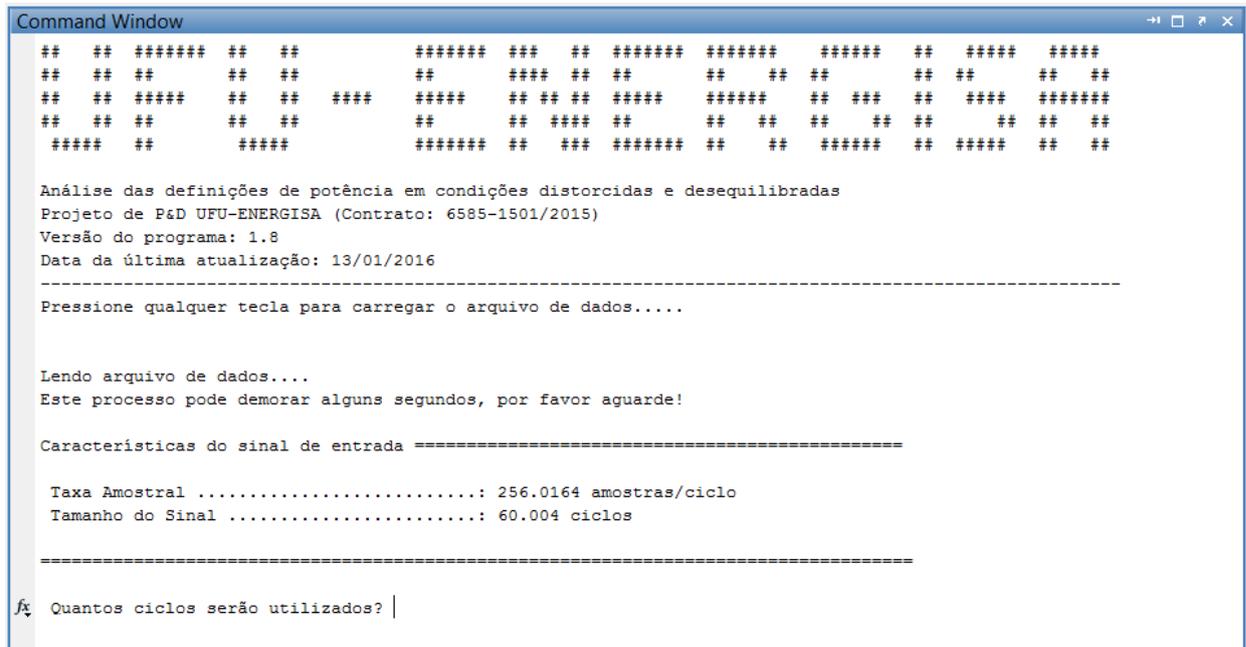


Figura 3.2 – Interface da fonte programável desenvolvida.

3.3 – Definição dos estudos de caso

Com o intuito de avaliar a funcionalidade do aplicativo computacional desenvolvido, nesta seção são conduzidos testes de desempenho, os quais consideram quatro condições distintas, que são detalhadas abaixo:

- **Caso 1:** Sinais de tensão e corrente perfeitamente senoidais (Tabela 3.1);
- **Caso 2:** Sinal de tensão distorcido e corrente senoidal (Tabela 3.1);
- **Caso 3:** Sinal de tensão senoidal e corrente distorcida (Tabela 3.1).
- **Caso 4:** Sinais de tensão e corrente distorcidos (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Características dos sinais analisados no caso 1.

Frequência [Hz]	Tensão de fase [V]	Corrente [A]
60	$127\angle 0^\circ$	$92\angle -22,5^\circ$
THD [%]	0	0

Tabela 3.2 – Características dos sinais analisados no caso 2.

Frequência [Hz]	Tensão de fase [V]	Corrente [A]
60	$127\angle 0^\circ$	$92\angle -22,5^\circ$
300	$6,04\angle 96,9^\circ$	0
420	$4,76\angle 71,6^\circ$	0

660	$4,27\angle-157,1^\circ$	0
780	$3,16\angle22,5^\circ$	0
THD [%]	7,36	0

Tabela 3.3 – Características dos sinais analisados no caso 3.

Frequência [Hz]	Tensão de fase [V]	Corrente [A]
60	$127\angle0^\circ$	$92\angle-22,5^\circ$
300	0	$14,44\angle168,2^\circ$
420	0	$11,67\angle0,8^\circ$
660	0	$6,16\angle15,7^\circ$
780	0	$6,14\angle-71,1^\circ$
THD [%]	0	22,29

Tabela 3.4 – Características dos sinais analisados no caso 4.

Frequência [Hz]	Tensão de fase [V]	Corrente [A]
60	$127\angle0^\circ$	$92\angle-22,5^\circ$
300	$6,04\angle96,9^\circ$	$14,44\angle168,2^\circ$
420	$4,76\angle71,6^\circ$	$11,67\angle0,8^\circ$
660	$4,27\angle-157,1^\circ$	$6,16\angle15,7^\circ$
780	$3,16\angle22,5^\circ$	$6,14\angle-71,1^\circ$
THD [%]	7,36	22,29

Na sequência são apresentados os resultados fornecidos por cada uma das metodologias em análise.

3.4 – Apresentação dos resultados

A seguir são apresentados os resultados relacionados aos métodos citados.

a) Definições Tradicionais

As definições tradicionais aplicadas aos quatro casos estudados conduzem aos valores de potência aparente (S), potência ativa (P), potência reativa (Q) e fator de potência (PF) evidenciados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Resultados obtidos a partir das definições tradicionais.

		S (VA)	P (W)	Q (var)	PF (pu)
Caso 1	Fase A	11684	10794,61	4471,273	0,92388
	Fase B	11684	10794,61	4471,273	0,92388
	Fase C	11684	10794,61	4471,273	0,92388

	TOTAL	35052	32383,83	13413,82	0,92388
Caso 2	Fase A	11684	10794,61	4471,273	0,92388
	Fase B	11684	10794,61	4471,273	0,92388
	Fase C	11684	10794,61	4471,273	0,92388
	TOTAL	35052	32383,83	13413,82	0,92388
Caso 3	Fase A	11684	10794,61	4471,273	0,92388
	Fase B	11684	10794,61	4471,273	0,92388
	Fase C	11684	10794,61	4471,273	0,92388
	TOTAL	35052	32383,83	13413,82	0,92388
Caso 4	Fase A	11684	10794,61	4471,273	0,92388
	Fase B	11684	10794,61	4471,273	0,92388
	Fase C	11684	10794,61	4471,273	0,92388
	TOTAL	35052	32383,83	13413,82	0,92388

b) Aplicação da teoria de Budeanu

A tabela VI exibe os valores de potências de acordo com as definições de Budeanu. São apresentados, para os casos 1, 2, 3 e 4, os valores de potência aparente (S), potência ativa (P), potência reativa (QB), potência de distorção (DB) e fator de potência (PF).

Tabela 3.6 – Resultados obtidos a partir da teoria de Budeanu.

		S (VA)	P (W)	QB (var)	DB (var)	PF (pu)
Caso 1	Fase A	11684	10794,61	4471,273	0,000173	0,92388
	Fase B	11684	10794,61	4471,273	0,000173	0,92388
	Fase C	11684	10794,61	4471,273	6,1E-05	0,92388
	TOTAL	35052	32383,83	13413,82	0,000406	0,92388
Caso 2	Fase A	11715,6	10794,61	4471,273	859,879	0,921388
	Fase B	11715,6	10794,61	4471,273	859,879	0,921388
	Fase C	11715,6	10794,61	4471,273	859,879	0,921388
	TOTAL	35146,8	32383,83	13413,82	2579,637	0,921388
Caso 3	Fase A	11970,62	10794,61	4471,273	2603,809	0,901759
	Fase B	11970,62	10794,61	4471,273	2603,809	0,901759
	Fase C	11970,62	10794,61	4471,273	2603,809	0,901759
	TOTAL	35911,85	32383,83	13413,82	7811,427	0,901759
Caso 4	Fase A	12002,99	10813,53	4457,186	2696,84	0,900903
	Fase B	12002,99	10813,53	4457,186	2696,84	0,900903
	Fase C	12002,99	10813,53	4457,186	2696,84	0,900903
	TOTAL	36008,97	32440,58	13371,56	8090,521	0,900903

c) Aplicação da teoria de Fryze

A estratificação de potência segundo o modelo de Fryze é apresentada na tabela VII, a qual contempla os valores de potência aparente (S), potência ativa (P), potência reativa (QF), potência ativa harmônica (Ph), fator de potência (PF) e fator de potência não ativo (PFb).

Tabela 3.7 – Resultados obtidos a partir da teoria de Fryze.

		S (VA)	P (W)	Q _F (var)	P _h (W)	PF (pu)	PF _b (pu)
Caso 1	Fase A	11684	10794,61	4471,273	0	0,92388	0,382683
	Fase B	11684	10794,61	4471,273	0	0,92388	0,382683
	Fase C	11684	10794,61	4471,273	0	0,92388	0,382683
	TOTAL	35052	32383,83	13413,82	0	0,92388	0,382683
Caso 2	Fase A	11715,6	10794,61	4553,205	0	0,921388	0,388645
	Fase B	11715,6	10794,61	4553,205	0	0,921388	0,388645
	Fase C	11715,6	10794,61	4553,205	0	0,921388	0,388645
	TOTAL	35146,8	32383,83	13659,62	0	0,921388	0,388645
Caso 3	Fase A	11970,62	10794,61	5174,177	0	0,901759	0,43224
	Fase B	11970,62	10794,61	5174,177	0	0,901759	0,43224
	Fase C	11970,62	10794,61	5174,177	0	0,901759	0,43224
	TOTAL	35911,85	32383,83	15522,53	0	0,901759	0,43224
Caso 4	Fase A	12002,99	10813,53	5209,554	18,91707	0,900903	0,434021
	Fase B	12002,99	10813,53	5209,554	18,91707	0,900903	0,434021
	Fase C	12002,99	10813,53	5209,554	18,91707	0,900903	0,434021
	TOTAL	36008,97	32440,58	15628,66	56,7512	0,900903	0,434021

d) Aplicação da teoria de Czarnecki

Os valores de potência aparente (S), potência ativa (P), potência de dispersão (DS), potência reativa (QR) e fator de potência (PF), definidos de acordo com a teoria de Czarnecki são apresentados na tabela VIII.

Tabela 3.8 – Resultados obtidos a partir da teoria de Czarnecki.

		S (VA)	P (W)	D _s (var)	Q _R (var)	PF (pu)
Caso 1	Fase A	11684	10794,61	1,8E-12	4471,273	0,92388
	Fase B	11684	10794,61	5,41E-12	4471,273	0,92388
	Fase C	11684	10794,61	1,8E-12	4471,273	0,92388
	TOTAL	35052	32383,83	9,02E-12	13413,82	0,92388
Caso 2	Fase A	11715,6	10794,61	794,4246	4483,365	0,921388
	Fase B	11715,6	10794,61	794,4246	4483,365	0,921388
	Fase C	11715,6	10794,61	794,4246	4483,365	0,921388
	TOTAL	35146,8	32383,83	2383,274	13450,1	0,921388
Caso 3	Fase A	11970,62	10794,61	2459,61	4552,189	0,901759

	Fase B	11970,62	10794,61	1322,838	5002,22	0,901759
	Fase C	11970,62	10794,61	1539,53	4939,833	0,901759
	TOTAL	35911,85	32383,83	5321,977	14494,24	0,901759
Caso 4	Fase A	12002,99	10813,53	1190,325	5071,743	0,900903
	Fase B	12002,99	10813,53	1190,325	5071,743	0,900903
	Fase C	12002,99	10813,53	1190,325	5071,743	0,900903
	TOTAL	36008,97	32440,58	3570,976	15215,23	0,900903

e) Aplicação da teoria de PQ

Ao aplicar a Teoria PQ aos casos investigados, foram obtidas as informações referentes às componentes médias de potência aparente (\bar{s}), ativa (\bar{p}) e reativa (\bar{q}) e ao fator de potência (PF), como indica a tabela IX.

Tabela 3.9 – Características dos sinais analisados no caso 4.

		\bar{s} (VA)	\bar{p} (W)	\bar{q} (var)	PF (pu)
Caso 1	TOTAL	35052	32383,83	13413,82	0,92388
Caso 2	TOTAL	35052	32383,83	13413,82	0,92388
Caso 3	TOTAL	35052	32383,83	13413,82	0,92388
Caso 4	TOTAL	35287,96	32440,58	13887,02	0,91931

f) Aplicação da teoria de FDB

A estratificação de potência segundo o modelo FDB é apresentada na Tabela 3.10, que apresenta os valores de potência aparente (S), potência ativa (P), potência ativa fundamental (P_{a1}), potência ativa harmônica (P_{ah}), potência de conversão (D_C), potência residual (D_R), potência reativa fundamental (Q_1), potência reativa complementar (Q_C) e fator de potência (PF).

Tabela 3.10 – Resultados obtidos a partir da teoria FDB.

		S (VA)	P (W)	P_{a1} (W)	P_{ah} (W)	D_C (var)	D_R (var)	Q_1 (var)	Q_C (var)	PF (pu)
Caso 1	Fase A	11684	10794,61	10794,61	0	0	0	4471,273	0	0,92388
	Fase B	11684	10794,61	10794,61	0	0	0	4471,273	0	0,92388
	Fase C	11684	10794,61	10794,61	0	0	0	4471,273	0	0,92388
	TOTAL	35052	32383,83	32383,83	0	0	0	13413,82	0	0,92388
Caso 2	Fase A	11715,6	10794,61	10736,46	58,15039	792,282	58,30766	4471,273	329,0615	0,921388
	Fase B	11715,6	10794,61	10736,46	58,15039	792,282	58,30766	4471,273	329,0615	0,921388
	Fase C	11715,6	10794,61	10736,46	58,15039	792,282	58,30766	4471,273	329,0615	0,921388
	TOTAL	35146,8	32383,83	32209,37	174,4512	2376,846	174,923	13413,82	987,1844	0,921388
Caso 3	Fase A	11970,62	10794,61	10794,61	0	0	0	4471,273	0	0,901759
	Fase B	11970,62	10794,61	10794,61	0	0	0	4471,273	0	0,901759
	Fase C	11970,62	10794,61	10794,61	0	0	0	4471,273	0	0,901759

	TOTAL	35911,85	32383,83	32383,83	0	0	0	13413,82	0	0,901759
Caso 4	Fase A	12002,99	10813,53	10755,27	58,2523	536,2629	2598,329	4471,273	329,0615	0,900903
	Fase B	12002,99	10813,53	10755,27	58,2523	536,2629	2598,329	4471,273	329,0615	0,900903
	Fase C	12002,99	10813,53	10755,27	58,2523	536,2629	2598,329	4471,273	329,0615	0,900903
	TOTAL	36008,97	32440,58	32265,82	174,7569	1608,789	7794,986	13413,82	987,1844	0,900903

g) Aplicação da IEEE 1459-2010

A Tabela 3.11 mostra os valores de potências de acordo com a teoria de Emanuel (IEEE 1459-2010). São apresentados, para os quatro casos estudados, os valores de potência aparente (S), potência aparente não fundamental (S_N), potência aparente fundamental (S_1), potência aparente harmônica (S_H), potência ativa fundamental (P_1), potência ativa harmônica (P_H), potência reativa harmônica (Q_1), potência de distorção de corrente (D_I), potência de distorção de tensão (D_V), potência de distorção harmônica (D_H) e fator de potência (PF).

Tabela 3.11 – Resultados obtidos a partir da teoria IEEE 1459-2010.

		S (VA)	S_N (VA)	S_1 (VA)	S_H (VA)	P_1 (W)	P_H (W)	Q_1 (var)	D_I (var)	D_V (var)	D_H (var)	FP (pu)
Caso 1	Fase A	11684	0	11684	0	10794,61	0	4471,27	0	0	0	0,92388
	Fase B	11684	0	11684	0	10794,61	0	4471,27	0	0	0	0,92388
	Fase C	11684	0	11684	0	10794,61	0	4471,27	0	0	0	0,92388
	TOTAL	35052	0	35052	0	32383,83	0	13413,81	0	0	0	0,92388
Caso 2	Fase A	11715,6	859,88	11684	0	10794,61	0	4471,27	0	859,88	0	0,921388
	Fase B	11715,6	859,88	11684	0	10794,61	0	4471,27	0	859,88	0	0,921388
	Fase C	11715,6	859,88	11684	0	10794,61	0	4471,27	0	859,88	0	0,921388
	TOTAL	35146,8	2579,64	35052	0	32383,83	0	13413,81	0	2579,64	0	0,921388
Caso 3	Fase A	11970,62	2603,81	11684	0	10794,61	0	4471,27	2603,81	0	0	0,901759
	Fase B	11970,62	2603,81	11684	0	10794,61	0	4471,27	2603,81	0	0	0,901759
	Fase C	11970,62	2603,81	11684	0	10794,61	0	4471,27	2603,81	0	0	0,901759
	TOTAL	35911,85	7811,43	35052	0	32383,83	0	13413,81	7811,43	0	0	0,901759
Caso 4	Fase A	12002,99	2748,81	11684	191,63	10794,61	18,92	4471,27	2603,81	859,88	190,69	0,900903
	Fase B	12002,99	2748,81	11684	191,63	10794,61	18,92	4471,27	2603,81	859,88	190,69	0,900903
	Fase C	12002,99	2748,81	11684	191,63	10794,61	18,92	4471,27	2603,81	859,88	190,69	0,900903
	TOTAL	36008,97	8246,42	35052	574,89	32383,83	56,76	13413,81	7811,43	2579,64	572,07	0,900903

3.5 – Análise dos resultados

A análise dos resultados advindos da aplicação dos métodos evidencia que, muito embora as parcelas de estratificação de potência se modifiquem de acordo com a interpretação dada por cada pesquisador, as significações relacionadas a fator de potência não apresentam grandes distinções. Conforme anteriormente apontado, os valores de fator de potência variaram dentro de três

possibilidades: a consideração exclusiva da defasagem entre tensão e corrente em frequência fundamental, o cálculo com a contemplação também dos efeitos da presença de harmônicas e, por último, o procedimento levando em conta o conceito de potência efetiva presente na norma IEEE 1459-2010.

Neste particular, especial destaque merece a teoria proposta na IEEE 1459-2010, uma vez que abrange definições bem estabelecidas para sinais de sistemas trifásicos desbalanceados e não senoidais, que configura a realidade comumente encontrada em campo. Observa-se que apesar das dificuldades associadas à determinação prática de parâmetros envolvidos em sua formulação, esta metodologia possibilita o melhor entendimento físico de alguns fenômenos associados à conversão de energia em circuitos.

Testes de desempenho dos medidores comerciais

4.1 – Considerações iniciais

Na busca de identificar as metodologias empregadas nos medidores de energia elétrica comerciais, este capítulo apresentará uma metodologia para testes de medidores em laboratório. Além da identificação das metodologias empregadas em cada medidor, os testes servirão para apontar os medidores que apresentam erros fora dos padrões estabelecidos pela regulamentação.

4.2 – Documentação nacional e internacional

Para a definição dos testes a serem conduzidos, num primeiro momento, foram realizados trabalhos investigativos sobre a existência de orientações ou guias para a realização de estudos de desempenho laboratorial e testes de exatidão, em consonância com documentos encontrados no âmbito nacional e internacional.

Foram detectados 2 (dois) documentos principais na forma de normas, a saber: NBR14520:2011 (Medidores de Energia Elétrica – Métodos de Ensaio) [15] e NBR14519:2011 (Medidores de Energia Elétrica – Especificação) [16]. As orientações contidas nestas normas contemplam a proposição de níveis e ordens de distorções harmônicas, tratadas de forma monofásica. As indicações apontam para a realização de testes através de dois grupos de ensaios, cada qual com valores pré-definidos para distorções de tensão e corrente, atreladas, respectivamente, com as ordens harmônicas 3 e 5, nos termos sintetizados abaixo:

- 1) Um ensaio sobrepondo uma tensão harmônica de ordem 5 (no valor de 10%) à tensão fundamental nominal, e uma correspondente corrente harmônica, de mesma ordem (no valor

de 40%) da corrente fundamental. Esta última adotada como 50% da corrente nominal. Vale também ressaltar que as tensões e correntes, tanto as fundamentais como as de ordem 5, devem estar em fase;

- 2) Um segundo ensaio, baseado na superposição tão apenas de uma componente harmônica de ordem 3 (no valor de 10% do valor da corrente nominal), considerando a aplicação de uma tensão fundamental nominal e também uma corrente fundamental nominal. A mencionada corrente de ordem 3 deve ser aplicada com diferentes ângulos de fase em relação a sua correspondente fundamental.

4.3 – Definição dos módulos gerais associados com os grupos de ensaios

Com base nas orientações anteriormente destacadas e em consonância com os resultados de discussões promovidas no âmbito do grupo de desenvolvimento, é proposta uma considerável gama de testes, os quais foram sintetizados em dez módulos, cada qual com objetivos e características que visam uma completude das investigações sobre o desempenho dos medidores, tendo em vista o foco deste trabalho. Neste contexto, pode-se identificar que os ensaios a serem aplicados em cada medidor totalizam 29 tipos distintos, conforme apêndice 1, cujas propriedades são detalhadamente expostas no decorrer do texto.

- 1) **Tensões e correntes puramente senoidais:** Esta etapa consiste na realização de testes com tensões e correntes perfeitamente senoidais, em 60 Hz, variando apenas a defasagem entre as grandezas. As grandezas trifásicas se apresentam equilibradas;
- 2) **Tensões distorcidas e correntes puramente senoidais:** Este grupo destina-se à verificação do comportamento dos medidores diante de tensões distorcidas, com aplicação simultânea de ordens harmônicas distintas e em níveis crescentes, mantendo, todavia, as correntes puramente senoidais em 60 Hz. As grandezas trifásicas se apresentam equilibradas.
- 3) **Tensões puramente senoidais e correntes distorcidas:** Nesta categoria encontram-se os testes avaliativos do comportamento dos medidores diante de correntes distorcidas, com aplicação simultânea de ordens harmônicas distintas e em níveis crescentes, mantendo, todavia, as tensões puramente senoidais em 60 Hz. As grandezas trifásicas se apresentam equilibradas.
- 4) **Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas ímpares não múltiplas de 3):** Esta etapa dos testes compreende a utilização de tensões e correntes com diferentes níveis de distorções, abrangendo ordens harmônicas ímpares não múltiplas de 3. As grandezas trifásicas se apresentam equilibradas.

- 5) **Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas pares não múltiplos de 3):** Este grupo de testes de desempenho abarca a utilização de tensões e correntes com diferentes níveis de distorções, abrangendo ordens harmônicas pares não múltiplos de 3. As grandezas trifásicas se apresentam equilibradas.
- 6) **Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas múltiplas de 3):** Esta categoria dos testes envolve tensões e correntes com diferentes níveis de distorções, abrangendo ordens harmônicas múltiplas de 3. As grandezas trifásicas se apresentam equilibradas.
- 7) **Tensões e correntes distorcidas (inter-harmônicas):** Este módulo de testes de desempenho compreende a utilização de tensões e correntes com diferentes níveis de distorções, abrangendo ordens inter-harmônicas. As grandezas trifásicas se apresentam equilibradas.
- 8) **Tensões e correntes puramente senoidais com desequilíbrio de tensão e corrente:** Este conjunto de ensaios compreende avaliações de desempenho com tensões e correntes puramente senoidais, em 60 Hz, contando com diferentes níveis de desequilíbrio.
- 9) **Tensões e correntes distorcidas com desequilíbrio de tensão e corrente:** Esta etapa de ensaios compreende avaliações de desempenho diante de tensões e correntes distorcidas e com diferentes níveis de desequilíbrio.
- 10) **Tensão puramente senoidal e correntes de chaveamento (retificador de meia-onda e dimmer):** Nesta categoria encontram-se os testes avaliativos do comportamento dos medidores diante de tensão puramente senoidal e correntes características de processos de chaveamento (dimmer), contando com a variação da defasagem entre as grandezas e dos ângulos de chaveamento.

4.4 – Detalhamento dos testes por módulos de ensaios

Uma vez apresentada a síntese da classificação dos módulos de ensaios propostos, as Tabelas 4.1 a 4.10 pormenorizam as condições particulares que caracterizam cada teste a ser aplicado por módulo.

Tabela 4.1 - Descrição dos Testes do Módulo I.

Ensaio	Características
I.1	Tensões e correntes trifásicas, nominais, equilibradas e senoidais (em 60 Hz) e fator de deslocamento unitário.
I.2	Tensões e correntes trifásicas, nominais, equilibradas e senoidais (em 60 Hz) e fator de deslocamento 0,7 indutivo.
I.3	Tensões e correntes trifásicas, nominais, equilibradas e senoidais (em 60 Hz) e fator de deslocamento 0,7 capacitivo.

Tabela 4.2 - Descrição dos Testes do Módulo I.

Ensaio	Características
II.1	Tensão distorcida com DTT de 5%, constituída por componentes de ordem 3,5 e 7, corrente fundamental nominal em 60 Hz, fator de deslocamento 0,9 indutivo e componentes harmônicas em fase com a tensão fundamental.
II.2	Tensão distorcida com DTT de 10%, constituída por componentes de ordem 3,5 e 7, corrente fundamental nominal em 60 Hz, fator de deslocamento 0,9 indutivo e componentes harmônicas em fase com a tensão fundamental.
II.3	Tensão distorcida com DTT de 15%, constituída por componentes de ordem 3,5 e 7, corrente fundamental nominal em 60 Hz, fator de deslocamento 0,9 capacitivo e componentes harmônicas em fase com a tensão fundamental.

Tabela 4.3 - Descrição dos Testes do Módulo I.

Ensaio	Características
III.1	Tensão fundamental nominal em 60 Hz, corrente distorcida, com DTI de 10%, constituída por componentes de ordem 3, 5, 7, 11 e 13, fator de deslocamento 0,9 indutivo e componentes harmônicas em fase com a tensão fundamental.
III.2	Tensão fundamental nominal em 60 Hz, corrente distorcida, com DTI de 30%, constituída por componentes de ordem 3, 5, 7, 11 e 13, fator de deslocamento 0,9 indutivo e componentes harmônicas em fase com a tensão fundamental.
III.3	Tensão fundamental nominal em 60 Hz, corrente distorcida, com DTI de 50%, constituída por componentes de ordem 3, 5, 7, 11 e 13, fator de deslocamento 0,9 capacitivo e componentes harmônicas em fase com a tensão fundamental.

Tabela 4.4 - Descrição dos Testes do Módulo I.

Ensaio	Características
IV.1	Tensão distorcida com DTT de 5% constituída por componentes de ordem 5, 7, 11 e 13, corrente distorcida com DTI de 10%, constituída por componentes de ordem 5, 7, 11 e 13, fator de deslocamento 0,8 indutivo e componentes harmônicas em fase com a tensão fundamental.
IV.2	Tensão distorcida com DTT de 7% constituída por componentes de ordem 5, 7, 11 e 13, corrente distorcida com DTI de 30%, constituída por componentes de ordem 5, 7, 11 e 13, fator de deslocamento 0,8 indutivo e componentes harmônicas em fase com a tensão fundamental.
IV.3	Tensão distorcida com DTT de 9% constituída por componentes de ordem 5, 7, 11 e 13, corrente distorcida com DTI de 50%, constituída por componentes de ordem 5, 7, 11 e 13, fator de deslocamento 0,8 indutivo e componentes harmônicas em fase com a tensão fundamental.

Tabela 4.5 - Descrição dos Testes do Módulo I.

Ensaio	Características
V.1	Tensão distorcida com DTT de 5% constituída por componentes de ordem 2, 4, 8 e 10, corrente distorcida com DTI de 10%, constituída por componentes de ordem 2, 4, 8 e

	10, fator de deslocamento 0,8 indutivo e componentes harmônicas em fase com a tensão fundamental.
V.2	Tensão distorcida com DTT de 7% constituída por componentes de ordem 2, 4, 8 e 10, corrente distorcida com DTI de 30%, constituída por componentes de ordem 2, 4, 8 e 10, fator de deslocamento 0,8 indutivo e componentes harmônicas em fase com a tensão fundamental.
V.3	Tensão distorcida com DTT de 9% constituída por componentes de ordem 2, 4, 8 e 10, corrente distorcida com DTI de 50%, constituída por componentes de ordem 2, 4, 8 e 10, fator de deslocamento 0,8 indutivo e componentes harmônicas em fase com a tensão fundamental.

Tabela 4.6 - Descrição dos Testes do Módulo I.

Ensaio	Características
VI.1	Tensão distorcida com DTT de 5%, constituída por componentes de ordem 3, 6, 9 e 12, corrente distorcida com DTI de 10%, constituída pelas ordens 3, 6, 9 e 12, fator de deslocamento 0,6 indutivo e harmônicas em fase com a tensão fundamental.
VI.2	Tensão distorcida com DTT de 7% constituída por componentes de ordem 3, 6, 9 e 12, corrente distorcida com DTI de 30%, constituída por componentes de ordem 3, 6, 9 e 12, fator de deslocamento 0,6 indutivo e componentes harmônicas em fase com a tensão fundamental.
VI.3	Tensão distorcida com DTT de 9% constituída por componentes de ordem 3, 6, 9 e 12, corrente distorcida com DTI de 50%, constituída por componentes de ordem 3, 6, 9 e 12, fator de deslocamento 0,6 indutivo e componentes harmônicas em fase com a tensão fundamental.

Tabela 4.7 - Descrição dos Testes do Módulo I.

Ensaio	Características
VII.1	Tensão distorcida com DTT de 1% constituída por componente de ordem 0,85, corrente distorcida com DTI de 1%, constituída por componente de ordem 0,85, fator de deslocamento 0,92 indutivo e componente inter-harmônica em fase com a tensão fundamental.
VII.2	Tensão distorcida com DTT de 3% constituída por componente de ordem 0,85, corrente distorcida com DTI de 5%, constituída por componente de ordem 0,85, fator de deslocamento 0,92 indutivo e componente inter-harmônica em fase com a tensão fundamental.
VII.3	Tensão distorcida com DTT de 3% constituída por componentes de ordem 2,97, corrente distorcida com DTI de 5%, constituída por componentes de ordem 2,97, fator de deslocamento 0,92 indutivo e componente inter-harmônica em fase com a tensão fundamental.

Tabela 4.8 - Descrição dos Testes do Módulo I.

Ensaio	Características
VIII.1	Tensões trifásicas desequilibradas de 3,1% em magnitude, senoidais (em 60 Hz), correntes trifásicas nominais, equilibradas e senoidais (em 60 Hz), fator de deslocamento 0,85 indutivo por fase.

VIII.2	Tensões trifásicas nominais, equilibradas e senoidais (em 60 Hz), correntes trifásicas desequilibradas de 21,45% em magnitude, senoidais (em 60 Hz), fator de deslocamento 0,85 indutivo por fase.
VIII.3	Tensões trifásicas desequilibradas de 3,1% em magnitude, senoidais (em 60 Hz), correntes trifásicas desequilibradas de 30,41% em magnitude, senoidais (em 60 Hz), fator de deslocamento 0,85 indutivo por fase.

Tabela 4.9 - Descrição dos Testes do Módulo I.

Ensaio	Características
IX.1	Tensões trifásicas desequilibradas de 3,1% em magnitude, distorcida com DTT de 6% constituída por componentes de ordem 3, 5, 7, 9, 11 e 13. Correntes trifásicas equilibradas, distorcida com DTI de 35% constituída por componentes de ordem 3, 5, 7, 9, 11 e 13. Fator de deslocamento 0,7 indutivo por fase.
IX.2	Tensões trifásicas equilibradas, distorcida com DTT de 6% constituída por componentes de ordem 3, 5, 7, 9, 11 e 13. Correntes trifásicas desequilibradas de 21,43% em magnitude, distorcida com DTI de 35% constituída por componentes de ordem 3, 5, 7, 9, 11 e 13. Fator de deslocamento 0,85 indutivo por fase.
IX.3	Tensões trifásicas desequilibradas de 3,1% em magnitude, distorcida com DTT de 6% constituída por componentes de ordem 3, 5, 7, 9, 11 e 13. Correntes trifásicas desequilibradas de 30,41% em magnitude, distorcida com DTI de 35% constituída por componentes de ordem 3, 5, 7, 9, 11 e 13. Fator de deslocamento 0,85 indutivo por fase.

Tabela 4.10 - Descrição dos Testes do Módulo I.

Ensaio	Características
X.1	Tensão fundamental nominal, equilibrada, senoidal (60 Hz), corrente de chaveamento, equilibrada, caracterizada por uma DTI de 61,1% e fator de deslocamento unitário.
X.2	Tensão fundamental nominal, equilibrada, senoidal (60 Hz), corrente de chaveamento, equilibrada, caracterizada por uma DTI de 55% e fator de deslocamento 0,84 indutivo.

Com o intuito de sistematizar a estrutura de testes propostos, apresenta-se no Apêndice I a planilha que contempla a sequência de experimentos a que cada medidor de energia elétrica deverá ser submetido.

4.5 – Estrutura laboratorial montada

Para fins do cumprimento dos propósitos definidos na pesquisa, faz-se necessário a utilização de recursos laboratoriais visando ao atendimento às premissas estabelecidas, quais sejam: a geração de tensões controladas trifásicas com e sem a imposição das condições anômalas atreladas com distorções harmônicas e desequilíbrios, e ainda, de forma concomitante, a produção de correntes independentes, também com as propriedades ora postas, ou seja, formas de onda com distorções e/ou desequilíbrios.

Para o atendimento às condições requeridas, na forma da geração de sinais trifásicos de tensão e corrente, independentes por fase, os quais serão objeto de imposição nas entradas de tensão e corrente dos medidores, a estrutura física concebida encontra-se fundamentada no arranjo mostrado na Figura 4.1. Esta representa, esquematicamente, o complexo laboratorial estabelecido.

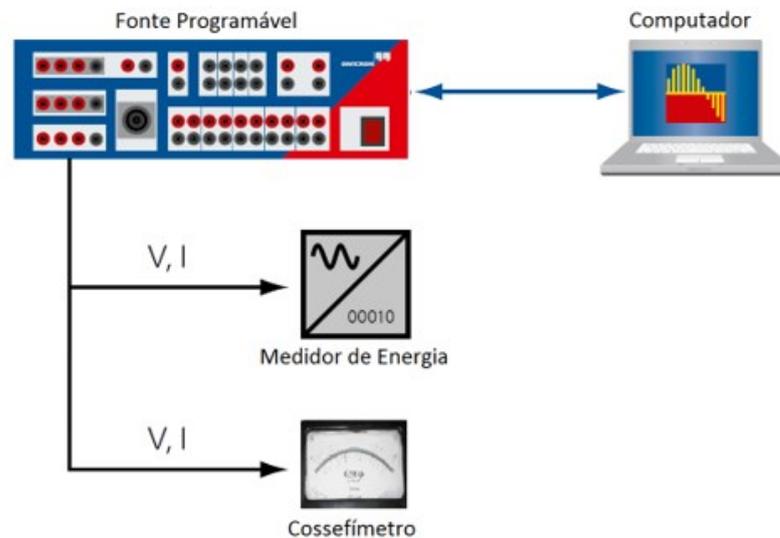


Figura 4.1 - Composição estrutural para o laboratório de testes.

Em atenção aos componentes que perfazem o complexo experimental idealizado, estes se apresentam como segue:

4.5.1 – Fonte controlada de tensão e corrente

Este dispositivo se apresenta como sendo o gerador de sinais de tensão e corrente, sob condições ideais e não ideais. O equipamento é de fabricação da OMICRON, modelo CMC 256 PLUS, e possui as seguintes características e potencialidades:

- Quatro (4) saídas monofásicas e independentes de tensão, que viabilizam a geração de sinais trifásicos individualmente controlados/programados por fase. Esta característica permite, pois, a disponibilização de sinais ideais ou com a presença de fenômenos anômalos à operação considerada ideal. Os sinais são galvanicamente separados e a existência do neutro oferece a factibilidade da obtenção de tensões fase-fase e fase-neutro. Também, as tensões são produzidas por canais independentes daqueles destinados à geração de correntes. As saídas de tensão funcionam em duas faixas quanto às intensidades das grandezas, uma compreendendo variações de 0 a 150 V, e outra, chegando a 300 V;
- Dois (2) conjuntos para a produção de correntes trifásicas (8 canais), independentemente controladas/programadas, permitindo, assim, a disponibilização de dois sistemas trifásicos de correntes com características ideais e não ideais. Vale ressaltar que as correntes são

produzidas de maneira independente das tensões, fato este que dá grande flexibilidade a estrutura laboratorial. As grandezas passíveis de obtenção chegam a níveis de 12,5 A quando do emprego da condição operativa trifásica. Cada saída está galvanicamente separada das demais.

4.5.2 – Cossefímetro

O medidor de fator de potência ou Cossefímetro corresponde ao instrumento de medida elétrica da grandeza em foco, todavia, de forma analógica, como é típica e comercialmente encontrado. Para fins deste trabalho é empregado um medidor produzido pela YEW (Yokogawa Electric Works) e modelo 2039. De acordo com o catálogo do fabricante e testes realizados no ambiente laboratorial da UFU, este equipamento fornece tão apenas o fator de deslocamento, grandeza associada, pois, ao cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e corrente fundamental. O emprego deste recurso se mostra relevante para o estabelecimento das bases comparativas entre os desempenhos dos medidores de energia a serem ensaiados por meio de suas indicações e desempenho diante das condições operativas com distorções e desequilíbrios.

4.5.3 – Computador

Este recurso se faz necessário para fins do controle das condições operativas a serem impostas aos equipamentos testados. Ao mesmo é implementado o *software* para a programação da sequência de sinais de tensão e corrente definidas nos testes de desempenho propostos. Portanto, uma vez definidos os testes específicos a serem feitos, estes são individualmente controlados pelo computador em questão, o qual aciona a fonte supramencionada, para a geração das tensões e correntes nos moldes desejados.

4.5.4 – Comentários gerais

Diante do exposto, a Figura 4.2 mostra o arranjo montado, fundamentado nas premissas estabelecidas. Nesta figura podem ser constatadas as unidades acima descritas, assim como a instalação física onde são inseridos os medidores de energia, os quais também se encontram devidamente ilustrados.



Figura 4.2 - Composição estrutural para o laboratório de testes.

Avaliações de desempenho da operação dos equipamentos apresentados evidenciaram que a estrutura laboratorial montada atende perfeitamente às necessidades associadas ao seguimento das atividades relacionadas aos ensaios de medidores. Conforme anteriormente definido, cada medidor de energia elétrica deverá ser submetido a uma sequência de vinte e nove testes, os quais foram divididos em dez módulos, abrangendo condições diversas de defasagem entre sinais de tensão e corrente, além de envolver distintos níveis de distorções e desequilíbrios nessas grandezas.

4.5.5 – Medidores utilizados nos ensaios

Foram ensaiados 18 medidores de energia elétrica, de 5 fabricantes distintos. As marcas e modelos dos instrumentos são exibidas na Tabela 4.11. Nesta tabela são apresentados também os códigos usados para referenciar cada instrumento no decorrer dos testes. Ressalta-se que dois dos medidores disponíveis para ensaio (ELSTER_A102C_RC e Elster_A3RBR_Plus) apresentaram defeito na bancada de testes, não sendo possível submete-los aos ensaios. A Tabela 4.12 apresenta imagens dos instrumentos envolvidos no procedimento.

Tabela 4.11 – Medidores de energia.

			
<p>Tipo: Medição Indireta</p>	<p>Tipo: Medição Direta</p>	<p>Tipo: Medição Direta</p>	<p>Tipo: Medição Direta</p>
			
<p>Tipo: Medição Direta (3 Fases)</p>	<p>Tipo: Medição Direta (3 Fases)</p>	<p>Tipo: Medição Direta (2 Fases)</p>	<p>Tipo: Medição Direta (3 Fases)</p>
			
<p>Tipo: Medição Direta (2 Fases)</p>	<p>Fabricante: ELO Modelo: 2173</p>	<p>Tipo: Medição Indireta (2 Fases)</p>	<p>Tipo: Medição Direta (3 Fases)</p>
	<p>Tipo: Medição Direta (3 Fases)</p>		



4.6 – Metodologia para a realização dos testes nos medidores

A metodologia para realização dos testes nos medidores pode ser resumida em: geração das formas de onda de tensão e corrente desejadas, programação da sequência de ensaios a serem realizados, captação dos dados fornecidos pelo medidor, tratamento e armazenamento das informações obtidas. A seguir encontram-se detalhados cada uma desses passos:

- Passo 1 – Geração das formas de onda de tensão e corrente desejadas: por meio do próprio *software* da fonte controlada OMICRON, módulo PQ SIGNAL GENERATOR, é possível programar as formas de onda dos sinais de tensão e corrente necessários para a realização dos ensaios dos módulos I a VIII. No entanto o *software* PQ Signal Generator não apresenta configurações de dois distúrbios simultâneos, ou seja, pode-se configurar apenas um distúrbio para cada ensaio realizado. O módulo de ensaio IX (que é caracterizado pela utilização de sinais que envolvem simultaneamente distorções harmônicas e desequilíbrio) e o módulo X (que envolve correntes de chaveamento) são realizados no *software* TransPlay. Este aplicativo reconhece arquivos no formato Comtrade ou Wave, com isso os sinais desejados para os módulos IX e X foram gerados no *software* ATP (*Alternative Transients Program*) e, em

seguida, o programa TOP (*The Output Processor*) foi usado para converter as formas de onda geradas no ATP (formato .pl4) para o formato Comtrade, o qual, por sua vez, é lido pela fonte OMICRON a partir do módulo TransPlay. A Figura 4.3 apresenta a interface do *software* TOP.

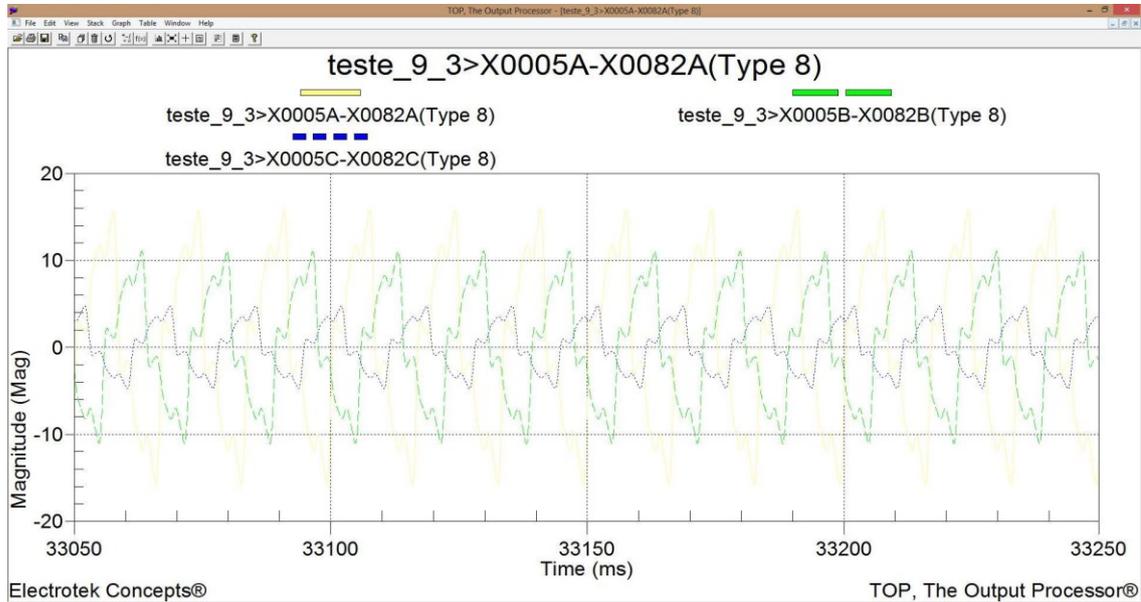


Figura 4.3 - Composição estrutural para o laboratório de testes.

- Passo 2 – Programação da sequência de ensaios a serem realizados: com o intuito de otimizar o procedimento de realização dos testes, o *software* da fonte é programado de maneira que, para cada fase, seja automaticamente aplicada a sequência de sinais de todos os ensaios que constituem os testes. Os módulos I a VIII, como mencionado anteriormente, foram programados no software PQ Signal Generator, ilustrado na Figura 4.4. Dessa forma, os sinais de tensão e corrente de cada ensaio são aplicados durante 90 segundos, com tempo de interrupção de 15 segundos entre cada teste nos módulos de I a VIII e 30 segundos entre os dois últimos módulos, que foram programados no aplicativo TransPlay, conforme Figura 4.5. Para cada medidor, a sequência é executada uma primeira vez para a obtenção dos dados relativos à potência ativa e, em seguida, o processo é repetido para captação da medição de potência reativa.

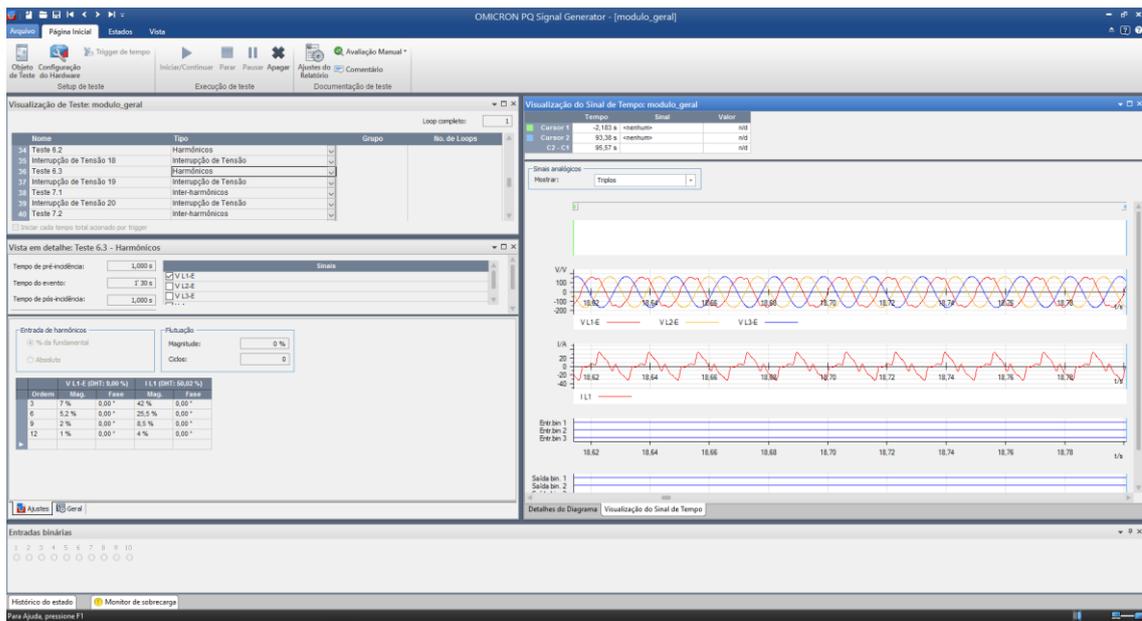


Figura 4.4 - Interface *software* PQ Signal Generator.

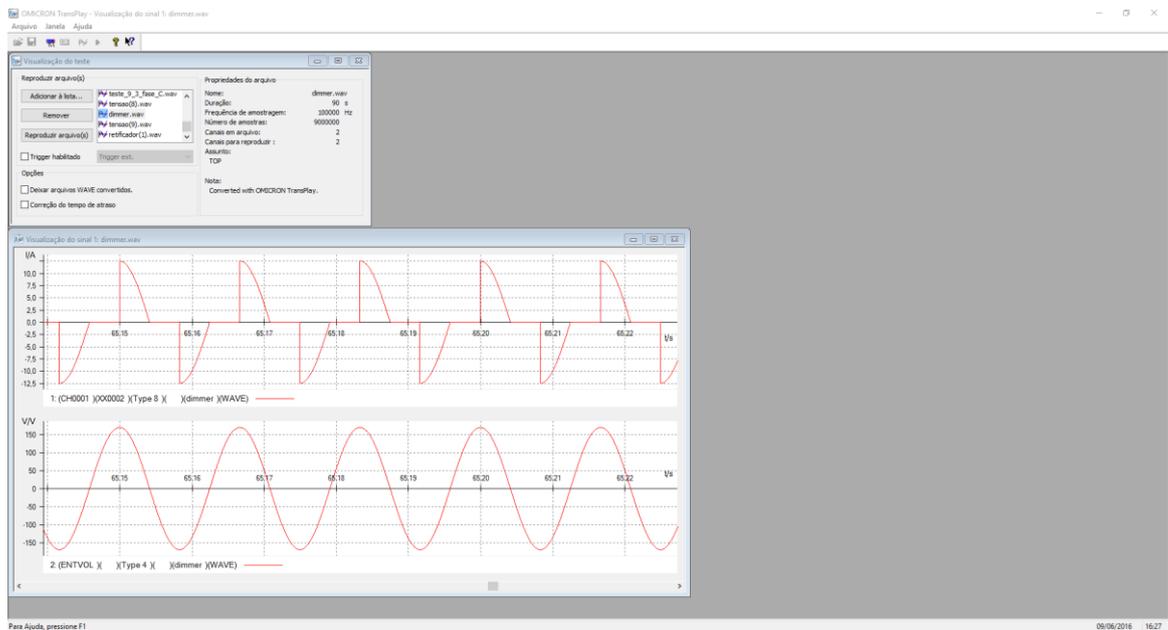


Figura 4.5 - Interface *software* TransPlay.

- Passo 3 – Captação dos dados fornecidos pelo medidor: para possibilitar a leitura dos dados fornecidos pelos medidores foi usado um acessório da fonte OMICRON denominado como Cabeça de Escaneamento Óptico OSH 256 (*Optical Scanning Head 256*). Este instrumento é capaz de detectar o status de LEDs de saídas de pulsos ópticos de medidores de energia elétrica. O sensor é acompanhado por um cabo para conexão direta na fonte.
- Passo 4 – Tratamento e armazenamento das informações obtidas: diante do exposto, com base no tempo decorrido entre dois pulsos consecutivos dos LEDs e conhecendo-se as constantes dos medidores (Wh/pulso e VARh/pulso) torna-se possível obter os valores de potência ativa (P) e potência reativa (Q) medidas pelos equipamentos em avaliação:

$$P = \frac{Wh}{(\text{tempo entre dois pulsos}[h])} \quad (2.187)$$

$$Q = \frac{VArh}{(\text{tempo entre dois pulsos}[h])} \quad (2.188)$$

O módulo *Meter* da fonte OMICRON permite realizar este procedimento para teste de medidores.

4.7 – Resultados e análise crítica

Apresentam-se, a seguir, os resultados obtidos para os distintos ensaios supra identificados, os quais obedecem a seguinte estratégia metodológica:

- São apresentados os desvios obtidos para as potências ativas, potências reativas e respectivos fatores de potência para cada teste e equipamento;
- Os desvios indicados representam as discrepâncias encontradas entre as grandezas medidas nos ensaios e aquelas determinadas analiticamente, tomando por base ou referência, aquelas obtidas através de tensões e corrente puramente senoidais e equilibradas.

Ressalta-se que, devido à sua grande importância, apenas os testes referentes ao retificador de meia onda e o dimmer são apresentados aqui. Os demais estão presentes no Apêndice II.

4.7.1 – Módulo X - Tensão puramente senoidal e correntes de chaveamento (retificador de meia-onda e dimmer)

Foram contemplados os ensaios envolvendo sinais de tensão senoidais e corrente sob condições especiais, para o caso, associadas com o suprimento de dispositivos típicos e representativos de ações de chaveamento, a exemplo de retificadores de meia onda e dimmer, ambos suprindo cargas puramente resistivas. Os resultados advindos destes ensaios encontram-se fornecidos na Tabela 4.13.

Para o teste em pauta, quando do emprego de um retificador de meia onda, ressalta-se uma particularidade, representada como um valor nulo para a potência reativa, visto não haver uma região para a qual a corrente se mostra inexistente. Nestas condições torna-se impraticável o cálculo dos desvios das potências reativas pois o valor indicado pelo medidor, embora distinto de zero, não possui uma correlação com um valor nulo estimado analiticamente. Não obstante esta situação, as indicações de potências reativas pelos medidores, para os casos em que isto ocorreu, implicaram em fatores de potência diferentes da unidade e esta comparação conduziu aos valores constantes para estas grandezas na tabela, com expressivas discrepâncias para a maioria dos casos. Os demais casos, para

os quais os medidores indicaram valores de potências reativas nulas, mostraram concordância plena entre os fatores de potência esperados e os encontrados.

Tabela 4.12 – Desvios dos medidores no Módulo X.

Medidor	Desvio (%)					
	Ensaio X.1			Ensaio X.2		
	W	var	FP	W	var	FP
A.1	36,99	-	13,89	1,59	0,66	0,25
A.2	1,05	-	2,46	1,74	0,12	0,55
A.3	1,35	-	0,63	1,75	0,03	0,49
B.1	0,68	-	0,00	1,70	0,02	0,47
B.2	73,10	-	38,63	4,97	0,94	1,11
B.3	0,71	-	0,00	1,72	0,06	0,50
C.1	1,50	-	2,46	2,10	1,22	0,55
C.2	27,62	-	24,11	1,29	46,68	12,85
C.3	29,80	-	23,88	0,06	45,50	13,06
C.4	35,91	-	25,95	0,02	50,57	14,44
C.5	38,42	-	28,34	0,01	51,34	14,65
C.6	0,15	-	0,00	2,36	1,74	0,17
C.7	0,08	-	0,00	1,84	1,96	0,03
D.1	0,85	-	0,00	2,18	0,53	0,47
D.2	0,93	-	0,00	1,97	0,63	0,38
E.1	1,75	-	0,00	0,82	0,19	0,29
E.2	1,51	-	0,00	4,12	0,36	1,35
E.3	9,46	-	2,46	2,01	0,74	0,55

4.8 – Considerações Finais

A Tabela 4.14 é indicativa de uma síntese dos resultados obtidos, indicando, de forma clara, os medidores que foram afetados e apresentaram desvios acima dos valores prescritos pela norma ABNT NBR 14520:2011, de acordo com a classe de exatidão de cada medidor testado.

Tabela 4.13 – Desvios dos medidores no Módulo I.

Medidores	Módulo																						
	I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII		IX		X.1		X.2		
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q	
A.1							•		•	•	•							•		•	•	•	
A.2							•		•	•	•							•		•	•	•	
A.3							•		•	•	•							•		•	•	•	
B.1							•		•	•	•							•				•	
B.2							•		•	•	•							•		•	•	•	

B.3							•		•	•	•						•				•	
C.1							•		•		•						•		•	•	•	•
C.2				•		•	•	•	•	•	•	•					•	•	•	•	•	•
C.3				•		•	•	•	•	•	•	•					•	•	•	•		•
C.4				•		•	•	•	•	•	•	•					•	•	•	•		•
C.5				•		•	•	•	•	•	•	•					•	•	•	•		•
C.6							•		•	•	•						•					•
C.7							•		•	•	•						•					•
D.1							•		•	•	•						•					•
D.2							•		•	•	•						•					•
E.1							•		•	•	•						•	•	•			
E.2							•		•	•	•						•		•			•
E.3							•		•	•	•	•					•		•	•	•	•

Capítulo V

Proposição de Metodologia Para Cálculo de Fator de Potência

5.1 – Considerações iniciais

Este capítulo tem o intuito de apresentar uma nova proposição relacionada à quantificação do fator de potência diante de condições não ideais. Dentro desse contexto, descreve-se, em um primeiro momento, as principais propostas encontradas na literatura para cálculo do fator de potência. A partir disso, são apresentados os fundamentos físicos de uma nova proposição relacionada ao assunto, e são discutidas análises envolvendo simulações computacionais, com foco na investigação da resposta do método proposto quando da presença de desequilíbrios.

5.2 – Propostas elementares encontradas na literatura

Desde o início do século XX o assunto da definição de potências quando os sinais de tensão e corrente não se encontram puramente senoidais e equilibrados vem sendo amplamente discutido. Diante da relevância dessa problemática, com o passar dos anos diversos pesquisadores propuseram as mais diferentes abordagens acerca do assunto, conforme já mencionado ao decorrer dessa dissertação. Apesar das distintas interpretações que abrangem o tema relacionado a estratificações de potência, nota-se que existem apenas três diferentes formas de se realizar a quantificação do fator de potência, quais sejam:

- $\cos(\phi_1) = P_1/S_1$: neste caso o fator de potência está exclusivamente associado ao fenômeno físico da defasagem entre tensão e corrente (ϕ_1), levando em consideração tão somente a frequência fundamental do sistema, numericamente igual à relação entre potência ativa fundamental (P_1) e potência aparente fundamental (S_1). A grandeza em pauta pode ser calculada de forma aritmética (fator de potência aritmético) ou vetorial (fator de potência vetorial), sendo que os mesmos assumirão valores diferentes para os circuitos trifásicos desequilibrados;
- P/S : neste caso a potência ativa (P) e a potência aparente (S) empregam, para seus cálculos, a frequência fundamental e todas as componentes harmônicas presentes nos sinais envolvidos, assim como os desequilíbrios existentes de tensão e corrente. Neste sentido, P representa o somatório das potências ativas relacionadas a cada frequência presente no circuito em análise e S é quantificado pelo produto dos valores eficazes de tensão e corrente em todas as frequências;
- P/S_e : este é um conceito sugerido pelo documento IEEE 1459-2010 e leva em conta a relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente efetiva (S_e). O termo “efetivo” está associado,

essencialmente, ao conceito de uso do fio ou sua ocupação. Não obstante à contundente defesa apresentada no documento IEEE 1459-2010, o próprio documento reconhece que a impossibilidade de se conhecer a todo instante a resistência equivalente do caminho de neutro inviabiliza a aplicação prática desse conceito, apesar de sua forma teórica matematicamente correta e elegante.

5.3 – Nova proposição para o cálculo do fator de potência

Dentro dos entendimentos do presente grupo de pesquisa, o procedimento de inclusão dos efeitos das distorções harmônicas no cálculo do fator de potência não se apresenta adequado. Muito embora se reconheça que as correntes de frequências múltiplas inteiras da fundamental ocupam espaço na capacidade física de condutores e podem, por isso, gerar uma série de efeitos indesejados, como sobrecargas, sobreaquecimentos e aumento de perdas por Efeito Joule, nota-se que as componentes harmônicas não participam do processo de conversão eletromecânica da energia elétrica. Dessa forma, considera-se apropriado regulamentar limites relacionados aos níveis de distorções harmônicas em sistemas elétricos, mas de maneira dissociada da quantificação do fator de potência. A incorporação das componentes harmônicas na quantificação do fator de potência resultaria em uma dupla consideração do fenômeno em termos da regulamentação vigente.

Dessa forma, portanto, poder-se-ia sugerir inicialmente que o fator de potência fosse quantificado levando-se em conta apenas as componentes de tensão e corrente na frequência fundamental (fator de potência de deslocamento), conforme indicado em (5.1).

$$fp = \frac{P_1}{S_1} = \cos(\phi_v - \phi_i) \quad (5.1)$$

Contudo, seguindo-se o mesmo raciocínio aplicado à questão da análise das componentes harmônicas, observa-se que também os desequilíbrios de tensão e corrente (representados pelas suas respectivas componentes simétricas) não contribuem para a conversão eletromecânica da energia elétrica. Adicionalmente, no que tange ao desequilíbrio, a proposta apresentada pela IEEE 1459-2010 (P/Se), apesar de exata e elegante em termos teóricos, apresenta grandes dificuldades no que diz respeito à sua aplicação prática. Dessa forma, faz-se necessário buscar uma nova solução para a definição de fator de potência, a qual deve ser capaz de unir consistência físico-elétrica e praticidade.

Diante desse contexto, busca-se então a concepção de uma metodologia que desconsidere, de forma simultânea, tanto as componentes harmônicas quanto as componentes de sequência dos sinais de tensão e corrente na quantificação do fator de potência. No que diz respeito à não consideração das componentes harmônicas muito já foi comentado ao longo desse trabalho, sendo que esse

propósito pode ser facilmente obtido pela utilização direta da equação (5.1), sem maiores complicações. Por outro lado, a questão da desconsideração dos desequilíbrios de tensão e corrente no cálculo do fator de potência, quantificados pelas suas respectivas componentes simétricas, ainda carece de maiores análises, as quais são apresentadas a seguir.

5.4 – Análise das componentes simétricas em termos de potência

Para todos os propósitos práticos, as tensões e correntes nas barras dos geradores, sob condições normais de operação, são constituídas basicamente por componentes de sequência positiva. Assim, torna-se apropriado se perguntar: como são geradas as componentes de sequência negativa e zero de tensão e corrente se todas as fontes de potência do sistema não geram esse tipo de energia? A resposta é simples e evidente: as cargas desequilibradas convertem a energia de sequência positiva recebida da fonte em energia de sequência negativa e zero, da mesma forma que uma carga não-linear converte parte da energia recebida da fonte em energia associada a frequências harmônicas. A Figura 5.1 apresenta um exemplo bastante didático [17] para o entendimento dessa questão, considerando-se um sistema trifásico hipotético a três fios, com fontes de tensão perfeitamente equilibradas e carga desequilibrada representada por impedâncias distintas em cada fase, em série com tensões de sequência positiva e negativa.

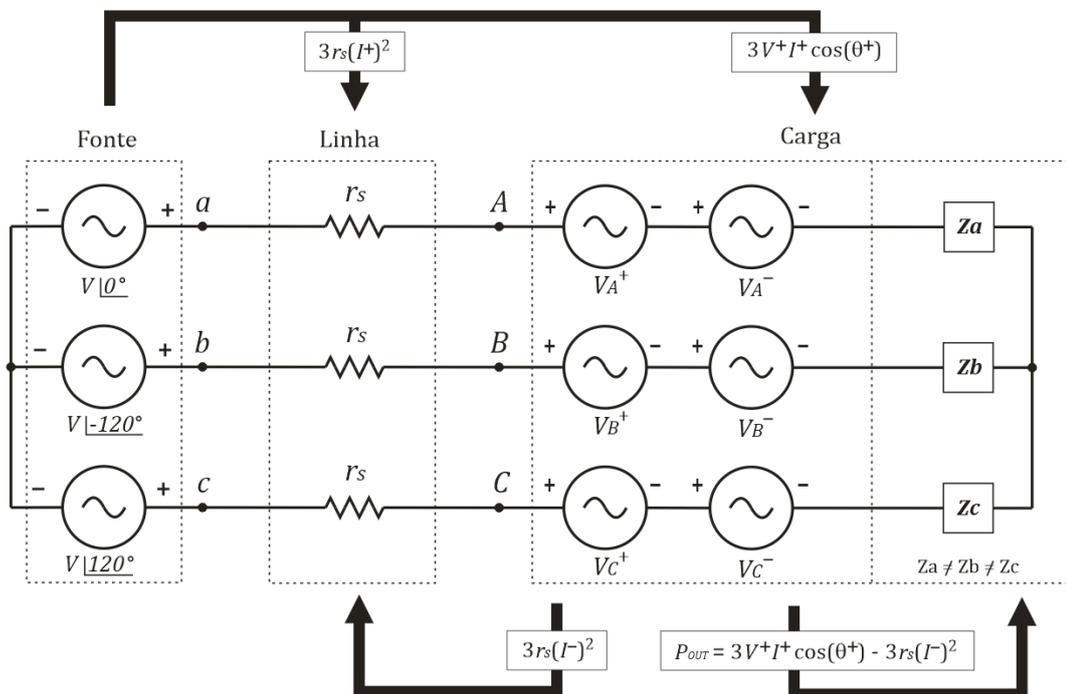


Figura 5.1 – Fluxo de potência ativa em um sistema trifásico a três fios com carga desequilibrada.

Com base nas considerações indicadas na Figura 5.1, a fonte produz a seguinte potência instantânea:

$$P_G = v_a i_a^+ + v_b i_b^+ + v_c i_c^+ \quad (5.2)$$

Considerando ainda que a fonte deve simultaneamente entregar potência para a carga e suprir as perdas na linha, tem-se:

$$P_G = v_a i_a^+ + v_b i_b^+ + v_c i_c^+ = r_s \left[(i_a^+)^2 + (i_b^+)^2 + (i_c^+)^2 \right] + P_C \quad (5.3)$$

Onde:

v_a , v_b e v_c são as tensões de fase instantâneas na fonte;

i_a^+ , i_b^+ e i_c^+ são as correntes de linha instantâneas de sequência positiva;

r_s é a resistência da linha;

P_G é a potência gerada pela fonte;

P_C é a potência de sequência positiva entregue à carga pela fonte.

A potência instantânea medida nos terminais da carga (pontos A, B e C) pode ser calculada da seguinte forma:

$$p_{OUT} = v_A^+ i_a^+ + v_B^+ i_b^+ + v_C^+ i_c^+ + v_A^- i_a^- + v_B^- i_b^- + v_C^- i_c^- \quad (5.4)$$

Onde:

v_a^+ , v_b^+ e v_c^+ são as tensões de fase de sequência positiva nos terminais da carga;

v_a^- , v_b^- e v_c^- são as tensões de fase de sequência negativa nos terminais da carga;

i_a^+ , i_b^+ e i_c^+ são as correntes de linha de sequência positiva;

i_a^- , i_b^- e i_c^- são as correntes de linha de sequência negativa.

Com base no circuito da Figura 5.1, tem-se ainda que as tensões de fase na fonte podem ser expressas da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} v_a &= v_A^+ + r_s i_a^+ & v_A^+ &= v_a - r_s i_a^+ \\ v_b &= v_B^+ + r_s i_b^+ & \Rightarrow v_B^+ &= v_b - r_s i_b^+ \\ v_c &= v_C^+ + r_s i_c^+ & v_C^+ &= v_c - r_s i_c^+ \end{aligned} \quad (5.5)$$

Tendo-se ainda que:

$$\begin{aligned} v_A^- + r_s i_a^- &= 0 \\ v_B^- + r_s i_b^- &= 0 \\ v_C^- + r_s i_c^- &= 0 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Substituindo-se as equações (5.5) e (5.6) em (5.4), resulta:

$$\begin{aligned}
 p_{OUT} &= (v_a - r_s i_a^+) i_a^+ + (v_b - r_s i_b^+) i_b^+ + (v_c - r_s i_c^+) i_c^+ + (-r_s) \left[(i_a^-) i_a^- + (i_b^-) i_b^- + (i_c^-) i_c^- \right] \\
 &= (v_a i_a^+ + v_b i_b^+ + v_c i_c^+) - r_s \left[(i_a^+)^2 + (i_b^+)^2 + (i_c^+)^2 \right] - r_s \left[(i_a^-)^2 + (i_b^-)^2 + (i_c^-)^2 \right]
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

Comparando-se (5.7) com (5.3), fica evidente que, sendo que a diferença expressa por:

$$p_C - p_{OUT} = r_s \left[(i_a^-)^2 + (i_b^-)^2 + (i_c^-)^2 \right] = -(v_A^- i_a^- + v_B^- i_b^- + v_C^- i_c^-) \tag{5.8}$$

é devolvida para a fonte ou, em outras palavras, a parcela de perdas representada por $r_s \left[(i_a^-)^2 + (i_b^-)^2 + (i_c^-)^2 \right]$ é inteiramente suprida pela carga desequilibrada, a qual recebe potência de sequência positiva igual a:

$$v_a i_a^+ + v_b i_b^+ + v_c i_c^+ - r_s \left[(i_a^+)^2 + (i_b^+)^2 + (i_c^+)^2 \right] \tag{5.9}$$

resultando nos terminais da carga uma potência total instantânea quantificada como:

$$v_a i_a^+ + v_b i_b^+ + v_c i_c^+ - r_s \left[(i_a^+)^2 + (i_b^+)^2 + (i_c^+)^2 \right] - r_s \left[(i_a^-)^2 + (i_b^-)^2 + (i_c^-)^2 \right] \tag{5.10}$$

Da análise dessa última expressão em relação à (5.8), fica evidente que a potência de sequência negativa, expressa por $r_s \left[(i_a^-)^2 + (i_b^-)^2 + (i_c^-)^2 \right]$, não contribui em nada para a potência efetivamente desenvolvida na carga. Essa parcela de potência de sequência negativa é parte de um processo de conversão onde uma pequena quantidade de energia recebida pela carga (suprida pela fonte) retorna para o sistema, suprimindo parte das perdas na linha, sem a realização de trabalho útil no lado da carga, exatamente como no caso das componentes harmônicas quando da presença de cargas não-lineares. De forma similar, pode-se comprovar a não participação das componentes de sequência zero no processo de conversão da energia elétrica, bastando para esse propósito considerar um sistema trifásico a quatro fios composto por fontes equilibradas e cargas desequilibradas.

5.5 – Proposta para o cálculo do fator de potência

Diante das premissas e constatações apresentadas nos tópicos anteriores, fica aqui evidente a proposição de uma metodologia para quantificação do fator de potência que desconsidere tanto as componentes harmônicas, como as componentes de sequência negativa e zero associadas ao desequilíbrio das cargas.

Tal metodologia baseia-se simplesmente na consideração apenas das componentes de potência de sequência positiva ou, matematicamente:

$$fp = \frac{P^+}{S^+} = \frac{|V^+| \times |I^+| \times \cos(\phi^+)}{|V^+| \times |I^+|} = \cos(\phi^+) \quad (5.11)$$

Em termos de componentes simétricas [2], partindo-se das tensões de fase e das correntes de linha do sistema, na frequência fundamental, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Consequentemente,

$$\dot{I} = \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \quad \dot{V} = \frac{1}{3} (\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c) \quad (5.13)$$

Assim,

$$\begin{aligned} P^+ &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \cdot \frac{1}{3} (\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c) \cos(\phi^+) \\ S^+ &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \cdot \frac{1}{3} (\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c) \end{aligned} \quad (5.14)$$

Resultando, finalmente:

$$fp = \frac{P^+}{S^+} = \frac{|V^+| \times |I^+| \times \cos(\phi^+)}{|V^+| \times |I^+|} = \frac{\frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \cdot \frac{1}{3} (\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c) \cos(\phi^+)}{\frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \cdot \frac{1}{3} (\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c)} = \cos(\phi^+)$$

Com base em (5.14), observa-se que a implementação da metodologia ora proposta pode ser simplificada considerando-se tão somente a identificação do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente de sequência positiva. A Figura 5.2 apresenta o diagrama de blocos representativo da metodologia de cálculo do fator de potência com base nas componentes de tensão e corrente de sequência positiva.

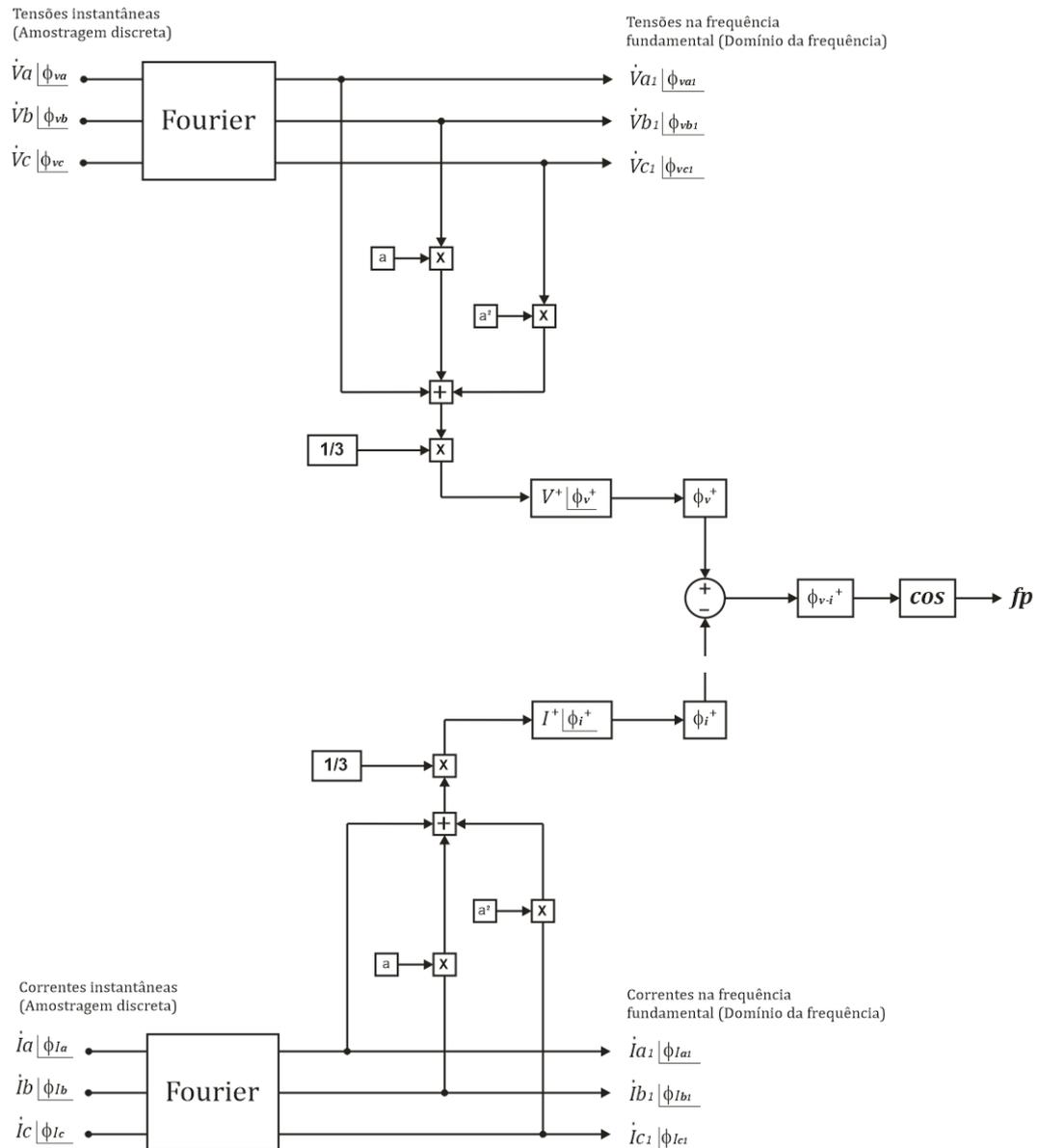


Figura 5.2 – Diagrama de blocos ilustrativo do cálculo do fator de potência de sequência positiva.

Para implementação desta metodologia em medidores de faturamento de energia elétrica, no entanto, será necessária também a extração das potências ativa e reativa de sequência positiva, uma vez que os excedentes de demanda e energia reativa são quantificados a partir dessas grandezas. Assim, o diagrama de blocos apresentado na Figura 5.2 pode ser modificado de forma a se obter as potências ativa e reativa de sequência positiva, conforme mostrado na Figura 5.3.

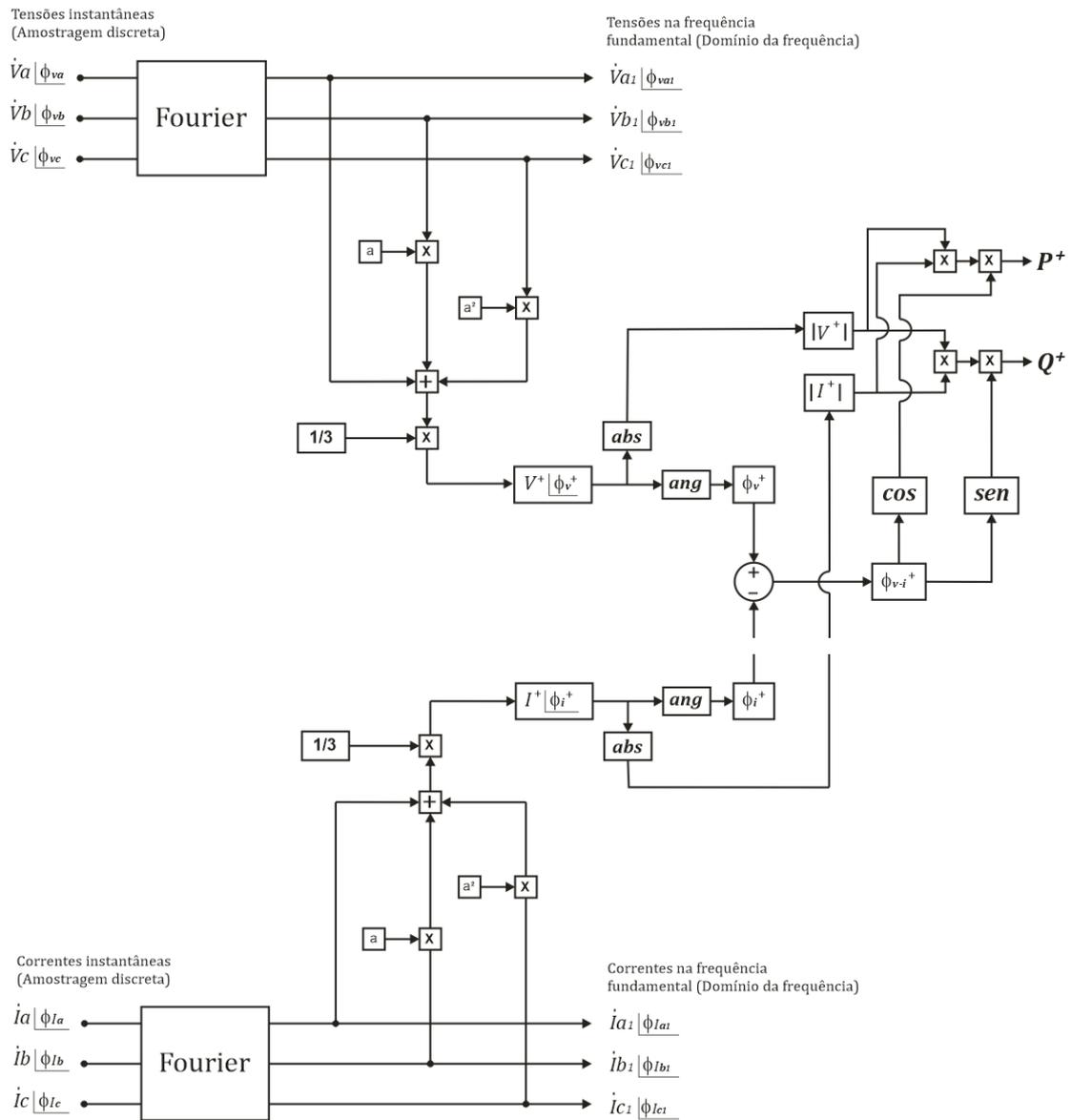


Figura 5.3 – Diagrama de blocos ilustrativo do cálculo das potências ativa e reativa de sequência positiva.

Considerando-se que, por definição, o sistema de sequência positiva obtido é perfeitamente equilibrado, tem-se:

$$\begin{aligned}
 P_{TOTAL} &= 3 \times (P^+) \\
 Q_{TOTAL} &= 3 \times (Q^+) \\
 S_{TOTAL} &= \sqrt{P_{TOTAL}^2 + Q_{TOTAL}^2}
 \end{aligned}
 \tag{5.16}$$

Resultando, finalmente:

$$f_p^+ = \frac{P_{TOTAL}}{Q_{TOTAL}}
 \tag{5.17}$$

Capítulo VI

Implementação em Protótipo de Medidor e Medições de Teste

6.1 – Considerações iniciais

Após a proposição da metodologia para o cálculo de fator potência, torna-se necessária à sua implementação prática para concretizar a validação da mesma, na conjuntura atual dos sistemas elétricos.

Para isso, visto que existem diversos tipos de carga conectadas aos sistemas elétricos, em diferentes pontos e níveis de tensão do mesmo, simulações computacionais não poderiam traduzir todas as características intrínsecas do sistema elétrico. Deste modo, a alternativa escolhida foi a implementação das metodologias de cálculo de fator de potência em um medidor real, tanto as metodologias já consolidadas quanto a metodologia proposta.

Deste modo, em suma, o presente capítulo apresentará algumas informações relacionadas com o medidor implementado, bem como das cargas e os resultados das medições realizadas.

6.2 – Medidor e pontos de medição

O medidor utilizado nas medições é apresentado na Figura 6.1. O mesmo possui as seguintes características: Classe D; Medição indireta; Tensão de operação 120~220V; Corrente 2,5 (20)A; Frequência 60Hz; 4 fios.



Figura 6.1 – Medidor de energia elétrica para cálculo da nova metodologia.

Os pontos onde foram realizadas as medições com o protótipo de medidor são enumerados a seguir, bem como as principais características das cargas presentes:

Tabela 6. 1 – Pontos medição protótipo com metodologias.

Consumidor	Tipo	Produto	Tensão
Arcellor-Mittal (Aciaria - Cariacica - ES)	Industrial	Aço	138 kV (A2)
Bauminas Mineração	Industrial	Mineração	22 kV (A4)
Bela Ischia	Industrial	Sucos	11,4 kV (A4)
TV João Pessoa	Comercial	Televisão	11,4 kV (A4)
HORII AGROINDUSTRIAL DE MINERIOS	Industrial	Minério	34,5 kV (A3a)
Hospital UNIMED	Hospital	Saúde	11,4 kV (A4)
INTERCEMENT BRASIL S.A.	Industrial	Cimento	138 kV (A2)
M DIAS BRANCO AS	Industrial	Mecânica	11,4 kV (A4)
Mineração Corumbaense	Industrial	Minério de Ferro	34,5 kV
BRITAMAT	Industrial	Mineração	13,8 kV
Shopping Manaíra	Comercial	Lojas	13,8 kV (A4)
TCIL Móveis Ltda.	Industrial	Móveis	11,4 kV (A4)
TECAB	Industrial	Mecânica	11,4 kV (A4)
TV Cabo Branco	Comercial	Televisão	11,4 kV (A4)
Uba Ferrominas Perfilados Ltda.	Industrial	Perfilados Metálicos	11,4 kV (A4)
Votorantim Cimentos S.A.	Industrial	Cimento	138 kV (A2)

6.3 – Resultados das medições em campo

A seguir, são apresentados os principais resultados das medições realizadas com o protótipo de medidor. Ressalta-se que, no presente capítulo, são apresentados apenas os resultados que dizem respeito às medições no forno a arco da indústria Arcellor-Mittal (44 MW), uma vez que, em geral, as características dessa carga podem representar todas as demais. Além disso, as formas de onda de

corrente e tensão desse tipo de instalação apresentam características que podem ser ditas desafiadoras para a metodologia proposta. Os demais resultados encontram-se não Apêndice III.

Tabela 6.2 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto).

Arcellor-Mittal	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	46.805,63	53.029,594	52.437,19	0,94
Mínimos	70,37	0,00	0,00	-0,10
Médios	18.508,49	12.532,47	27.987,65	0,86
Consumo (kWh/kvarh)	365.542,69	247.516,22	552.756,16	-

Tabela 6.3 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão).

Arcellor-Mittal	Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	46.805,63	46.517,283	52.428,59	0,94
Mínimos	70,37	0,00	0,00	-0,11
Médios	18.508,49	9.963,48	25.970,61	0,87
Consumo (kWh/kvarh)	365.542,69	196.778,67	512.919,64	-

Tabela 6.4 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente).

Arcellor-Mittal	Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	46.805,63	43.947,494	52.177,14	0,94
Mínimos	70,37	0,00	0,00	-0,11
Médios	18.508,49	9.188,11	26.060,43	0,87
Consumo (kWh/kvarh)	365.542,69	181.465,13	514.693,48	-

Tabela 6.5 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão).

Arcellor-Mittal	Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	46.805,63	45.147,266	52.422,03	0,95
Mínimos	70,37	0,00	0,00	-0,11
Médios	18.508,49	9.744,53	26.016,06	0,87
Consumo (kWh/kvarh)	365.542,69	192.454,54	513.817,25	-

Tabela 6.6 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão).

Arcellor-Mittal	Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	46.805,63	45.494,401	52.422,54	0,94
Mínimos	70,37	0,00	0,00	-0,11
Médios	18.508,49	9.826,52	25.953,58	0,87
Consumo (kWh/kvarh)	365.542,69	194.073,76	512.583,18	-

Tabela 6.7 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental).

Arcellor-Mittal	Método Fourier (Apenas Fundamental)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	48.518,41	47.798,003	52.430,36	0,94
Mínimos	70,54	0,00	0,00	-0,11
Médios	18.893,91	10.390,55	26.498,11	0,87
Consumo (kWh/kvarh)	373.154,68	205.213,27	523.337,71	-

Tabela 6.8 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva).

Arcellor-Mittal	Método UFU (Sequência Positiva)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	47.175,34	46.730,315	52.429,91	0,94
Mínimos	70,63	0,00	0,00	-0,11
Médios	18.523,82	10.396,98	26.330,11	0,87
Consumo (kWh/kvarh)	365.845,35	205.340,36	520.019,69	-

Antes de interpretar os resultados obtidos, deve-se ressaltar que a carga em questão está vinculada com a presença de um conteúdo harmônicos acentuado, bem como um alto grau de desequilíbrio de corrente.

Vale ainda lembrar que a potência da carga é relativamente grande em relação ao nível de curto-circuito e, assim, é perfeitamente compreensível que os desequilíbrios e distorções harmônicas presentes nas formas de onda de corrente também estejam presentes nas formas de onda de tensão.

Primeiramente, pode-se observar as diferenças vinculadas com o cálculo da potência ativa. É notável que, a potência ativa média calculada pelas metodologias tradicionais é relativamente menor que a potência ativa média calculadas a partir das grandezas fundamentais. Tal fato é explicado uma vez que o sentido da potência ativa vinculada com componentes não-fundamentais é da carga para o sistema elétrico. Assim, o fluxo de potência ativa não-fundamental é contrário ao fluxo de potência ativa fundamental, reduzindo assim o valor médio.

Ainda no que diz respeito à potência ativa, verifica-se que a potência média obtida através da metodologia proposta é relativamente menor que o valor médio obtido apenas pelas grandezas fundamentais. Uma vez que a carga em questão possui alto grau de desequilíbrio, é evidente que há um fluxo de potência ativa de sequência negativa cujo fluxo possui sentido contrário ao fluxo de potência ativa de sequência positiva, reduzindo assim o valor médio final.

Tais diferenças são de suma importância para a análise e de interesse para as distribuidoras e para os consumidores, uma vez que está envolvida diretamente na receita de ambas as partes.

No que tange a potência reativa, percebe-se que o valor médio para onde as metodologias ditas tradicionais divergem umas das outras. O motivo para as diferenças encontradas está vinculado à cada método de cálculo. A potência reativa média obtida pela metodologia do triângulo de potências é relativamente maior que as demais metodologias tradicionais. Tal fato pode ser explicado uma vez que a potência reativa deste método é obtida com base no valor das potências ativas e aparentes previamente calculadas. Uma vez que estes valores sofrem interferência das distorções harmônicas e desequilíbrios, o valor de potência reativa torna-se discrepante perante às demais metodologias.

As metodologias que não utilizam quaisquer tipos de transformada, apresentaram valores inferiores pois possuem certas particularidades, na forma de medição, quando aplicada a sinais de tensão e corrente distorcidos e desequilibrados.

Em relação às metodologias que fazem uso apenas das componentes fundamentais, o valor médio da potência reativa é relativamente maior que as obtidas pelas metodologias tradicionais (exceto para a metodologia que faz uso do triângulo de potência).

As informações apresentadas acima podem ser visualizadas nas figuras abaixo:

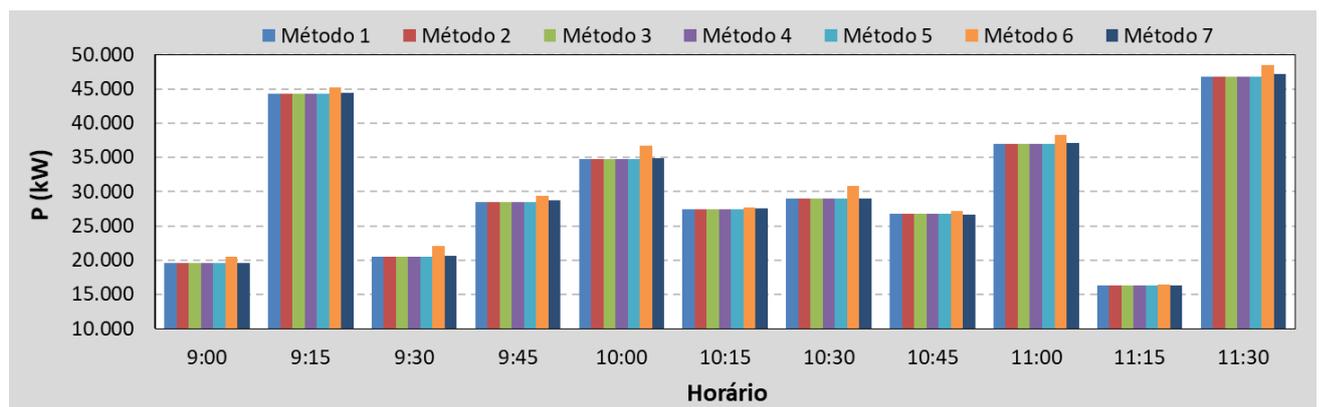


Figura 6.2 – Resultados das medições de potência ativa através das metodologias consideradas.

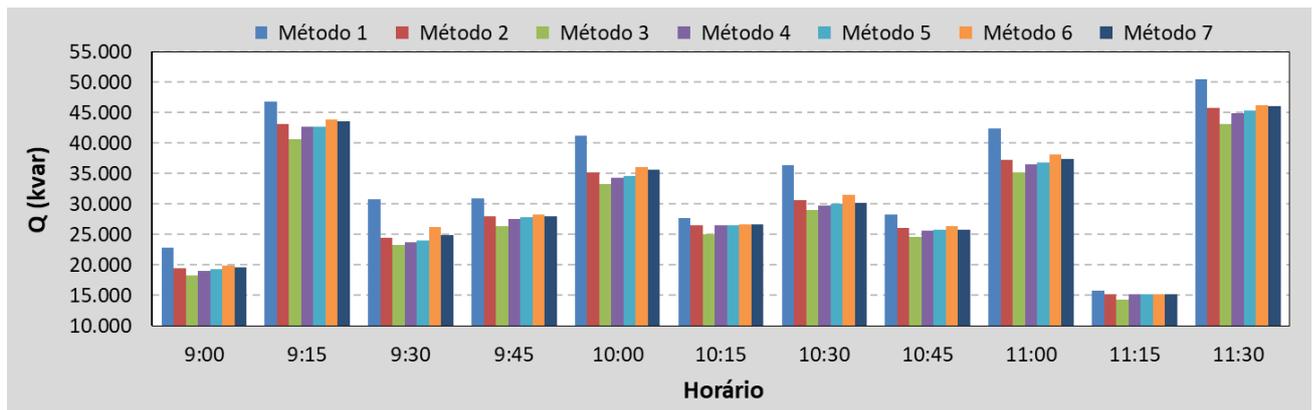


Figura 6.3 – Resultados das medições de potência reativa através das metodologias consideradas.

Conclusões

O presente trabalho teve como contexto principal o estudo das metodologias de cálculo de potência propostos na literatura, bem como a proposição de uma nova metodologia de cálculo de fator de potência.

No capítulo 2 foram apresentadas e detalhadas as metodologias tradicionais de cálculo das potências. As metodologias apresentadas contemplam uma considerável quantidade de definições, desenvolvimentos e desdobramentos matemáticos, fato este que coloca os pesquisadores do assunto instigados diante de variadas possibilidades de interpretação. Talvez a principal dificuldade relacionada ao tema seja concordar, de maneira acertada, uma descrição matemática consistente e uma elucidação física límpida dos fenômenos que ocorrem na transferência de energia de circuitos elétricos que possuem sinais distorcidos e/ou desequilibrados.

O fato de considerar os efeitos da presença de distorções harmônicas no cálculo do fator de potência é objeto de discussões porque, se por um lado as harmônicas não participam do processo de conversão da energia elétrica, por outro elas ocupam espaço nos condutores, e ao redor deles, assim como incrementam as perdas Joule.

No capítulo 3 foi apresentada a implementação computacionais dos cálculos das metodologias tratadas. Para tal, foi utilizado o software MATLAB. Os resultados obtidos serviram de base para a interpretação da metodologia de cálculo de cada teoria de potência.

O capítulo 4, centrado no objetivo de uma análise crítica dos resultados obtidos dos ensaios realizados nos 18 medidores de energia, em consonância com o caderno de testes proposto e aprovado, somado às constatações já realizadas e descritas ao longo das seções indicativas dos resultados, conduziu às seguintes constatações de caráter geral:

- Há efetivas influências das distorções harmônicas nos resultados das medições de potência ativa, cujas intensidade dependem das ordens harmônicas e respectivas amplitudes, desde que estas se manifestem, concomitantemente, nas tensões e correntes;

- No que tange às potências reativas, alguns medidores ensaiados indicaram divergências entre os valores medidos e os esperados sob a ação de: distorções harmônicas de tensão, com a corrente puramente senoidal; distorções harmônicas de corrente com tensão puramente senoidal; distorções em ambos sinais quando da presença de ordens harmônicas ímpares e múltiplas de 3;
- Quando da presença de harmônicos pares nas tensões e correntes todos os medidores (à exceção do C.1), as potências reativas foram também afetadas;
- No que tange ao desequilíbrio e inter-harmônicas, estas grandezas não se mostraram impactantes sobre os resultados, quando se manifestam isoladamente;
- Por fim, quando da análise dos testes sob condições operacionais impostas por dispositivos chaveados e cargas puramente resistivas, houve expressivas influências sobre os cálculos das potências reativas de vários medidores.

No Capítulo 4 apresentou os testes de desempenho dos medidores comerciais,

Capítulo 5, parte central desta dissertação, apresentou a proposta de metodologia para cálculo do fator de potências nos sistemas elétricos comerciais. A busca pela melhor solução do problema do cálculo do fator de potência está centrada no fato de que as tensões e corrente nos pontos de acoplamento das indústrias e concessionárias estão sujeitas a distorções harmônicas e desequilíbrios, os quais, como visto, causam grande confusão nos equipamentos de medição e, por consequência, resultam em pagamentos/cobranças injustas de ambos os lados.

Como solução, apresentou-se uma metodologia que desconsidera as distorções harmônicas nas tensões e correntes, uma vez que a responsabilidade por essas componentes não pode ser atribuída, na prática, com precisão satisfatória. O mesmo raciocínio pode ser utilizado para justificar a desconsideração do desequilíbrio de tensão/corrente, fazendo uso apenas das componentes de sequência positiva.

Por fim, o Capítulo 6 apresentou a implementação da metodologia para cálculo do fator de potência em um protótipo de medidor comercial, após sua apresentação e características técnicas tal equipamento foi posto em teste, diversas cargas foram medidas e os resultados foram apresentados.

Foi possível constatar, em medições reais, que as distorções harmônicas e os desequilíbrios são fenômenos de grande importância para o cálculo das potências e fator de potência. Foi possível também observar que cada metodologia de cálculo possui suas particularidades e dão respostas distintas.

Como apresentado, a aplicação da metodologia proposta resultou em resultados com sentido físico mais consistentes das metodologias tradicionais.

Referências Bibliográficas

- [1] C. P. Steinmetz, "Complex Quantities and Their Use in Electrical Engineering," 1894.
- [2] C. P. Steinmetz, Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena. McGraw-Hill, 1897.
- [3] Budeanu C. I., "Puissances R'actives et Fictives," 1927.
- [4] A.E. Emanuel, Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow. John Wiley & Sons, Ltd., 2010. <https://doi.org/10.1002/9780470667149>
- [5] Fryze S., "Effective, Wattless and Apparent Power in Circuits with Nonsinusoidal Waveforms of Current and Voltage," Elektrotechnische Zeitschrift, vol. 25, no. June 23, pp. 596–99, 1932.
- [6] Czarnecki L. S., "Considerations on the Reactive Power in Nonsinusoidal Situations," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 34, no. 3, pp. 399–404, 1984.
- [7] Czarnecki L.S., "What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion powers and why it should be abandoned," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 36, pp. 834–837, 1987. <https://doi.org/10.1109/TIM.1987.6312797>
- [8] E. H. Watanabe, H. Akagi, and M. Aredes, "Instantaneous p-q Power Theory for Compensating Nonsinusoidal Systems," Przegląd Elektrotechniczny, no. 6, pp. 28–37, 2008. <https://doi.org/10.1109/ISNCC.2008.4627480>
- [9] Y. K. and A. N. H. Akagi, "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits," in IPEC – International Power Electronics Conference, 1983, pp. 1375–1386.

- [10] A. N. H. Akagi, Y. Kanazawa, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 20, no. 3, pp. 625–630, 1984. <https://doi.org/10.1109/TIA.1984.4504460>
- [11] M. Depenbrock, "The FBD-Method, A Generally Applicable Tool for Analyzing Power Relations," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 381–387, 1993. <https://doi.org/10.1109/59.260849>
- [12] F. P. Marafão, "Análise e Controle da Energia Elétrica através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais," Unicamp, 2004.
- [13] M. Depenbrock, "Quantities of a MultiTerminal Circuit Determined on the Basis of Kirchhoff's Laws," *ETEP Eur. Trans. Electr. Power*, vol. 8, no. 4, pp. 249–257, 1998. <https://doi.org/10.1002/etep.4450080405>
- [14] IEEE Std 1459–2000, "IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions." .
- [15] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, "Norma Brasileira – ABNT NBR 14520:2011: 'Medidores eletrônicos de energia elétrica – Método de ensaio.'" 2011.
- [16] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, "Norma Brasileira – ABNT NBR 14519:2011: 'Medidores eletrônicos de energia elétrica - Especificação,'" 2011.
- [17] A. E. Emanuel, *Power definitions and the physical mechanism of power flow*. IEEE Press. Willey, 2010.
- [18] Nota Técnica nº 0083/2012-SRD/ANEEL, "Proposta de abertura de Audiência Pública para o recebimento de contribuições visando aprimorar a regulamentação acerca do fator de potência e cobrança do excedente de reativos.", 12 de junho de 2012.

Apêndice I – Caderno de Testes

MÓDULO I - Tensões e correntes puramente senoidais												TESTE I.1		
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	
2							2							
3							3							
4							4							
5							5							
6							6							
7							7							
8							8							
9							9							
10							10							
11							11							
12							12							
13							13							
0,85							0,85							
DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%						
FPd	1,00		1,00		1,00		FPd	0,00%						

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.

MÓDULO I - Tensões e correntes puramente senoidais												TESTE I.2		
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-45,57	1,00	-165,57	1,00	74,43	
2							2							
3							3							
4							4							
5							5							
6							6							
7							7							
8							8							
9							9							
10							10							
11							11							
12							12							
13							13							
0,85							0,85							
DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%						
FPd	0,70 (IND)		0,70 (IND)		0,70 (IND)		FPd	0,00%						

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.

MÓDULO I - Tensões e correntes puramente senoidais							TESTE I.3							
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	45,57	1,00	-74,43	1,00	165,57	
2							2							
3							3							
4							4							
5							5							
6							6							
7							7							
8							8							
9							9							
10							10							
11							11							
12							12							
13							13							
0,85							0,85							
DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%						
FPd	0,70 (CAP)		0,70 (CAP)		0,70 (CAP)									

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.

MÓDULO II - Tensões distorcidas e correntes puramente senoidais							TESTE II.1							
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-25,84	1,00	-145,84	1,00	94,16	
2							2							
3	0,028	0,00	0,028	0,00	0,028	0,00	3							
4							4							
5	0,040	0,00	0,040	120,00	0,040	-120,00	5							
6							6							
7	0,010	0,00	0,010	-120,00	0,010	120,00	7							
8							8							
9							9							
10							10							
11							11							
12							12							
13							13							
0,85							0,85							
DTT%	5,0%		5,0%		5,0%		DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%						
FPd	0,90 (IND)		0,90 (IND)		0,90 (IND)									

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.

MÓDULO II - Tensões distorcidas e correntes puramente senoidais							TESTE II.2							
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-25,84	1,00	-145,84	1,00	94,16	
2							2							
3	0,050	0,00	0,050	0,00	0,050	0,00	3							
4							4							
5	0,080	0,00	0,080	120,00	0,080	-120,00	5							
6							6							
7	0,032	0,00	0,032	-120,00	0,032	120,00	7							
8							8							
9							9							
10							10							
11							11							
12							12							
13							13							
0,85							0,85							
DTT%	10,0%		10,0%		10,0%		DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%						
FPd	0,90 (IND)		0,90 (IND)		0,90 (IND)									

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.

MÓDULO II - Tensões distorcidas e correntes puramente senoidais							TESTE II.3							
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	25,84	1,00	-94,16	1,00	145,84	
2							2							
3	0,080	0,00	0,080	0,00	0,080	0,00	3							
4							4							
5	0,120	0,00	0,120	120,00	0,120	-120,00	5							
6							6							
7	0,040	0,00	0,040	-120,00	0,040	120,00	7							
8							8							
9							9							
10							10							
11							11							
12							12							
13							13							
0,85							0,85							
DTT%	15,0%		15,0%		15,0%		DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%						
FPd	0,90 (CAP)		0,90 (CAP)		0,90 (CAP)									

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.

MÓDULO III - Tensões puramente senoidais e correntes distorcidas							TESTE III.1								
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		Tensão (pu)	Corrente (pu)
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-25,84	1,00	-145,84	1,00	94,16		
2							2								
3							3	0,050	0,00	0,050	0,00	0,050	0,00		
4							4								
5							5	0,080	0,00	0,080	120,00	0,080	-120,00		
6							6								
7							7	0,030	0,00	0,030	-120,00	0,030	120,00		
8							8								
9							9								
10							10								
11							11	0,010	0,00	0,010	120,00	0,010	-120,00		
12							12								
13							13	0,005	0,00	0,005	-120,00	0,005	120,00		
0,85							0,85								
DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		DTT%	10,0%		10,0%		10,0%			
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%							
FPd	0,90 (IND)		0,90 (IND)		0,90 (IND)										

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.

MÓDULO III - Tensões puramente senoidais e correntes distorcidas							TESTE III.2								
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		Tensão (pu)	Corrente (pu)
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-25,84	1,00	-145,84	1,00	94,16		
2							2								
3							3	0,150	0,00	0,150	0,00	0,150	0,00		
4							4								
5							5	0,240	0,00	0,240	120,00	0,240	-120,00		
6							6								
7							7	0,090	0,00	0,090	-120,00	0,090	120,00		
8							8								
9							9								
10							10								
11							11	0,030	0,00	0,030	120,00	0,030	-120,00		
12							12								
13							13	0,025	0,00	0,025	-120,00	0,025	120,00		
0,85							0,85								
DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		DTT%	30,0%		30,0%		30,0%			
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%							
FPd	0,90 (IND)		0,90 (IND)		0,90 (IND)										

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.

MÓDULO III - Tensões puramente senoidais e correntes distorcidas							TESTE III.3								
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		Tensão (pu)	Corrente (pu)
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	25,84	1,00	-94,16	1,00	145,84		
2							2								
3							3	0,250	0,00	0,250	0,00	0,250	0,00		
4							4								
5							5	0,400	0,00	0,400	120,00	0,400	-120,00		
6							6								
7							7	0,150	0,00	0,150	-120,00	0,150	120,00		
8							8								
9							9								
10							10								
11							11	0,070	0,00	0,070	120,00	0,070	-120,00		
12							12								
13							13	0,020	0,00	0,020	-120,00	0,020	120,00		
0,85							0,85								
DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		DTT%	50,0%		50,0%		50,0%			
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%							
FPd	0,90 (CAP)		0,90 (CAP)		0,90 (CAP)										

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.

MÓDULO IV - Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas ímpares não múltiplas de 3)							TESTE IV.1								
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		Tensão (pu)	Corrente (pu)
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-36,87	1,00	-156,87	1,00	83,13		
2							2								
3							3								
4							4								
5	0,035	0,00	0,035	120,00	0,035	-120,00	5	0,090	0,00	0,090	120,00	0,090	-120,00		
6							6								
7	0,025	0,00	0,025	-120,00	0,025	120,00	7	0,040	0,00	0,040	-120,00	0,040	120,00		
8							8								
9							9								
10							10								
11	0,020	0,00	0,020	120,00	0,020	-120,00	11	0,015	0,00	0,015	120,00	0,015	-120,00		
12							12								
13	0,015	0,00	0,015	-120,00	0,015	120,00	13	0,005	0,00	0,005	-120,00	0,005	120,00		
0,85							0,85								
DTT%	5,0%		5,0%		5,0%		DTT%	10,0%		10,0%		10,0%			
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%							
FPd	0,80 (IND)		0,80 (IND)		0,80 (IND)										

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.

MÓDULO IV - Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas ímpares não múltiplas de 3)							TESTE IV.2								
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		Tensão (pu)	Corrente (pu)
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-36,87	1,00	-156,87	1,00	83,13		
2							2								
3							3								
4							4								
5	0,055	0,00	0,055	120,00	0,055	-120,00	5	0,270	0,00	0,270	120,00	0,270	-120,00		
6							6								
7	0,040	0,00	0,040	-120,00	0,040	120,00	7	0,120	0,00	0,120	-120,00	0,120	120,00		
8							8								
9							9								
10							10								
11	0,015	0,00	0,015	120,00	0,015	-120,00	11	0,045	0,00	0,045	120,00	0,045	-120,00		
12							12								
13	0,005	0,00	0,005	-120,00	0,005	120,00	13	0,020	0,00	0,020	-120,00	0,020	120,00		
0,85							0,85								
DTT%	7,0%		7,0%		7,0%		DTT%	30,0%		30,0%		30,0%			
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%							
FPd	0,80 (IND)		0,80 (IND)		0,80 (IND)										

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.

MÓDULO IV - Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas ímpares não múltiplas de 3)							TESTE IV.3								
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		Tensão (pu)	Corrente (pu)
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-36,87	1,00	-156,87	1,00	83,13		
2							2								
3							3								
4							4								
5	0,070	0,00	0,070	120,00	0,070	-120,00	5	0,420	0,00	0,420	120,00	0,420	-120,00		
6							6								
7	0,052	0,00	0,052	-120,00	0,052	120,00	7	0,255	0,00	0,255	-120,00	0,255	120,00		
8							8								
9							9								
10							10								
11	0,020	0,00	0,020	120,00	0,020	-120,00	11	0,085	0,00	0,085	120,00	0,085	-120,00		
12							12								
13	0,010	0,00	0,010	-120,00	0,010	120,00	13	0,040	0,00	0,040	-120,00	0,040	120,00		
0,85							0,85								
DTT%	9,0%		9,0%		9,0%		DTT%	50,0%		50,0%		50,0%			
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%							
FPd	0,80 (IND)		0,80 (IND)		0,80 (IND)										

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.

MÓDULO V - Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas pares não múltiplas de 3)							TESTE V.1								
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		Tensão (pu)	Corrente (pu)
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-36,87	1,00	-156,87	1,00	83,13		
2	0,035	0,00	0,035	120,00	0,035	-120,00	2	0,090	0,00	0,090	120,00	0,090	-120,00		
3							3								
4	0,025	0,00	0,025	-120,00	0,025	120,00	4	0,040	0,00	0,040	-120,00	0,040	120,00		
5							5								
6							6								
7							7								
8	0,020	0,00	0,020	120,00	0,020	-120,00	8	0,015	0,00	0,015	120,00	0,015	-120,00		
9							9								
10	0,015	0,00	0,015	-120,00	0,015	120,00	10	0,005	0,00	0,005	-120,00	0,005	120,00		
11							11								
12							12								
13							13								
0,85							0,85								
DTT%	5,0%		5,0%		5,0%		DTT%	10,0%		10,0%		10,0%			
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%							
FPd	0,80 (IND)		0,80 (IND)		0,80 (IND)										

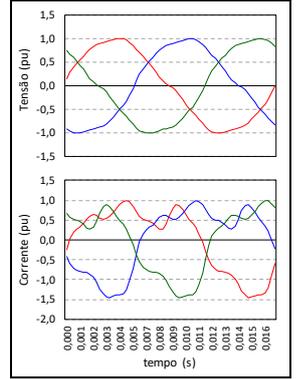
OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.

MÓDULO IV - Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas ímpares não múltiplas de 3)							TESTE V.2								
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		Tensão (pu)	Corrente (pu)
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-36,87	1,00	-156,87	1,00	83,13		
2	0,055	0,00	0,055	120,00	0,055	-120,00	2	0,270	0,00	0,270	120,00	0,270	-120,00		
3							3								
4	0,040	0,00	0,040	-120,00	0,040	120,00	4	0,120	0,00	0,120	-120,00	0,120	120,00		
5							5								
6							6								
7							7								
8	0,015	0,00	0,015	120,00	0,015	-120,00	8	0,045	0,00	0,045	120,00	0,045	-120,00		
9							9								
10	0,005	0,00	0,005	-120,00	0,005	120,00	10	0,020	0,00	0,020	-120,00	0,020	120,00		
11							11								
12							12								
13							13								
0,85							0,85								
DTT%	7,0%		7,0%		7,0%		DTT%	30,0%		30,0%		30,0%			
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%							
FPd	0,80 (IND)		0,80 (IND)		0,80 (IND)										

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.

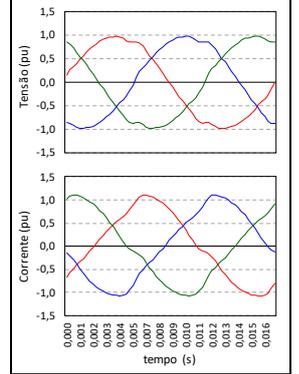
MÓDULO IV - Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas ímpares não múltiplas de 3)							TESTE V.3						
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C	
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-36,87	1,00	-156,87	1,00	83,13
2	0,070	0,00	0,070	120,00	0,070	-120,00	2	0,420	0,00	0,420	120,00	0,420	-120,00
3							3						
4	0,052	0,00	0,052	-120,00	0,052	120,00	4	0,255	0,00	0,255	-120,00	0,255	120,00
5							5						
6							6						
7							7						
8	0,020	0,00	0,020	120,00	0,020	-120,00	8	0,085	0,00	0,085	120,00	0,085	-120,00
9							9						
10	0,010	0,00	0,010	-120,00	0,010	120,00	10	0,040	0,00	0,040	-120,00	0,040	120,00
11							11						
12							12						
13							13						
0,85							0,85						
DTT%	9,0%		9,0%		9,0%		DTT%	50,0%		50,0%		50,0%	
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%					
FPd	0,80 (IND)		0,80 (IND)		0,80 (IND)								

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.



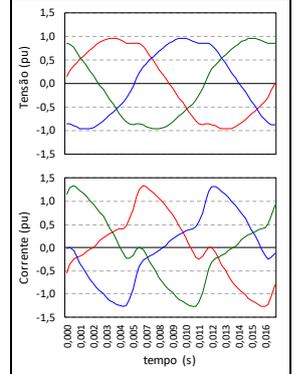
MÓDULO VI - Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas múltiplas de 3)							TESTE VI.1						
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C	
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-53,13	1,00	-173,13	1,00	66,87
2							2						
3	0,035	0,00	0,035	0,00	0,035	0,00	3	0,090	0,00	0,090	0,00	0,090	0,00
4							4						
5							5						
6	0,025	0,00	0,025	0,00	0,025	0,00	6	0,040	0,00	0,040	0,00	0,040	0,00
7							7						
8							8						
9	0,020	0,00	0,020	0,00	0,020	0,00	9	0,015	0,00	0,015	0,00	0,015	0,00
10							10						
11							11						
12	0,015	0,00	0,015	0,00	0,015	0,00	12	0,005	0,00	0,005	0,00	0,005	0,00
13							13						
0,85							0,85						
DTT%	5,0%		5,0%		5,0%		DTT%	10,0%		10,0%		10,0%	
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%					
FPd	0,60 (IND)		0,60 (IND)		0,60 (IND)								

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.



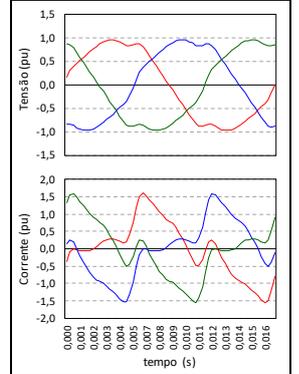
MÓDULO VI - Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas múltiplas de 3)							TESTE VI.2						
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C	
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-53,13	1,00	-173,13	1,00	66,87
2							2						
3	0,055	0,00	0,055	0,00	0,055	0,00	3	0,270	0,00	0,270	0,00	0,270	0,00
4							4						
5							5						
6	0,040	0,00	0,040	0,00	0,040	0,00	6	0,120	0,00	0,120	0,00	0,120	0,00
7							7						
8							8						
9	0,015	0,00	0,015	0,00	0,015	0,00	9	0,045	0,00	0,045	0,00	0,045	0,00
10							10						
11							11						
12	0,005	0,00	0,005	0,00	0,005	0,00	12	0,020	0,00	0,020	0,00	0,020	0,00
13							13						
0,85							0,85						
DTT%	7,0%		7,0%		7,0%		DTT%	30,0%		30,0%		30,0%	
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%					
FPd	0,60 (IND)		0,60 (IND)		0,60 (IND)								

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.



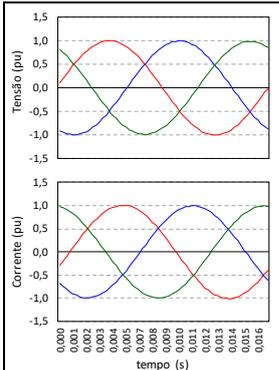
MÓDULO VI - Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas múltiplas de 3)							TESTE VI.3						
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C	
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-53,13	1,00	-173,13	1,00	66,87
2							2						
3	0,070	0,00	0,070	0,00	0,070	0,00	3	0,420	0,00	0,420	0,00	0,420	0,00
4							4						
5							5						
6	0,052	0,00	0,052	0,00	0,052	0,00	6	0,255	0,00	0,255	0,00	0,255	0,00
7							7						
8							8						
9	0,020	0,00	0,020	0,00	0,020	0,00	9	0,085	0,00	0,085	0,00	0,085	0,00
10							10						
11							11						
12	0,010	0,00	0,010	0,00	0,010	0,00	12	0,040	0,00	0,040	0,00	0,040	0,00
13							13						
0,85							0,85						
DTT%	9,0%		9,0%		9,0%		DTT%	50,0%		50,0%		50,0%	
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%					
FPd	0,60 (IND)		0,60 (IND)		0,60 (IND)								

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.



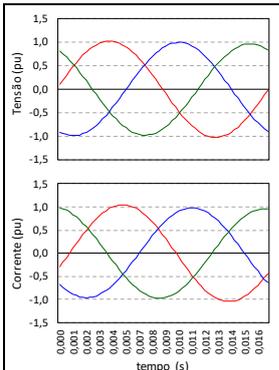
MÓDULO VII - Tensões e correntes distorcidas (inter-harmônicas)							TESTE VII.1						
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C	
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-23,07	1,00	-143,07	1,00	96,93
2							2						
3							3						
4							4						
5							5						
6							6						
7							7						
8							8						
9							9						
10							10						
11							11						
12							12						
13							13						
0,85	0,010	0,00	0,010	0,00	0,010	0,00	0,85	0,010	0,00	0,010	0,00	0,010	0,00
DTT%	1,0%		1,0%		1,0%		DTT%	1,0%		1,0%		1,0%	
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%					
FPd	0,92 (IND)		0,92 (IND)		0,92 (IND)		FPd	0,92 (IND)		0,92 (IND)		0,92 (IND)	

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.



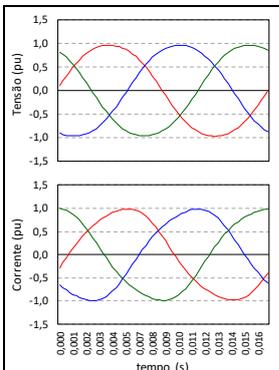
MÓDULO VII - Tensões e correntes distorcidas (inter-harmônicas)							TESTE VII.2						
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C	
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-23,07	1,00	-143,07	1,00	96,93
2							2						
3							3						
4							4						
5							5						
6							6						
7							7						
8							8						
9							9						
10							10						
11							11						
12							12						
13							13						
0,85	0,030	0,00	0,030	0,00	0,030	0,00	0,85	0,050	0,00	0,050	0,00	0,050	0,00
DTT%	3,0%		3,0%		3,0%		DTT%	5,0%		5,0%		5,0%	
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%					
FPd	0,92 (IND)		0,92 (IND)		0,92 (IND)		FPd	0,92 (IND)		0,92 (IND)		0,92 (IND)	

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.



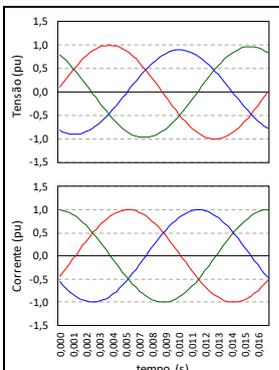
MÓDULO VII - Tensões e correntes distorcidas (inter-harmônicas)							TESTE VII.3						
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C	
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-23,07	1,00	-143,07	1,00	96,93
2							2						
3							3						
4							4						
5							5						
6							6						
7							7						
8							8						
9							9						
10							10						
11							11						
12							12						
13							13						
2,97	0,030	0,00	0,030	0,00	0,030	0,00	2,97	0,050	0,00	0,050	0,00	0,050	0,00
DTT%	3,0%		3,0%		3,0%		DTT%	5,0%		5,0%		5,0%	
FDV%	0,00%						FDV%	0,00%					
FPd	0,92 (IND)		0,92 (IND)		0,92 (IND)		FPd	0,92 (IND)		0,92 (IND)		0,92 (IND)	

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.



MÓDULO VIII - Tensões e correntes puramente senoidais com desequilíbrio de tensão e corrente							TESTE VIII.1						
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C	
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)
1	1,00	0,00	0,90	-120,00	0,97	120,00	1	1,00	-31,79	1,00	-151,79	1,00	88,21
2							2						
3							3						
4							4						
5							5						
6							6						
7							7						
8							8						
9							9						
10							10						
11							11						
12							12						
13							13						
0,85							0,85						
DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		DTT%	0,0%		0,0%		0,0%	
FDV%	3,10%						FDV%	0,00%					
FPd	0,85 (IND)		0,85 (IND)		0,85 (IND)		FPd	0,85 (IND)		0,85 (IND)		0,85 (IND)	

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.



MÓDULO VIII - Tensões e correntes puramente senoidais com desequilíbrio de tensão e corrente													TESTE VIII.2	
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-31,79	0,80	-151,79	0,45	88,21	
2							2							
3							3							
4							4							
5							5							
6							6							
7							7							
8							8							
9							9							
10							10							
11							11							
12							12							
13							13							
0,85							0,85							
DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		
FDV%	0,00%						FDV%	21,43%						
FPd	0,85 (IND)		0,85 (IND)		0,85 (IND)		OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.							

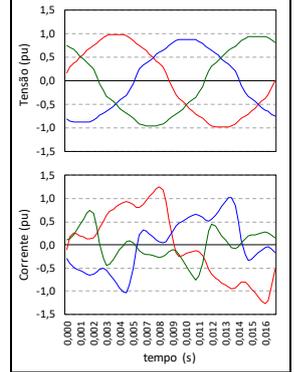
MÓDULO VIII - Tensões e correntes puramente senoidais com desequilíbrio de tensão e corrente													TESTE VIII.3	
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	
1	1,00	0,00	0,90	-120,00	0,97	120,00	1	1,00	-31,79	0,70	-151,79	0,30	88,21	
2							2							
3							3							
4							4							
5							5							
6							6							
7							7							
8							8							
9							9							
10							10							
11							11							
12							12							
13							13							
0,85							0,85							
DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		
FDV%	3,10%						FDV%	30,41%						
FPd	0,85 (IND)		0,85 (IND)		0,85 (IND)		OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.							

MÓDULO IX - Tensões e correntes distorcidas com desequilíbrio de tensão e corrente													TESTE IX.1	
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	
1	1,00	0,00	0,90	-120,00	0,97	120,00	1	1,00	-45,57	1,00	-165,57	1,00	74,43	
2							2							
3	0,030	0,00	0,030	0,00	0,030	0,00	3	0,180	0,00	0,180	0,00	0,180	0,00	
4							4							
5	0,040	0,00	0,040	120,00	0,040	-120,00	5	0,270	0,00	0,270	120,00	0,270	-120,00	
6							6							
7	0,025	0,00	0,025	-120,00	0,025	120,00	7	0,120	0,00	0,120	-120,00	0,120	120,00	
8							8							
9	0,010	0,00	0,010	0,00	0,010	0,00	9	0,030	0,00	0,030	0,00	0,030	0,00	
10							10							
11	0,020	0,00	0,020	120,00	0,020	-120,00	11	0,045	0,00	0,045	120,00	0,045	-120,00	
12							12							
13	0,005	0,00	0,005	-120,00	0,005	120,00	13	0,015	0,00	0,015	-120,00	0,015	120,00	
0,85							0,85							
DTT%	6,0%		6,0%		6,0%		DTT%	35,0%		35,0%		35,0%		
FDV%	3,10%						FDV%	0,00%						
FPd	0,70 (IND)		0,70 (IND)		0,70 (IND)		OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.							

MÓDULO IX - Tensões e correntes distorcidas com desequilíbrio de tensão e corrente													TESTE IX.2	
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C		
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Ângulo	Mag. (pu)	Âng. (o)	
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1	1,00	-31,79	0,80	-151,79	0,45	88,21	
2							2							
3	0,030	0,00	0,030	0,00	0,030	0,00	3	0,180	0,00	0,180	0,00	0,180	0,00	
4							4							
5	0,040	0,00	0,040	120,00	0,040	-120,00	5	0,270	0,00	0,270	120,00	0,270	-120,00	
6							6							
7	0,025	0,00	0,025	-120,00	0,025	120,00	7	0,120	0,00	0,120	-120,00	0,120	120,00	
8							8							
9	0,010	0,00	0,010	0,00	0,010	0,00	9	0,030	0,00	0,030	0,00	0,030	0,00	
10							10							
11	0,020	0,00	0,020	120,00	0,020	-120,00	11	0,045	0,00	0,045	120,00	0,045	-120,00	
12							12							
13	0,005	0,00	0,005	-120,00	0,005	120,00	13	0,015	0,00	0,015	-120,00	0,015	120,00	
0,85							0,85							
DTT%	6,0%		6,0%		6,0%		DTT%	35,0%		35,0%		35,0%		
FDV%	0,00%						FDV%	21,43%						
FPd	0,85 (IND)		0,85 (IND)		0,85 (IND)		OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.							

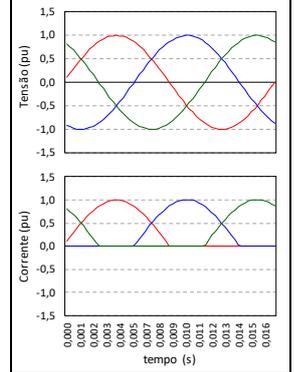
MÓDULO IX - Tensões e correntes distorcidas com desequilíbrio de tensão e corrente							TESTE IX.3						
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C	
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)
1	1,00	0,00	0,90	-120,00	0,97	120,00	1	1,00	-31,79	0,70	-151,79	0,30	88,21
2							2						
3	0,030	0,00	0,030	0,00	0,030	0,00	3	0,180	0,00	0,180	0,00	0,180	0,00
4							4						
5	0,040	0,00	0,040	120,00	0,040	-120,00	5	0,270	0,00	0,270	120,00	0,270	-120,00
6							6						
7	0,025	0,00	0,025	-120,00	0,025	120,00	7	0,120	0,00	0,120	-120,00	0,120	120,00
8							8						
9	0,010	0,00	0,010	0,00	0,010	0,00	9	0,030	0,00	0,030	0,00	0,030	0,00
10							10						
11	0,020	0,00	0,020	120,00	0,020	-120,00	11	0,045	0,00	0,045	120,00	0,045	-120,00
12							12						
13	0,005	0,00	0,005	-120,00	0,005	120,00	13	0,015	0,00	0,015	-120,00	0,015	120,00
0,85							0,85						
DTT%	6,0%		6,0%		6,0%		DTT%	35,0%		35,0%		35,0%	
FDV%			3,10%				FDV%			30,41%			
FPd	0,85 (IND)		0,85 (IND)		0,85 (IND)								

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.



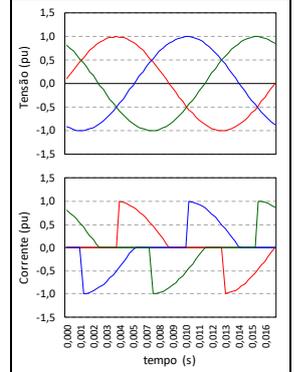
MÓDULO X - Tensão puramente senoidal e correntes de chaveamento (retificador de meia-onda)							TESTE X.1						
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C	
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1						
2							2						
3							3						
4							4						
5							5						
6							6						
7							7						
8							8						
9							9						
10							10						
11							11						
12							12						
13							13						
0,85							0,85						
DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		DTT%	61,1%		61,1%		61,1%	
FDV%			0,00%				FDV%			0,00%			
FPd	1,00		1,00		1,00								

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.



MÓDULO X - Tensão puramente senoidal e correntes de chaveamento (dimmer)							TESTE X.2						
V	Fase A		Fase B		Fase C		I	Fase A		Fase B		Fase C	
	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)		Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)	Mag. (pu)	Âng. (o)
1	1,00	0,00	1,00	-120,00	1,00	120,00	1						
2							2						
3							3						
4							4						
5							5						
6							6						
7							7						
8							8						
9							9						
10							10						
11							11						
12							12						
13							13						
0,85							0,85						
DTT%	0,0%		0,0%		0,0%		DTT%	55,0%		55,0%		55,0%	
FDV%			0,00%				FDV%			0,00%			
FPd	0,84 (IND)		0,84 (IND)		0,84 (IND)								

OBS: Grandezas expressas em [pu], na base dos valores nominais de tensão e corrente.



 	Fabricante			
	Modelo			
	Tensão Nom. (V)	Corrente Nom/Max (A)		/
	Tipo	<input type="radio"/> Med. Direta	<input type="radio"/> Med. Indireta	k_h (varh/pulso)

MÓDULO I - Tensões e correntes puramente senoidais

I.1	kW	kvar	fp (pu)	I.2	kW	kvar	fp (pu)	I.3	kW	kvar	fp (pu)
Fase A				Fase A				Fase A			
Fase B				Fase B				Fase B			
Fase C				Fase C				Fase C			

MÓDULO II - Tensões distorcidas e correntes puramente senoidais

II.1	kW	kvar	fp (pu)	II.2	kW	kvar	fp (pu)	II.3	kW	kvar	fp (pu)
Fase A				Fase A				Fase A			
Fase B				Fase B				Fase B			
Fase C				Fase C				Fase C			

MÓDULO III - Tensões puramente senoidais e correntes distorcidas

III.1	kW	kvar	fp (pu)	III.2	kW	kvar	fp (pu)	III.3	kW	kvar	fp (pu)
Fase A				Fase A				Fase A			
Fase B				Fase B				Fase B			
Fase C				Fase C				Fase C			

MÓDULO IV - Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas ímpares não múltiplas de 3)

IV.1	kW	kvar	fp (pu)	IV.2	kW	kvar	fp (pu)	IV.3	kW	kvar	fp (pu)
Fase A				Fase A				Fase A			
Fase B				Fase B				Fase B			
Fase C				Fase C				Fase C			

MÓDULO V - Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas pares não múltiplas de 3)

V.1	kW	kvar	fp (pu)	V.2	kW	kvar	fp (pu)	V.3	kW	kvar	fp (pu)
Fase A				Fase A				Fase A			
Fase B				Fase B				Fase B			
Fase C				Fase C				Fase C			

MÓDULO VI - Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas múltiplas de 3)

VI.1	kW	kvar	fp (pu)	VI.2	kW	kvar	fp (pu)	VI.3	kW	kvar	fp (pu)
Fase A				Fase A				Fase A			
Fase B				Fase B				Fase B			
Fase C				Fase C				Fase C			

MÓDULO VII - Tensões e correntes distorcidas (inter-harmônicas)

VII.1	kW	kvar	fp (pu)	VII.2	kW	kvar	fp (pu)	VII.3	kW	kvar	fp (pu)
Fase A				Fase A				Fase A			
Fase B				Fase B				Fase B			
Fase C				Fase C				Fase C			

MÓDULO VIII - Tensões e correntes puramente senoidais com desequilíbrio de tensão e corrente

VIII.1	kW	kvar	fp (pu)	VIII.2	kW	kvar	fp (pu)	VIII.3	kW	kvar	fp (pu)
Fase A				Fase A				Fase A			
Fase B				Fase B				Fase B			
Fase C				Fase C				Fase C			

MÓDULO IX - Tensões e correntes distorcidas com desequilíbrio de tensão e corrente

IX.1	kW	kvar	fp (pu)	IX.2	kW	kvar	fp (pu)	IX.3	kW	kvar	fp (pu)
Fase A				Fase A				Fase A			
Fase B				Fase B				Fase B			
Fase C				Fase C				Fase C			

MÓDULO X - Tensão puramente senoidal e correntes de chaveamento (retificador de meia-onda e dimmer)

X.1	kW	kvar	fp (pu)	X.2	kW	kvar	fp (pu)
Fase A				Fase A			
Fase B				Fase B			
Fase C				Fase C			

Apêndice II – Ensaio em laboratório dos medidores

Módulo I - Tensões e correntes puramente senoidais

Esta etapa está associada aos testes considerando-se tensões e correntes perfeitamente senoidais e equilibradas, em 60 Hz, variando-se apenas a defasagem entre a tensão e corrente fundamental. Os resultados assim obtidos encontram-se destacados na Tabela 3.

Tabela 1 - Desvios dos medidores no Módulo I.

Medidor	Desvio (%)								
	Ensaio I.1			Ensaio I.2			Ensaio I.3		
	W	var	FP	W	var	FP	W	var	FP
A.1	0,14	-	0	0,06	0,16	0,05	0,23	0,10	0,07
A.2	0,12	-	0	0,23	0,11	0,02	0,24	0,22	0,02
A.3	0,10	-	0	0,26	0,04	0,15	0,21	0,13	0,17
B.1	0,20	-	0	0,31	0,01	0,15	0,39	0,07	0,23
B.2	0,09	-	0	0,57	0,60	0,60	0,63	0,14	0,25
B.3	0,18	-	0	0,25	0,01	0,14	0,33	0,10	0,22
C.1	0,10	-	0	0,18	0,02	0,08	0,05	0,13	0,04
C.2	0,19	-	0	0,23	0,04	0,10	0,31	0,08	0,20
C.3	0,12	-	0	0,15	0,03	0,09	0,24	0,13	0,19
C.4	0,18	-	0	0,17	0,13	0,02	0,37	0,09	0,24
C.5	0,13	-	0	0,14	0,00	0,07	0,26	0,13	0,20
C.6	0,01	-	0	0,04	0,12	0,04	0,12	0,23	0,18
C.7	0,20	-	0	0,39	0,20	0,30	0,13	0,04	0,08
D.1	0,19	-	0	0,09	0,62	0,36	0,45	0,58	0,07
D.2	0,12	-	0	0,03	2,28	1,17	0,08	0,63	0,28
E.1	0,16	-	0	0,28	0,04	0,12	0,23	0,09	0,07
E.2	0,03	-	0	0,30	0,38	0,35	0,13	0,02	0,05
E.3	0,13	-	0	0,07	0,02	0,04	0,06	0,04	0,04

Como pode ser constatado, neste módulo, todos os medidores apresentaram desvios bastante pequenos para as potências ativas. No que tange à potência reativa, apenas o ensaio I.2 registrou um valor para a potência reativa discrepante dos demais, todavia, em proporções aceitáveis segundo a ABNT NBR 14520:2011.

Módulo II - Tensões distorcidas e correntes puramente senoidais

Nesse módulo são consideradas tensões e correntes equilibradas, com tensões distorcidas produzidas pela ação de 4 componentes harmônicas simultaneamente aplicadas, em níveis crescentes,

mantendo-se, todavia, as correntes puramente senoidais em 60 Hz. Os resultados assim obtidos encontram-se fornecidos na Tabela 4.

Tabela 2 - Desvios dos medidores no Módulo II.

Medidor	Desvio (%)								
	Ensaio II.1			Ensaio II.2			Ensaio II.3		
	W	var	FP	W	var	FP	W	var	FP
A.1	0,11	0,21	0,02	0,11	0,22	0,02	0,19	0,06	0,02
A.2	0,14	0,06	0,02	0,14	0,07	0,02	0,15	0,26	0,02
A.3	0,12	0,00	0,02	0,13	0,01	0,02	0,12	0,01	0,02
B.1	0,22	0,05	0,03	0,22	0,04	0,03	0,25	0,13	0,07
B.2	0,02	1,11	0,21	0,14	1,25	0,26	0,38	1,36	0,33
B.3	0,21	0,02	0,04	0,21	0,03	0,03	0,25	0,14	0,07
C.1	0,13	0,02	0,03	0,13	0,03	0,03	0,09	0,19	0,02
C.2	0,18	0,51	0,13	0,19	2,35	0,49	0,23	5,59	1,12
C.3	0,13	0,61	0,14	0,13	2,44	0,49	0,17	5,62	1,12
C.4	0,17	0,40	0,11	0,17	2,21	0,46	0,26	5,64	1,14
C.5	0,10	0,57	0,13	0,11	2,40	0,48	0,17	5,65	1,12
C.6	0,04	0,03	0,00	0,04	0,07	0,02	0,01	0,23	0,05
C.7	0,23	0,46	0,13	0,23	0,33	0,11	0,10	0,15	0,01
D.1	0,08	0,87	0,15	0,16	0,81	0,12	0,41	0,54	0,02
D.2	0,08	3,13	0,58	0,07	17,43	4,55	0,10	0,59	0,09
E.1	0,20	0,07	0,03	0,20	0,05	0,05	0,14	0,07	0,01
E.2	0,11	0,59	0,13	0,11	0,56	0,13	0,09	0,16	0,05
E.3	0,06	0,01	0,03	0,06	0,01	0,03	0,06	0,04	0,02

Os resultados obtidos evidenciam que em relação a potência ativa, os desvios apresentados por todos os medidores se mantiveram próximos aos ensaios do módulo I, demonstrando que os medidores, via de regra, não são influenciados quando há distorções harmônicas apenas nas tensões.

No que tange a potência reativa, os medidores C.2, C.3, C.4 e C.5 apresentaram desvios crescentes conforme o aumento das distorções harmônicas nas tensões, indicando que as grandezas ora referidas se apresentam significativamente influenciadas. Como consequência direta deste fato, verifica-se, como seria esperado, impactos sobre os valores calculados para seus respectivos fatores de potência.

Um ponto meritório de destaque refere-se ao medidor D.2. Este apresentou desvios significativos em sua potência reativa, superiores, inclusive, aos resultados obtidos no teste II.3. Este, como visto, se apresenta com uma distorção harmônica de tensão com o maior valor empregado para os testes. Por outro lado, esta condição operacional resultou no menor erro para o medidor aqui referido. Esta situação, em especial, embora tenha sido claramente constada, não se apresenta com uma justificativa tangível para os trabalhos feitos.

Módulo III - Tensões puramente senoidais e correntes distorcidas

Esta fase dos trabalhos, de forma adversa da anterior, empregou condições operacionais tais que as tensões são equilibradas e senoidais, enquanto que a corrente foi gradualmente distorcida, nos termos estabelecidos na proposta de testes – Relatório 6. Os resultados assim obtidos encontram-se indicados na Tabela 5.

Tabela 3 - Desvios dos medidores no Módulo III.

Medidor	Desvio (%)								
	Ensaio III.1			Ensaio III.2			Ensaio III.3		
	W	var	FP	W	var	FP	W	var	FP
A.1	0,11	0,06	0,01	0,11	0,08	0,01	0,13	0,16	0,01
A.2	0,13	0,08	0,10	0,14	0,08	0,16	0,24	0,39	0,18
A.3	0,11	0,14	0,01	0,13	0,13	0,00	0,22	0,22	0,08
B.1	0,20	0,17	0,01	0,23	0,16	0,01	0,35	0,25	0,11
B.2	0,16	2,27	0,46	0,17	0,30	0,09	0,16	2,90	0,52
B.3	0,21	0,17	0,01	0,22	0,16	0,01	0,32	0,24	0,11
C.1	0,17	0,36	0,10	0,21	0,65	0,16	0,15	0,82	0,18
C.2	0,13	2,03	0,41	0,09	19,76	3,91	0,40	50,35	10,30
C.3	0,07	2,15	0,42	0,04	19,86	3,91	0,34	50,43	10,30
C.4	0,13	1,95	0,40	0,10	19,71	3,90	0,45	50,34	10,32
C.5	0,07	2,09	0,41	0,02	19,84	3,91	0,38	50,43	10,31
C.6	0,08	0,20	0,05	0,01	0,48	0,09	0,17	1,11	0,18
C.7	0,19	0,29	0,09	0,28	0,00	0,05	0,09	0,55	0,09
D.1	0,24	0,50	0,05	0,21	0,49	0,05	0,32	0,69	0,07
D.2	0,11	0,33	0,04	0,08	0,43	0,07	0,05	0,53	0,09
E.1	0,17	0,22	0,01	0,17	0,37	0,04	0,19	0,11	0,02
E.2	0,11	0,48	0,11	0,14	0,52	0,13	0,03	0,08	0,02
E.3	0,06	0,14	0,10	0,06	0,13	0,16	0,01	0,16	0,18

Quanto às potências ativas, estas se mantiveram dentro dos patamares esperados, tal como para os demais módulos anteriores.

Por outro lado, no que se refere à potência reativa, os mesmos medidores C.2, C.3, C.4 e C.5, tal como para o módulo anterior, apresentaram desvios crescentes conforme o aumento das distorções harmônicas nas correntes, indicando uma forte influência destas sobre os resultados esperados.

Módulo IV - Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas ímpares não múltiplas de 3)

Neste módulo de testes as tensões e correntes, embora equilibradas, se apresentam com diferentes níveis de distorções, abrangendo ordens harmônicas ímpares não múltiplas de 3. Os resultados assim obtidos encontram-se indicados na Tabela 6.

Tabela 4 - Desvios dos medidores no Módulo IV.

Medidor	Desvio (%)								
	Ensaio IV.1			Ensaio IV.2			Ensaio IV.3		
	W	var	FP	W	var	FP	W	var	FP
A.1	0,64	0,06	0,21	2,48	0,10	0,84	5,28	0,10	1,78
A.2	0,40	0,01	0,25	2,21	0,02	1,04	4,90	0,02	2,04
A.3	0,40	0,06	0,17	2,24	0,06	0,81	5,02	0,04	1,74
B.1	0,39	0,10	0,17	2,34	0,10	0,86	5,34	0,10	1,86
B.2	0,46	0,99	0,19	2,38	1,51	0,31	5,61	0,60	1,71
B.3	0,39	0,11	0,18	2,33	0,11	0,86	5,34	0,11	1,87
C.1	0,67	0,04	0,25	2,61	0,36	1,04	5,47	0,48	2,04
C.2	0,35	0,56	0,08	2,30	7,46	1,81	5,17	21,29	5,46
C.3	0,40	0,65	0,09	2,33	7,53	1,82	5,20	21,37	5,47
C.4	0,38	0,45	0,03	2,30	7,36	1,78	5,12	21,24	5,46
C.5	0,42	0,62	0,07	2,37	7,50	1,80	5,21	21,34	5,46
C.6	0,63	0,11	0,27	2,51	0,18	0,95	5,69	0,18	2,00
C.7	0,37	0,22	0,06	2,22	0,14	0,73	5,14	0,14	1,71
D.1	0,75	0,69	0,02	2,76	0,74	0,71	5,72	0,98	1,62
D.2	0,67	0,50	0,06	2,64	0,62	0,71	5,73	0,88	1,65
E.1	0,35	0,15	0,18	2,26	0,04	0,81	5,24	0,20	1,86
E.2	0,39	0,28	0,04	2,31	0,34	0,69	5,45	0,35	1,74
E.3	0,65	0,09	0,25	2,63	0,09	1,04	5,66	0,08	2,04

Diferentemente dos módulos anteriores, a presença de tensões e correntes distorcidas de forma simultânea resultam em expressivos desvios das potências ativas, cujas discrepâncias aumentam a medida que os níveis de distorções são incrementados.

Em relação à potência reativa, mais uma vez, apenas os medidores C.2, C.3, C.4 e C.5, tal como já relatado para os testes dos módulos II e III, apresentaram desvios crescentes conforme o aumento das distorções harmônicas nas tensões e correntes.

Módulo V - tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas pares não-múltiplas de 3)

Este grupo de testes de desempenho, tal como anteriormente, abrange a utilização de tensões e correntes equilibradas com diferentes níveis de distorções, envolvendo, entretanto, ordens harmônicas pares não múltiplos de 3. Os resultados obtidos para estes ensaios encontram-se destacados na Tabela 7.

Tabela 5 - Desvios dos medidores no Módulo V.

Medidor	Desvio (%)								
	Ensaio V.1			Ensaio V.2			Ensaio V.3		
	W	var	FP	W	var	FP	W	var	FP
A.1	2,52	3,14	1,99	2,62	1,52	1,45	5,57	2,46	2,74
A.2	2,16	3,11	0,94	2,36	1,56	1,08	5,21	2,46	2,10
A.3	2,21	3,13	1,88	2,36	1,67	1,42	5,30	2,56	2,69
B.1	2,11	5,47	1,18	2,35	0,09	0,86	5,33	0,09	1,86
B.2	2,32	2,75	1,79	2,48	0,57	1,07	5,44	1,92	2,52
B.3	2,15	5,46	1,16	2,34	0,12	0,87	5,35	0,12	1,87
C.1	2,63	0,04	0,94	2,75	0,34	1,08	5,76	0,41	2,10
C.2	2,27	51,69	16,43	2,46	7,82	1,88	5,44	22,49	5,76
C.3	2,30	51,78	16,45	2,49	7,90	1,90	5,49	22,58	5,76
C.4	2,26	51,55	16,40	2,42	7,73	1,86	5,39	22,44	5,76
C.5	2,30	51,77	16,44	2,49	7,89	1,89	5,49	22,56	5,76
C.6	2,37	5,59	1,13	2,56	0,11	0,94	5,79	0,11	2,01
C.7	2,17	5,83	1,29	2,32	0,22	0,74	5,34	0,29	1,73
D.1	2,50	4,37	0,66	2,71	0,57	0,75	5,69	0,60	1,74
D.2	2,52	4,17	0,58	2,65	0,41	0,79	5,61	0,46	1,76
E.1	2,01	3,23	9,80	2,32	1,75	1,43	5,32	2,63	2,72
E.2	2,16	2,63	1,69	2,39	1,25	1,28	5,34	2,17	2,57
E.3	2,40	3,41	0,94	2,60	1,65	1,08	5,67	2,55	2,10

No que tange a potência ativa, os valores calculados pelos medidores, demonstrado na Tabela 7, apresentaram desvios crescentes diante do aumento das distorções harmônicas nas tensões e correntes.

Quanto a potência reativa, apenas o medidor C.1 não apresentou alteração significativa nos valores calculados diante a distorções harmônicas nas tensões e correntes de ordem pares não múltiplas de 3. Todos os demais indicaram expressivas divergências em relação aos valores esperados e definidos pelos cálculos analíticos. Vale ainda observar que, em relação às avaliações feitas no Módulo IV, quando apenas componentes harmônicas ímpares foram contempladas, a presença das ordens pares se mostraram de maior impacto sobre os desempenhos dos medidores no que diz respeito à potência reativa.

Módulo VI - Tensões e correntes distorcidas (ordens harmônicas múltiplas de 3)

Ainda, considerando-se tensões e correntes equilibradas, o presente módulo de testes contempla apenas distorções harmônicas múltiplas de 3. Assim procedendo, em atenção às condições operativas definidas pelo caderno de testes, as distorções harmônicas foram aplicadas sobre os sinais

de tensão e corrente de forma crescente, caso a caso. Os resultados correspondentes a estas etapas encontram-se fornecidos na Tabela 8.

Tabela 6 - Desvios dos medidores no Módulo VI.

Medidor	Desvio (%)								
	Ensaio VI.1			Ensaio VI.2			Ensaio VI.3		
	W	var	FP	W	var	FP	W	var	FP
A.1	0,80	0,01	0,52	3,38	0,45	2,42	7,27	1,41	5,37
A.2	0,54	0,03	0,63	3,03	0,46	2,26	6,87	1,38	4,61
A.3	0,56	0,10	0,42	3,09	0,54	2,29	6,92	1,45	5,19
B.1	0,53	0,03	0,36	3,14	0,03	2,00	7,12	0,03	4,40
B.2	0,79	0,12	0,42	2,86	0,27	1,98	7,86	1,62	5,85
B.3	0,56	0,07	0,40	3,18	0,08	2,05	7,19	0,07	4,47
C.1	0,93	0,07	0,63	3,50	0,10	2,26	7,38	0,11	4,61
C.2	0,59	0,43	0,10	3,13	5,06	1,19	6,96	14,25	4,23
C.3	0,63	0,50	0,08	3,20	5,16	1,20	7,05	14,32	4,21
C.4	0,62	0,37	0,16	3,17	4,99	1,11	7,02	14,16	4,14
C.5	0,66	0,47	0,12	3,21	5,13	1,18	7,01	14,30	4,22
C.6	1,35	0,09	0,80	0,76	0,14	0,39	3,22	0,24	1,88
C.7	0,36	0,23	0,08	2,82	0,33	1,57	6,85	0,37	3,99
D.1	0,75	0,62	0,08	3,40	0,65	1,72	7,24	0,79	3,96
D.2	0,81	0,48	0,21	3,49	0,53	1,86	7,43	0,75	4,09
E.1	0,47	0,24	0,46	3,03	0,72	2,37	7,07	1,69	5,43
E.2	0,43	0,13	0,19	3,05	0,34	2,13	7,01	1,32	5,16
E.3	0,87	0,16	0,63	3,54	0,56	2,26	7,54	1,63	4,61

Os valores calculados pelos medidores para as potências ativas, como se constata, apresentaram desvios crescentes diante do aumento das distorções harmônicas nas tensões e correntes.

Por outro lado, no que se refere às potências reativas, apenas os medidores C.2, C.3, C.4 e C.5, de forma similar aos módulos II e III e IV, também evidenciaram desvios crescentes à medida que os níveis das distorções de tensões e correntes eram aumentados.

Módulo VII - Tensões e correntes distorcidas (inter-harmônicas)

Para o módulo em pauta, as grandezas tensão e corrente foram mantidas equilibradas e os respectivos sinais modulados através de ordens inter-harmônicas, com magnitudes crescentes e mesmas frequências. Assim procedendo obteve-se os resultados indicados na Tabela 9.

Tabela 7 - Desvios dos medidores no Módulo VII.

Medidor	Desvio (%)
---------	------------

	Ensaio VII.1			Ensaio VII.2			Ensaio VII.3		
	W	var	FP	W	var	FP	W	var	FP
A.1	0,18	0,21	0,06	1,04	0,21	0,19	0,48	2,11	0,25
A.2	0,06	0,10	0,02	0,08	0,10	1,28	0,02	0,26	0,10
A.3	0,12	0,14	0,00	0,06	0,21	0,04	0,03	0,18	0,03
B.1	0,11	0,18	0,01	0,03	0,32	0,05	0,06	0,30	0,04
B.2	0,23	0,54	0,12	1,12	1,63	0,08	0,02	1,32	0,20
B.3	0,15	0,25	0,02	0,00	0,38	0,06	0,12	0,34	0,03
C.1	0,17	0,03	0,02	0,96	9,22	1,28	0,45	0,21	0,10
C.2	0,11	0,26	0,02	0,01	0,05	0,01	0,07	0,51	0,09
C.3	0,05	0,13	0,01	0,06	0,05	0,00	0,01	0,62	0,10
C.4	0,15	0,41	0,04	0,01	0,17	0,03	0,10	0,38	0,07
C.5	0,07	0,19	0,02	0,08	0,06	0,00	0,03	0,54	0,09
C.6	0,05	0,09	0,02	0,23	0,30	0,08	0,09	0,30	0,06
C.7	0,08	0,24	0,05	0,01	0,15	0,02	0,04	0,13	0,03
D.1	0,14	0,69	0,08	0,28	0,54	0,04	0,17	0,70	0,08
D.2	0,16	0,38	0,03	0,32	0,24	0,01	0,23	0,36	0,02
E.1	0,16	0,23	0,01	0,02	0,27	0,04	0,11	0,23	0,05
E.2	0,04	0,46	0,08	0,09	0,48	0,06	0,00	0,85	0,13
E.3	0,11	0,19	0,02	0,96	0,38	1,28	0,40	1,94	0,10

Do exposto segue que todos os medidores apresentaram, para todos os casos analisados, pequenos desvios para as potências ativas e reativas em relação aos respectivos valores estimados analiticamente. Vale observar que apenas o medidor C.1 registrou uma potência reativa no ensaio VII.2 que se mostrou com desvio mais notório. Novamente, não se encontrou uma fundamentação que viesse a justificar o ocorrido, visto que o efeito não se apresentou com um padrão definido.

Módulo VIII - Tensões e correntes puramente senoidais com desequilíbrio de tensão e corrente

Distintamente das análises anteriores, o presente módulo se apresenta constituído por um conjunto de ensaios sob tensões e correntes puramente senoidais, em 60 Hz, entretanto, com crescentes níveis de desequilíbrios presentes em ambos sinais.

Os resultados assim obtidos encontram-se destacados na Tabela 10. Nesta observa-se que 4 medidores não foram ensaiados, visto serem equipamentos monofásicos.

Tabela 8 - Desvios dos medidores no Módulo VIII.

Medidor	Desvio (%)								
	Ensaio VIII.1			Ensaio VIII.2			Ensaio VIII.3		
	W	var	FP	W	var	FP	W	var	FP
A.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-

A.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A.3	0,10	0,07	0,01	0,05	0,09	0,01	0,05	0,10	0,01
B.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B.2	0,01	0,94	0,27	0,03	0,79	0,21	0,03	0,84	0,23
B.3	0,18	0,15	0,01	0,12	0,18	0,01	0,12	0,18	0,02
C.1	0,16	0,11	0,07	0,14	0,10	0,07	0,14	0,12	0,07
C.2	0,12	0,17	0,01	0,10	0,16	0,01	0,10	0,16	0,02
C.3	0,07	0,08	0,00	0,04	0,10	0,02	0,05	0,09	0,01
C.4	0,15	0,28	0,04	0,13	0,29	0,05	0,13	0,29	0,04
C.5	0,07	0,11	0,01	0,06	0,12	0,02	0,06	0,13	0,02
C.6	0,05	0,03	0,02	0,06	0,06	0,03	0,05	0,02	0,02
C.7	0,15	0,26	0,11	0,14	0,29	0,12	0,15	0,29	0,12
D.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D.2	0,14	0,44	0,08	0,20	0,48	0,08	0,21	0,46	0,07
E.1	0,19	0,15	0,01	0,15	0,17	0,01	0,13	0,11	0,10
E.2	0,09	0,36	0,13	0,07	0,32	0,11	0,02	0,32	0,09
E.3	0,08	0,10	0,07	0,06	0,11	0,07	0,06	0,11	0,07

Como pode ser observado, para todos os medidores ensaiados, não foram constatadas maiores divergências entre os resultados obtidos sob as condições impostas e os valores esperados dos procedimentos analíticos.

Módulo IX - Tensões e correntes distorcidas com desequilíbrio de tensão e corrente

As características impostas nesta etapa dos trabalhos, em consonância com o caderno de testes consistiu em utilizar tensões e correntes tais que seus sinais se apresentaram distorcidos (com níveis constantes em relação ao valor nominal da corrente e tensão), porém, com crescentes padrões de desequilíbrios. Assim procedendo foram obtidos os resultados constantes na Tabela 11.

Tabela 9 - Desvios dos medidores no Módulo IX.

Medidor	Desvio (%)								
	Ensaio IX.1			Ensaio IX.2			Ensaio IX.3		
	W	var	FP	W	var	FP	W	var	FP
A.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A.3	2,70	0,02	1,36	2,92	0,11	0,81	3,44	0,09	0,94
B.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B.2	2,93	0,55	1,18	3,02	0,39	0,71	3,79	0,90	0,77
B.3	2,82	0,10	1,46	3,04	0,17	0,86	3,59	0,18	1,01
C.1	3,26	0,31	1,78	3,26	0,58	1,03	3,80	0,48	1,14
C.2	2,91	8,34	2,66	3,02	27,89	6,76	3,52	16,94	3,62

C.3	2,96	8,43	2,67	3,07	27,97	6,76	3,59	17,02	3,62
C.4	2,89	8,27	2,63	2,97	27,78	6,74	3,48	16,83	3,61
C.5	2,95	8,39	2,66	3,05	27,94	6,76	3,56	16,99	3,63
C.6	2,87	0,07	1,47	3,11	0,37	0,93	3,67	0,36	1,07
C.7	2,54	0,26	1,14	2,87	0,10	0,75	3,45	0,12	0,89
D.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D.2	3,14	0,66	1,23	3,39	0,69	0,72	3,95	0,75	0,85
E.1	2,74	9,26	6,13	3,01	9,10	3,22	3,58	0,18	1,00
E.2	2,62	0,33	1,14	2,91	0,41	0,67	3,17	0,52	0,71
E.3	3,17	0,06	1,78	3,26	0,10	1,03	3,82	0,10	1,14

Os resultados acima postos e envolvendo sinais desequilibrados e distorcidos evidenciam a presença de desvios significativos tanto para as potências ativas como reativas. Tendo por base o fato que os desequilíbrios, por si só, não foram impactantes sobre os desempenhos dos medidores, fica evidenciando que tais discrepâncias se mostram diretamente dependentes da presença das distorções. Isto pode ser corroborado pelas divergências encontradas nos módulos anteriores, quando apenas as distorções harmônicas foram consideradas. Merece destaque as grandezas obtidas para os módulos IV, V e VI.

Apêndice III – Resultados das medições do protótipo de medidor

Medição 1: BAUMINAS

Tabela 10 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto) - BAUMINAS.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	551,79	347,815	0,33	0,99
Mínimos	13,10	0,00	0,00	-0,38
Médios	220,40	67,60	150,74	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	32.453,98	9.954,72	22.197,12	-

Tabela 11 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão) - BAUMINAS.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	551,79	345,915	0,33	1,00
Mínimos	13,10	0,00	0,00	-0,39
Médios	220,40	64,75	146,97	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	32.453,98	9.534,77	21.640,81	-

Tabela 12 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente) - BAUMINAS.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	551,79	308,957	0,33	1,00
Mínimos	13,10	0,00	0,00	-0,39
Médios	220,40	53,49	149,51	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	32.453,98	7.875,71	22.015,17	-

Tabela 13 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão) - BAUMINAS.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	551,79	345,708	0,32	1,00
Mínimos	13,10	0,00	0,00	-0,39
Médios	220,40	64,55	145,54	0,90
Consumo (kWh/kvarh)	32.453,98	9.504,93	21.430,70	-

Tabela 14 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão) - BAUMINAS.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	551,79	345,883	0,32	1,00
Mínimos	13,10	0,00	0,00	-0,38
Médios	220,40	64,75	145,04	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	32.453,98	9.534,39	21.356,41	-

Tabela 15 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental) - BAUMINAS.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	552,36	346,392	0,33	1,00
Mínimos	12,92	0,00	0,00	-0,38
Médios	220,63	64,91	147,00	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	32.488,02	9.558,68	21.646,05	-

Tabela 16 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva) - BAUMINAS.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	551,89	345,987	0,33	1,00
Mínimos	12,95	0,00	0,00	-0,38
Médios	220,35	64,73	146,95	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	32.446,71	9.532,08	21.638,97	-

Medição 2: BELA ISCHIA

Tabela 17 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto) - BELA ISCHIA.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.179,57	587,881	0,03	0,99
Mínimos	164,61	13,84	0,00	-0,38
Médios	769,80	357,39	0,25	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	113.353,04	52.624,97	36,35	-

Tabela 18 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão) - BELA ISCHIA.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.179,57	580,443	0,02	1,00
Mínimos	164,61	7,31	0,00	-0,39

Médios	769,80	348,22	0,15	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	113.353,04	51.275,23	21,36	-

Tabela 19 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente) - BELA ISCHIA.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.179,57	580,402	0,02	1,00
Mínimos	164,61	7,31	0,00	-0,39
Médios	769,80	348,19	0,15	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	113.353,04	51.271,21	21,36	-

Tabela 20 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão) - BELA ISCHIA.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.179,57	579,750	0,02	1,00
Mínimos	164,61	6,49	0,00	-0,39
Médios	769,80	346,04	0,15	0,90
Consumo (kWh/kvarh)	113.353,04	50.954,43	22,26	-

Tabela 21 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão) - BELA ISCHIA.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.179,57	580,784	0,02	1,00
Mínimos	164,61	7,46	0,00	-0,38
Médios	769,80	348,81	0,14	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	113.353,04	51.361,55	21,25	-

Tabela 22 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental) - BELA ISCHIA.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.180,31	580,960	0,02	1,00
Mínimos	164,87	7,42	0,00	-0,38
Médios	770,48	349,03	0,14	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	113.452,51	51.394,67	21,27	-

Tabela 23 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva) - BELA ISCHIA.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
--	--	--	--	--

	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.180,87	580,856	0,02	1,00
Mínimos	164,75	7,53	0,00	-0,38
Médios	770,28	348,87	0,14	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	113.424,43	51.370,64	21,24	-

Medição 3: HORII

Tabela 24 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto) - HORII.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.128,88	620,468	0,10	0,99
Mínimos	0,00	0,00	0,00	-0,38
Médios	455,53	260,95	0,32	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	67.076,95	38.425,16	47,65	-

Tabela 25 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão) - HORII.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.128,88	618,076	0,10	1,00
Mínimos	0,00	0,00	0,00	-0,39
Médios	455,53	258,85	0,28	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	67.076,95	38.115,90	41,91	-

Tabela 26 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente) - HORII.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.128,88	566,439	0,10	1,00
Mínimos	0,00	0,00	0,00	-0,39
Médios	455,53	232,93	0,31	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	67.076,95	34.299,64	45,39	-

Tabela 27 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão) - HORII.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.128,88	618,328	0,10	1,00
Mínimos	0,00	0,00	0,00	-0,39
Médios	455,53	258,98	0,29	0,90

Consumo (kWh/kvarh)	67.076,95	38.134,68	42,28	-
----------------------------	-----------	-----------	-------	---

Tabela 28 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão) - HORII.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.128,88	618,042	0,10	1,00
Mínimos	0,00	0,00	0,00	-0,38
Médios	455,53	258,92	0,28	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	67.076,95	38.125,68	41,87	-

Tabela 29 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental) - HORII.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.129,32	618,537	0,10	1,00
Mínimos	0,00	0,00	0,00	-0,38
Médios	455,63	259,18	0,29	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	67.091,98	38.163,56	42,11	-

Tabela 30 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva) - HORII.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.128,81	617,454	0,10	1,00
Mínimos	0,00	0,00	0,00	-0,38
Médios	455,27	258,82	0,29	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	67.038,68	38.111,34	41,99	-

Medição 4: INTERCEMENT

Tabela 31 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto) - INTERCEMENT.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	9.743,96	5.577,455	1,65	0,99
Mínimos	1.542,19	0,00	0,00	-0,38
Médios	7.092,76	2.403,29	59,26	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	1.044.408,52	353.884,99	8.725,69	-

Tabela 32 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão) - INTERCEMENT.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	9.743,96	5.565,473	1,57	1,00
Mínimos	1.542,19	0,00	0,00	-0,39
Médios	7.092,76	2.367,45	55,95	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	1.044.408,52	348.607,61	8.238,63	-

Tabela 33 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente) - INTERCEMENT.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	9.743,96	5.565,052	1,57	1,00
Mínimos	1.542,19	0,00	0,00	-0,39
Médios	7.092,76	2.367,18	55,96	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	1.044.408,52	348.567,56	8.239,41	-

Tabela 34 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão) - INTERCEMENT.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	9.743,96	5.561,795	1,57	1,00
Mínimos	1.542,19	0,00	0,00	-0,39
Médios	7.092,76	2.360,16	56,19	0,90
Consumo (kWh/kvarh)	1.044.408,52	347.533,34	8.274,10	-

Tabela 35 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão) - INTERCEMENT.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	9.743,96	5.566,303	1,57	1,00
Mínimos	1.542,19	0,00	0,00	-0,38
Médios	7.092,76	2.367,75	55,95	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	1.044.408,52	348.651,39	8.238,55	-

Tabela 36 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental) - INTERCEMENT.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	9.743,74	5.566,536	1,57	1,00
Mínimos	1.541,36	0,00	0,00	-0,38
Médios	7.092,16	2.367,79	55,95	0,89

Consumo (kWh/kvarh)	1.044.320,64	348.656,54	8.239,00	-
----------------------------	--------------	------------	----------	---

Tabela 37 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva) - INTERCEMENT.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	9.742,28	5.565,326	1,57	1,00
Mínimos	1.541,68	0,00	0,00	-0,38
Médios	7.092,22	2.366,82	55,96	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	1.044.329,45	348.514,97	8.240,24	-

Medição 5: TCIL

Tabela 38 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto) - TCIL.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.063,69	539,595	0,06	0,99
Mínimos	6,70	3,55	0,00	-0,38
Médios	255,51	126,52	0,12	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	37.624,05	18.629,39	17,51	-

Tabela 39 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão) - TCIL.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.063,69	537,637	0,05	1,00
Mínimos	6,70	1,87	0,00	-0,39
Médios	255,51	117,95	0,09	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	37.624,05	17.367,66	13,71	-

Tabela 40 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente) - TCIL.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.063,69	491,472	0,06	1,00
Mínimos	6,70	1,27	0,00	-0,39
Médios	255,51	106,59	0,11	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	37.624,05	15.695,81	16,70	-

Tabela 41 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão) - TCIL.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.063,69	537,186	0,05	1,00
Mínimos	6,70	1,47	0,00	-0,39
Médios	255,51	117,06	0,10	0,90
Consumo (kWh/kvarh)	37.624,05	17.237,52	14,23	-

Tabela 42 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão) - TCIL.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.063,69	537,718	0,05	1,00
Mínimos	6,70	1,87	0,00	-0,38
Médios	255,51	118,08	0,09	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	37.624,05	17.386,98	13,64	-

Tabela 43 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental) - TCIL.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.063,95	537,749	0,05	1,00
Mínimos	6,86	1,91	0,00	-0,38
Médios	255,61	118,10	0,09	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	37.639,07	17.390,38	13,70	-

Tabela 44 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva) - TCIL.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	1.064,00	537,399	0,05	1,00
Mínimos	6,86	1,89	0,00	-0,38
Médios	255,58	118,09	0,09	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	37.634,06	17.388,30	13,64	-

Medição 6: UBA FERROMINAS

Tabela 45 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto) - UBA FERROMINAS.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	605,76	282,537	0,14	0,99
Mínimos	0,00	0,00	0,00	-0,38

Médios	90,15	29,75	6,63	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	13.274,63	4.380,65	976,77	-

Tabela 46 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão) - UBA FERROMINAS.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	605,76	257,349	0,11	1,00
Mínimos	0,00	0,00	0,00	-0,39
Médios	90,15	23,09	5,33	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	13.274,63	3.399,42	784,73	-

Tabela 47 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente) - UBA FERROMINAS.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	605,76	257,309	0,11	1,00
Mínimos	0,00	0,00	0,00	-0,39
Médios	90,15	23,08	5,33	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	13.274,63	3.398,80	784,81	-

Tabela 48 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão) - UBA FERROMINAS.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	605,76	247,316	0,11	1,00
Mínimos	0,00	0,00	0,00	-0,39
Médios	90,15	22,20	5,46	0,90
Consumo (kWh/kvarh)	13.274,63	3.269,48	804,21	-

Tabela 49 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão) - UBA FERROMINAS.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	605,76	257,005	0,11	1,00
Mínimos	0,00	0,00	0,00	-0,38
Médios	90,15	23,15	5,33	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	13.274,63	3.409,10	785,06	-

Tabela 50 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental) - UBA FERROMINAS.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
--	--	--	--	--

	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	606,77	257,368	0,11	1,00
Mínimos	0,04	0,00	0,00	-0,38
Médios	90,21	23,19	5,34	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	13.284,13	3.414,13	786,20	-

Tabela 51 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva) - UBA FERROMINAS.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	606,83	257,323	0,11	1,00
Mínimos	0,04	0,00	0,00	-0,38
Médios	90,19	23,18	5,33	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	13.280,54	3.413,35	785,10	-

Medição 7: VOTORANTIN

Tabela 52 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto) - VOTORANTIN.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	2.521,97	1.504,974	0,00	0,99
Mínimos	202,52	169,29	0,00	-0,38
Médios	1.527,81	900,46	0,00	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	224.969,83	132.593,11	0,00	-

Tabela 53 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão) - VOTORANTIN.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	2.521,97	1.499,506	0,00	1,00
Mínimos	202,52	156,83	0,00	-0,39
Médios	1.527,81	892,24	0,00	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	224.969,83	131.382,36	0,00	-

Tabela 54 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente) - VOTORANTIN.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	2.521,97	1.374,946	0,00	1,00
Mínimos	202,52	146,07	0,00	-0,39

Médios	1.527,81	816,89	0,00	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	224.969,83	120.286,40	0,00	-

Tabela 55 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão) - VOTORANTIN.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	2.521,97	1.498,629	0,00	1,00
Mínimos	202,52	156,05	0,00	-0,39
Médios	1.527,81	891,80	0,00	0,90
Consumo (kWh/kvarh)	224.969,83	131.316,85	0,00	-

Tabela 56 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão) - VOTORANTIN.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	2.521,97	1.499,797	0,00	1,00
Mínimos	202,52	156,84	0,00	-0,38
Médios	1.527,81	892,37	0,00	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	224.969,83	131.401,01	0,00	-

Tabela 57 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental) - VOTORANTIN.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	2.521,94	1.499,655	0,00	1,00
Mínimos	202,78	156,91	0,00	-0,38
Médios	1.527,81	892,41	0,00	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	224.970,45	131.406,64	0,00	-

Tabela 58 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva) - VOTORANTIN.

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	2.521,79	1.499,138	0,00	1,00
Mínimos	202,88	156,74	0,00	-0,38
Médios	1.527,59	891,72	0,00	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	224.938,35	131.306,41	0,00	-

Medição 8: TV CABO BRANCO

Tabela 59 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	257,48	75,978	0,00	0,99
Mínimos	22,43	2,10	0,00	-0,38
Médios	139,77	29,06	0,08	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	20.580,53	4.279,65	11,44	-

Tabela 60 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	257,48	75,277	0,00	1,00
Mínimos	22,43	1,02	0,00	-0,39
Médios	139,77	26,81	0,02	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	20.580,53	3.948,14	2,75	-

Tabela 61 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	257,48	75,274	0,00	1,00
Mínimos	22,43	0,00	0,00	-0,39
Médios	139,77	23,33	0,52	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	20.580,53	3.434,76	76,87	-

Tabela 62 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	257,48	75,231	0,00	1,00
Mínimos	22,43	0,97	0,00	-0,39
Médios	139,77	26,60	0,02	0,90
Consumo (kWh/kvarh)	20.580,53	3.917,52	3,06	-

Tabela 63 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	257,48	75,277	0,00	1,00
Mínimos	22,43	1,03	0,00	-0,38
Médios	139,77	26,83	0,02	0,89

Consumo (kWh/kvarh)	20.580,53	3.950,49	2,76	-
----------------------------	-----------	----------	------	---

Tabela 64 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	257,45	75,336	0,00	1,00
Mínimos	22,46	1,03	0,00	-0,38
Médios	139,79	26,84	0,02	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	20.583,90	3.951,88	2,91	-

Tabela 65 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	257,46	75,340	0,00	1,00
Mínimos	22,48	1,03	0,00	-0,38
Médios	139,77	26,83	0,02	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	20.581,49	3.951,15	2,91	-

Medição 9: SHOPPING MANAÍRA

Tabela 66 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	4.935,14	1.655,995	0,07	
Mínimos	467,58	77,44	0,00	
Médios	2.649,13	703,08	0,14	
Consumo (kWh/kvarh)	390.084,38	103.528,57	20,25	

Tabela 67 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	4.935,14	1.638,146	0,01	
Mínimos	467,58	10,35	0,00	
Médios	2.649,13	680,66	0,02	
Consumo (kWh/kvarh)	390.084,38	100.226,75	3,36	

Tabela 68 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	4.935,14	1.372,918	0,10	1,00
Mínimos	467,58	0,00	0,00	-0,39
Médios	2.649,13	539,84	0,57	0,89
Consumo (kWh/kvarh)	390.084,38	79.491,70	84,00	-

Tabela 69 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	4.935,14	1.657,837	0,01	
Mínimos	467,58	12,68	0,00	
Médios	2.649,13	688,18	0,02	
Consumo (kWh/kvarh)	390.084,38	101.334,71	2,94	

Tabela 70 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	4.935,14	1.635,877	0,01	
Mínimos	467,58	10,41	0,00	
Médios	2.649,13	680,30	0,02	
Consumo (kWh/kvarh)	390.084,38	100.173,54	3,31	

Tabela 71 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	4.932,57	1.635,653	0,01	
Mínimos	468,40	10,44	0,00	
Médios	2.648,47	679,95	0,02	
Consumo (kWh/kvarh)	389.986,76	100.122,74	3,35	

Tabela 72 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	4.931,63	1.634,669	0,01	
Mínimos	468,48	10,09	0,00	
Médios	2.647,94	679,21	0,02	

Consumo (kWh/kvarh)	389.909,05	100.013,05	3,44	
----------------------------	------------	------------	------	--

Medição 10: TV JOÃO PESSOA

Tabela 73 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	327,83	52,797	0,00	
Mínimos	171,19	14,60	0,00	
Médios	233,89	30,16	0,00	
Consumo (kWh/kvarh)	34.439,76	4.440,98	0,00	

Tabela 74 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	327,83	50,648	0,00	
Mínimos	171,19	10,45	0,00	
Médios	233,89	26,53	0,00	
Consumo (kWh/kvarh)	34.439,76	3.906,19	0,00	

Tabela 75 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	327,83	33,285	0,00	
Mínimos	171,19	1,68	0,00	
Médios	233,89	14,18	0,01	
Consumo (kWh/kvarh)	34.439,76	2.088,02	0,77	

Tabela 76 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	327,83	50,826	0,00	
Mínimos	171,19	10,20	0,00	
Médios	233,89	26,39	0,00	
Consumo (kWh/kvarh)	34.439,76	3.886,60	0,00	

Tabela 77 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	327,83	50,568	0,00	
Mínimos	171,19	10,43	0,00	
Médios	233,89	26,49	0,00	
Consumo (kWh/kvarh)	34.439,76	3.900,41	0,00	

Tabela 78 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	327,84	50,567	0,00	
Mínimos	171,17	10,43	0,00	
Médios	233,84	26,48	0,00	
Consumo (kWh/kvarh)	34.433,08	3.899,00	0,00	

Tabela 79 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	327,69	50,512	0,00	
Mínimos	171,10	10,39	0,00	
Médios	233,77	26,44	0,00	
Consumo (kWh/kvarh)	34.422,31	3.892,83	0,00	

Medição 11: HOSPITAL UNIMED

Tabela 80 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	770,99	179,834	0,01	
Mínimos	5,68	23,24	0,00	
Médios	590,39	132,89	0,02	
Consumo (kWh/kvarh)	86.935,04	19.567,43	2,85	

Tabela 81 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	770,99	173,967	0,00	

Mínimos	5,68	20,94	0,00	
Médios	590,39	128,97	0,01	
Consumo (kWh/kvarh)	86.935,04	18.991,21	0,91	

Tabela 82 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	770,99	140,139	0,00	
Mínimos	5,68	20,60	0,00	
Médios	590,39	101,87	0,01	
Consumo (kWh/kvarh)	86.935,04	15.000,94	1,00	

Tabela 83 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	770,99	175,213	0,00	
Mínimos	5,68	20,86	0,00	
Médios	590,39	129,16	0,01	
Consumo (kWh/kvarh)	86.935,04	19.019,47	0,90	

Tabela 84 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	770,99	174,081	0,00	
Mínimos	5,68	20,96	0,00	
Médios	590,39	128,89	0,01	
Consumo (kWh/kvarh)	86.935,04	18.979,18	0,91	

Tabela 85 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	770,77	173,808	0,00	
Mínimos	5,73	20,96	0,00	
Médios	590,22	128,79	0,01	
Consumo (kWh/kvarh)	86.909,27	18.963,67	0,86	

Tabela 86 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	770,68	173,915	0,00	
Mínimos	5,74	20,97	0,00	
Médios	590,19	128,73	0,01	
Consumo (kWh/kvarh)	86.905,08	18.954,76	0,99	

Medição 12: BRITAMAT

Tabela 87 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	853,69	519,045	0,34	
Mínimos	-9,05	0,00	0,00	
Médios	97,18	99,78	84,85	
Consumo (kWh/kvarh)	5.150,30	5.288,12	4.497,18	

Tabela 88 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	853,69	314,731	0,08	
Mínimos	-9,05	0,00	0,00	
Médios	97,18	31,42	16,16	
Consumo (kWh/kvarh)	5.150,30	1.665,29	856,41	

Tabela 89 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	853,69	314,762	0,09	
Mínimos	-9,05	0,00	0,00	
Médios	97,18	31,22	21,66	
Consumo (kWh/kvarh)	5.150,30	1.654,62	1.147,95	

Tabela 90 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	853,69	307,693	0,01	
Mínimos	-9,05	0,00	0,00	

Médios	97,18	30,68	0,36	
Consumo (kWh/kvarh)	5.150,30	1.625,95	19,07	

Tabela 91 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	853,69	314,467	0,01	
Mínimos	-9,05	0,00	0,00	
Médios	97,18	31,72	0,56	
Consumo (kWh/kvarh)	5.150,30	1.681,21	29,64	

Tabela 92 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	873,84	334,253	0,10	
Mínimos	-1,68	0,00	0,00	
Médios	96,74	33,28	19,26	
Consumo (kWh/kvarh)	5.127,29	1.763,63	1.020,83	

Tabela 93 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	864,43	315,969	0,04	
Mínimos	-1,04	0,00	0,00	
Médios	86,08	31,77	8,14	
Consumo (kWh/kvarh)	4.562,43	1.683,75	431,23	

Medição 13: TECAB

Tabela 94 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	132,59	111,981	0,03	
Mínimos	3,29	0,00	0,00	
Médios	36,65	28,69	7,52	
Consumo (kWh/kvarh)	5.396,06	4.224,59	1.107,20	

Tabela 95 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	132,59	111,628	0,02	
Mínimos	3,29	0,00	0,00	
Médios	36,65	26,98	5,59	
Consumo (kWh/kvarh)	5.396,06	3.972,53	822,74	

Tabela 96 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	132,59	106,520	0,03	
Mínimos	3,29	0,00	0,00	
Médios	36,65	25,39	5,69	
Consumo (kWh/kvarh)	5.396,06	3.738,50	838,05	

Tabela 97 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	132,59	111,641	0,03	
Mínimos	3,29	0,00	0,00	
Médios	36,65	26,58	5,82	
Consumo (kWh/kvarh)	5.396,06	3.913,38	857,34	

Tabela 98 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	132,59	111,643	0,02	
Mínimos	3,29	0,00	0,00	
Médios	36,65	26,81	5,55	
Consumo (kWh/kvarh)	5.396,06	3.947,58	817,01	

Tabela 99 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	132,62	111,615	0,02	
Mínimos	3,47	0,00	0,00	
Médios	36,75	27,03	5,54	

Consumo (kWh/kvarh)	5.411,89	3.980,50	815,94	
----------------------------	----------	----------	--------	--

Tabela 100 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	132,45	111,572	0,02	
Mínimos	3,47	0,00	0,00	
Médios	36,73	27,01	5,54	
Consumo (kWh/kvarh)	5.408,68	3.976,73	816,17	

Medição 14: M DIAS BRANCO S.A.

Tabela 101 – Resultado para método do triângulo de potências (ponto-a-ponto).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	3.120,92	1.506,931	0,01	
Mínimos	1.389,35	603,21	0,00	
Médios	2.663,33	1.228,34	0,02	
Consumo (kWh/kvarh)	392.175,95	180.872,55	3,45	

Tabela 102 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	3.120,92	1.503,701	0,01	
Mínimos	1.389,35	597,61	0,00	
Médios	2.663,33	1.224,02	0,01	
Consumo (kWh/kvarh)	392.175,95	180.236,32	2,06	

Tabela 103 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Amostras (Corrente).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	3.120,92	1.361,549	0,01	
Mínimos	1.389,35	532,58	0,00	
Médios	2.663,33	1.099,07	0,02	
Consumo (kWh/kvarh)	392.175,95	161.838,58	2,62	

Tabela 104 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Derivação (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	3.120,92	1.502,641	0,01	
Mínimos	1.389,35	593,57	0,00	
Médios	2.663,33	1.222,72	0,02	
Consumo (kWh/kvarh)	392.175,95	180.045,65	2,43	

Tabela 105 – Resultado para Método Deslocamento 90 por Integração (Tensão).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	3.120,92	1.504,328	0,01	
Mínimos	1.389,35	597,71	0,00	
Médios	2.663,33	1.224,21	0,01	
Consumo (kWh/kvarh)	392.175,95	180.265,65	1,98	

Tabela 106 – Resultado para Método Fourier (Apenas Fundamental).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	3.120,11	1.503,774	0,01	
Mínimos	1.388,76	597,65	0,00	
Médios	2.662,53	1.224,11	0,01	
Consumo (kWh/kvarh)	392.057,37	180.249,65	2,02	

Tabela 107 – Resultado para Método UFU (Sequência Positiva).

	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)			
	P	Qind	Qcap	FP
Máximos	3.119,18	1.503,439	0,01	
Mínimos	1.388,82	597,60	0,00	
Médios	2.662,22	1.223,66	0,01	
Consumo (kWh/kvarh)	392.011,83	180.184,05	2,00	