



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**STEFANI CAROLLINE LEAL DE FREITAS**

**ESTUDOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DA OPERAÇÃO  
CONJUNTA DE UM SUPRESSOR ELETROMAGNÉTICO E  
DE UM FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA**

**Ilha Solteira**  
2014





**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**STEFANI CAROLLINE LEAL DE FREITAS**

**ESTUDOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DA OPERAÇÃO  
CONJUNTA DE UM SUPRESSOR ELETROMAGNÉTICO E  
DE UM FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de  
Ilha Solteira – UNESP como parte dos  
requisitos para a obtenção do título de Doutora  
em Engenharia Elétrica.  
Área de concentração: Automação.

Prof. Dr. LUÍS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA  
Orientador

Prof. Dr. JOÃO LUIZ AFONSO  
Co-orientador

Prof.<sup>a</sup> Dra. PRISCILA DA SILVA OLIVEIRA  
Co-orientadora

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F862e Freitas, Stefani Caroline Leal de.  
Estudos teóricos e experimentais da operação conjunta de um supressor eletromagnético e de um filtro ativo de potência / Stefani Caroline Leal de Freitas. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014  
195 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2014

Orientador: Luís Carlos Origa de Oliveira

Co-orientador: João Luiz Afonso

Co-orientador: Priscila da Silva Oliveira

Inclui bibliografia

1. Bloqueador eletromagnético. 2. Filtro de sequência zero. 3. Harmônicas.  
4. Supressor eletromagnético. 5. Filtro ativo paralelo. 6. Filtro híbrido.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO:** Estudos teóricos e experimentais da operação conjunta de um supressor eletromagnético e de um filtro ativo de potência

**AUTORA:** STEFANI CAROLLINE LEAL DE FREITAS  
**ORIENTADOR:** Prof. Dr. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA  
**CO-ORIENTADOR:** Prof. Dr. JOÃO LUIZ AFONSO  
**CO-ORIENTADORA:** Profa. Dra. PRISCILA DA SILVA OLIVEIRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. PRISCILA DA SILVA OLIVEIRA  
Campus Universitário de Palmas / Fundação Universidade Federal do Tocantins

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

Prof. Dr. FALCONDES JOSE MENDES DE SEIXAS  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. ARNULFO BARROSO DE VASCONCELLOS  
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de Mato Grosso

Prof. Dr. JOSÉ GABRIEL OLIVEIRA PINTO  
Campus de Azurém / Universidade do Minho

Data da realização: 25 de julho de 2014.



## DEDICATÓRIA

*À memória do meu avô Idomar.*





## AGRADECIMENTOS

Há um Salmo que frequentemente eu medito e, neste momento tão especial, fundamenta muito dos meus agradecimentos.

“Antes mesmo de o meu corpo tomar forma humana, o Senhor já havia planejado todos os dias da minha vida; cada um deles estava registrado no Seu livro, antes de qualquer um deles existir.” Salmo 139: 16.

Agradeço ao Senhor, pois eu profundamente sinto Sua presença e Seu amor. Agradeço ao Senhor, pela concretização de um sonho que Tu mesmo escreveste sobre mim no Seu livro. Quanto privilégio! Agradeço também por que o Senhor me deu suporte, providenciou todos os aparatos necessários e estabeleceu cada um dos encontros que eu tive no decorrer dessa trajetória, e porque através da vida dessas pessoas que encontrei e convivi, o Senhor abençoou a minha.

É importante mencionar aqui todos que, de uma forma ou de outra, colaboraram para que este trabalho se tornasse uma realidade. Mas, bem sei que é arriscado eu não dar conta desse „muitíssimo obrigado“ como é merecido, porque será difícil exprimir toda a gratidão que tenho em meu coração neste momento. Esta tese é o resultado visível de um processo de construção, amadurecimento e desafios. Dessa forma, dedico algumas palavras àqueles que dela fazem parte direta ou indiretamente ou, ainda, pelo fato de simplesmente existirem.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Luís Origa, por ter aceitado a orientação desse trabalho. Aprendi muito com essa convivência e não apenas pela referência profissional e conhecimento que me foi transmitido, mas também pela pessoa tão generosa, humilde e de qualidade que é. Obrigada pelo incentivo contínuo nesses anos de trabalho. Digo com verdade que aprendi muito além de conhecimentos técnicos e científicos, e eu espero ter a oportunidade de ser para os meus futuros alunos tão especial quanto meu orientador foi para mim.

Ao Prof. Dr. João Afonso, agradeço pela oportunidade que me deu ao me receber na Universidade do Minho, Portugal, no período sanduíche do meu doutorado. Lá convivi e aprendi com um profissional diferenciado, que acredita e mostra paixão pelo que faz, que incentiva sua equipe e os inspira. Todos os agradecimentos que eu puder escrever aqui serão insuficientes para expressar a gratidão que tenho pela co-orientação, por toda a atenção, motivação, extrema ajuda e dedicação que teve em todas, todas as etapas do meu trabalho. Obrigada especialmente pelo amigo que se tornou para mim.

Ao doutorando do Grupo de Eletrônica de Potência e Energia da Universidade do Minho, Bruno Exposto, agradeço pela boa vontade, paciência e empenho com os ensaios experimentais do meu trabalho, por todos os auxílios que me prestou durante o período sanduíche do meu doutorado e especialmente pela contínua diligência que teve mesmo após o meu regresso. Mil vezes obrigada!

Aos colegas do Grupo de Eletrônica de Potência e Energia da Universidade do Minho, pela acolhida durante o período do meu doutorado sanduíche.

À co-orientadora Dra. Priscila Oliveira, obrigada pelo apoio e cuidado com meu trabalho. Agradeço pela amizade, companhia e por ter aceitado tantos desafios ao meu lado. Hoje estou feliz por saber que nosso trabalho conjunto continuará e ainda dará muitos frutos. Você é muito querida para mim.

Ao Prof. Dr. Júlio Borges de Souza, agradeço pela amizade preciosa, pelo privilégio da convivência com uma pessoa tão nobre, pelo bom ouvinte que é e pelo dom da palavra que tem. Obrigada pelo profissional tão solícito e atencioso com quem pude contar sempre que precisei. Reforço... Você é indispensável!

Agradeço ao engenheiro do Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica da FEIS-UNESP, Rodrigo Nunes de Oliveira, pelo auxílio na solução de questões que tive durante a construção deste trabalho.

Aos Profs. Dr. Ruben Romero e Dr. Ricardo Tokio, por terem sido sempre prestativos nos momentos dessa caminhada.

Aos demais professores do Programa Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da FEIS UNESP pelo convívio e aprendizado.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro prestado.

À CAPES pelo auxílio financeiro prestado no Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior, processo BEX: 7427/12-3.

Agradeço aos amigos da Pós-Graduação, Naryanne Peraro, Jadiel Silva, Cibele Trinca, Carolina Goulart, Ana Karina Silva, Raiane Piacente e Lucas Teles, pelo companheirismo, partilha de momentos de estudos e entusiasmos.

À minha família paterna e materna, em geral, pelo carinho e apoio incondicional.

À minha avó Delfina, minha mãe Luciana e meu irmão Netinho, pelo amor e suporte que me alimentam.

E, *last but not least*, gostaria de agradecer ao meu amado esposo Nicodemos Neto, por participar desta trajetória com amor e compreensão, por me motivar e me encorajar em todos os aspectos da vida.

*Sigo firmado na rocha que é Cristo, em quem estão escondidos todos os tesouros da sabedoria e da ciência.*

*Colossenses 2:2-3.*



## RESUMO

Com vistas à mitigação das distorções harmônicas, sempre que possível, são adotadas medidas operacionais relacionadas à adequação das cargas geradoras de harmônicas, fazendo-se uso de tecnologias menos poluentes, multiplicação do número de pulsos em instalações conversoras de grande porte, alteração da topologia das redes elétricas, entre outras. Ocorre, que, em diversas vezes, tais medidas são inviáveis sob o ponto de vista econômico, ou mesmo insuficientes para garantir o funcionamento adequado do sistema e/ou atender os limites estabelecidos pelas normas e recomendações técnicas. Nesses casos, torna-se indispensável o uso de equipamentos especiais para atenuação de distorções harmônicas.

O uso de filtros e dispositivos de compensação constituem as técnicas mais aplicadas para redução das componentes harmônicas. Essas técnicas podem ser separadas em dois grandes grupos, dependendo do modo operacional, ativo ou passivo, sendo ambos amplamente conhecidos e aplicados nos mais distintos setores da engenharia.

Considerando a aplicação de estruturas compensadoras em sistemas elétricos a quatro fios com carregamentos monofásicos não lineares, apresenta-se nesta tese um novo arranjo de compensação harmônica que incorpora simultaneamente filtragem ativa e passiva, e que apresenta todas as funcionalidades no que tange à compensação harmônica de um filtro ativo de quatro braços. Nessa perspectiva, a filtragem harmônica das componentes de sequências positiva e negativa é realizada por um filtro ativo de três braços, enquanto que, a filtragem das harmônicas homopolares fica atribuída ao supressor eletromagnético de sequência zero.

Considerando o mesmo nível de potência a ser processado, presume-se que os custos dos dispositivos eletromagnéticos sejam menores quando comparados aos dispositivos de estado sólido, notadamente as chaves eletrônicas e sensores, que podem ser eliminados do filtro ativo de quatro braços quando a compensação das harmônicas homopolares ficar a cargo do supressor eletromagnético, que consiste num equipamento robusto e confiável.

Esta tese apresenta, portanto, uma investigação do desempenho desta nova estrutura híbrida de filtragem harmônica, realizada por meio de estudos teóricos, simulados e experimentais.

**Palavras-chave:** Bloqueador eletromagnético. Filtro de sequência zero. Harmônicas. Supressor eletromagnético. Filtro ativo paralelo. Filtro híbrido.



## ABSTRACT

With a view to mitigate harmonic distortion, whenever possible are adopted operational attitudes related to the suitability of harmonic generating loads, making use of cleaner technologies, multiplying the number of pulses in large converting installations, changes in electric grid topology, among others. Occurs that, in several times, such attitudes are not feasible under the economic point of view or even insufficient to ensure proper system operation and/or meet the limits set by standards and technical recommendations. In these cases, it becomes necessary to use special equipments to mitigate harmonic distortion.

The use of filters and compensation devices constitute the techniques applied to reducing harmonic components. These techniques can be separated into two major groups, depending on the operating mode, active or passive, both widely known and applied in the most diverse sectors of engineering.

Considering the expectation of compensating structures application in four-wire electrical systems with single-phase nonlinear loads, this thesis presents a new arrangement of harmonic compensation that incorporates both active and passive filtering, and that presents all the features regarding the harmonic compensation of a four-arm active filter. In this perspective, the harmonic filtering of positive and negative sequences components is performed by a three-arm active filter, while the filtering of zero sequence harmonics is attributed to the electromagnetic zero sequence suppressor.

Considering the same power level to be processed, it is assumed that the costs of electromagnetic devices are smaller when compared to solid state devices, notably the electronic switches and sensors, which can be eliminated of the four-arm active filter when the responsibility to compensate homopolar harmonic is of the electromagnetic suppressor, which is a robust and reliable device.

This thesis, therefore, presents a performance investigation of this new harmonic filtering hybrid structure, conducted through theoretical, simulated and experimental studies.

**Keywords:** Electromagnetic blocking. Zero sequence filter. Harmonics. Electromagnetic suppressor. Parallel active filter. Hybrid filter.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Comparativo entre formas de onda trifásicas: (a) Formas de onda senoidais e periódicas; (b) Formas de onda periódicas submetidas a distorções harmônicas.....	36
Figura 2	Espectros harmônicos: (a) Componentes de fase; (b) Componentes sequenciais.....	38
Figura 3	Técnicas e equipamentos utilizados na atenuação/eliminação de problemas relacionados à QEE.....	42
Figura 4	Posicionamento de um filtro eletromagnético paralelo à rede.....	50
Figura 5	Conexão zigue-zague do filtro eletromagnético.....	51
Figura 6	Filtro eletromagnético de três colunas: (a) Acoplamentos magnéticos; (b) Conexões elétricas.....	52
Figura 7	Detalhe dos enrolamentos e interligação das bobinas.....	53
Figura 8	Indutâncias Mútuas: (a) Entre bobinas de uma mesma coluna $M_f$ ; (b) Entre bobinas de colunas adjacentes $M_{adj}$ ; (c) Entre bobinas de colunas externas $M_{ext}$ .....	54
Figura 9	Circuitos sequenciais desacoplados.....	55
Figura 10	Posicionamento bloqueador eletromagnético em série com a rede elétrica.	56
Figura 11	Arranjo eletromagnético do bloqueador eletromagnético.....	56
Figura 12	Esquema elétrico dos enrolamentos das bobinas.....	57
Figura 13	Acoplamento magnético do bloqueador eletromagnético.....	58
Figura 14	Circuitos sequenciais desacoplados do bloqueador.....	59
Figura 15	Instalação conjunta do filtro e do bloqueador de sequência zero em um sistema.....	60
Figura 16	Filtros Ativos – Gerador ideal de corrente.....	64
Figura 17	Filtros Ativos – Geradores ideais de tensão.....	64
Figura 18	Classificação dos Filtros Ativos de Potência.....	65
Figura 19	Estágios da implementação do critério técnicas de controle nos domínios do tempo e da frequência.....	66
Figura 20	Tipos de Inversores. (a) CSI; (b) VSI.....	66
Figura 21	Princípio de funcionamento de um FAP.....	67

Figura 22	FAP conectado a um sistema monofásico a dois fios.....	68
Figura 23	FAP a três fios conectado a um sistema trifásico.....	69
Figura 24	FAP <i>split capacitor</i> conectado a um sistema trifásico a quatro fios.....	70
Figura 25	FAP de quatro braços conectado a um sistema trifásico a quatro fios.....	71
Figura 26	Fluxo de potências baseado na teoria p-q.....	73
Figura 27	Compensação das potências $q$ , $\tilde{p}$ , $\overline{p_0}$ e $\widetilde{p_0}$ com o uso de um FAP de quatro braços.....	74
Figura 28	Compensação das potências $q$ , $\tilde{p}$ , $\overline{p_0}$ e $\widetilde{p_0}$ com o uso de um FAP de quatro braços.....	79
Figura 29	Fluxo das potências p-q com o uso do arranjo híbrido de filtragem.....	79
Figura 30	Alteração da topologia do filtro ativo.....	80
Figura 31	Estrutura eletromagnética incorporada.....	81
Figura 32	Arranjo híbrido de filtragem harmônica proposto.....	81
Figura 33	Circuito equivalente simplificado.....	82
Figura 34	Esquema elétrico do FAP.....	84
Figura 35	Dimensões das lâminas e montagem do núcleo do filtro eletromagnético: (a) Chapas magnéticas; (b) Montagem.....	89
Figura 36	Protótipo do filtro eletromagnético construído: (a) Visão frontal; (b) Visão lateral.....	90
Figura 37	Dimensões das lâminas e montagem do núcleo do bloqueador eletromagnético: (a) Chapas magnéticas; (b) Montagem.....	91
Figura 38	Protótipo do bloqueador construído: (a) Visão frontal; (b) Visão lateral.....	92
Figura 39	Arranjo experimental para avaliação da impedância de sequência zero do filtro eletromagnético.....	94
Figura 40	Tensões e correntes de sequência zero do ensaio do filtro eletromagnético: (a) Nível de tensão a 1 V; (b) Nível de tensão a 3,1 V.....	94
Figura 41	Arranjo experimental para avaliação da impedância de sequência positiva do filtro eletromagnético.....	95
Figura 42	Tensões e correntes de sequência positiva do filtro eletromagnético: (a) Tensões de alimentação trifásicas; (b) Correntes trifásicas.....	95
Figura 43	Arranjo experimental para avaliação das características de sequência zero do bloqueador eletromagnético.....	96

Figura 44	Tensão e corrente de sequência zero do ensaio do bloqueador eletromagnético.....	97
Figura 45	Arranjo experimental para avaliação das características do bloqueador eletromagnético.....	97
Figura 46	Tensões e correntes de sequência positiva do ensaio do bloqueador eletromagnético: (a) Correntes trifásicas; (b) Tensões trifásicas.....	98
Figura 47	Filtro ativo de potência paralelo.....	99
Figura 48	Módulos do filtro ativo paralelo: (a) Sensores de tensão; (b) Sensores de corrente; (c) Circuitos de condicionamento de sinal; (d) DSP; (e) Inversor	100
Figura 49	Esquema representativo do FAP adaptado para um sistema a três fios.....	101
Figura 50	Layout do sistema simulado no <i>PSIM</i> <sup>®</sup> : (a) Diagrama de simulação; (b) Filtro ativo paralelo; (c) Supressor eletromagnético.....	104
Figura 51	Caso A – Correntes de carga (fases <i>R</i> , <i>S</i> e <i>T</i> , e <i>neutro</i> ).....	105
Figura 52	Caso A – Espectros harmônicos, com valores de pico, das correntes de alimentação: (a) Componentes de fase. (b) Componentes simétricas.....	106
Figura 53	Caso A – Tensão e corrente na fase <i>R</i> .....	106
Figura 54	Caso B – Correntes de alimentação (fases <i>R</i> , <i>S</i> e <i>T</i> , e <i>neutro</i> ).....	107
Figura 55	Caso B – Espectros harmônicos, com valores de pico, das correntes de alimentação: (a) Componentes de fase; (b) Componentes simétricas.....	107
Figura 56	Caso B – Tensão e corrente na fase <i>R</i> .....	108
Figura 57	Caso C – Correntes de alimentação (fases <i>R</i> , <i>S</i> e <i>T</i> , e <i>neutro</i> ).....	108
Figura 58	Caso C – Espectros harmônicos, com valores de pico, das correntes de alimentação: (a) Componentes de fase; (b) Componentes simétricas.....	109
Figura 59	Caso C – Tensão e corrente na fase <i>R</i> .....	109
Figura 60	Caso D – Correntes de alimentação (fases <i>R</i> , <i>S</i> e <i>T</i> , e <i>neutro</i> ).....	110
Figura 61	Caso D – Espectros harmônicos, com valores de pico, das correntes de alimentação: (a) Componentes de fase; (b) Componentes simétricas.....	111
Figura 62	Caso D – Tensão e corrente na fase <i>R</i> .....	111
Figura 63	Caso E – Correntes de alimentação (fases <i>R</i> , <i>S</i> e <i>T</i> , e <i>neutro</i> ).....	112
Figura 64	Caso E – Espectros harmônicos, com valores de pico, das correntes de alimentação: (a) Componentes de fase; (b) Componentes simétricas.....	112
Figura 65	Caso F – Correntes de alimentação (fases <i>R</i> , <i>S</i> e <i>T</i> , e <i>neutro</i> ).....	113

Figura 66	Caso F – Espectros harmônicos, com valores de pico, das correntes de alimentação: (a) Componentes de fase; (b) Componentes simétricas.....	113
Figura 67	Caso G – Correntes de alimentação (fases <i>R</i> , <i>S</i> e <i>T</i> , e <i>neutro</i> ).....	114
Figura 68	Caso G – Espectros harmônicos, com valores de pico, das correntes de alimentação: (a) Componentes de fase; (b) Componentes simétricas.....	114
Figura 69	Distorções harmônicas totais e fator de desequilíbrio de corrente com a variação do arranjo de filtros com carga equilibrada.....	116
Figura 70	Distorções harmônicas totais e fator de desequilíbrio de corrente com a variação do arranjo de filtros com carga desequilibrada.....	116
Figura 71	Comportamento transitório em diferentes configurações do sistema simulado. (a) Corrente no secundário do transformador; (b) Corrente no neutro do sistema; (c) Corrente na carga; (d) Corrente no filtro eletromagnético.....	120
Figura 72	Sistema montado no ambiente de simulação <i>PSCAD 4.2</i> <sup>®</sup> .....	121
Figura 73	Sistema montado no ambiente de simulação <i>PSIM</i> <sup>®</sup> .....	122
Figura 74	Sistema simulado sem filtros. (a) <i>PSCAD 4.2</i> <sup>®</sup> . (b) <i>PSIM</i> <sup>®</sup> .....	122
Figura 75	Sistema simulado com filtragem harmônica: (a) <i>PSCAD 4.2</i> <sup>®</sup> ; (b) <i>PSIM</i> <sup>®</sup> . ..	123
Figura 76	Diagrama esquemático para estudos experimentais do novo arranjo híbrido de filtros proposto nesta tese.....	126
Figura 77	Diagrama esquemático para estudos experimentais FAP de quatro braços..	127
Figura 78	Bancada de análises experimentais. (a) Vista geral; (b) Bancada com dispositivos eletromagnéticos.....	127
Figura 79	Três variadores de tensão CA ( <i>variacs</i> ) utilizados nos ensaios.....	128
Figura 80	Analisador de sinais <i>Fluke 434</i> .....	129
Figura 81	Medidores. (a) Pinças <i>Fluke i400s</i> ; (b) Sensores <i>LEM 100-P</i> .....	129
Figura 82	Carga não linear trifásica e detalhe dos retificadores.....	130
Figura 83	Componentes da carga não linear. (a) Associador de resistências; (b) Resistências; (c) Capacitores; (d) Módulo retificador.....	130
Figura 84	Diagrama esquemático de ensaio do caso 1, sem filtros.....	133
Figura 85	Caso 1 – Sistema sem filtros: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).....	134
Figura 86	Caso 1 – Sistema sem filtros: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase	

	das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).....	135
Figura 87	Caso 1 – Sistemas sem filtros: (a) Potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase <i>S</i> .....	136
Figura 88	Layout do sistema simulado em <i>PSIM</i> <sup>®</sup> .....	136
Figura 89	Teste de aderência – Caso 1: (a) Resultados experimentais; (b) Resultados simulados.....	137
Figura 90	Diagrama esquemático de ensaio do caso 2, com arranjo híbrido de filtros	137
Figura 91	Caso 2 – SE e FAP de três braços em operação com tensões e cargas equilibradas: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).....	138
Figura 92	Caso 2 – SE e FAP de três braços em operação, tensões e cargas equilibradas: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).....	139
Figura 93	Caso 2 – SE e FAP de três braços em operação com tensões e cargas equilibradas: (a) Energia e potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase <i>S</i> .....	140
Figura 94	Correntes no filtro eletromagnético.....	141
Figura 95	Espectros harmônicos das correntes no filtro eletromagnético: (a) Espectro de fase; (b) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).	142
Figura 96	Teste de aderência – Caso 2: (a) Resultados experimentais; (b) Resultados simulados.....	142
Figura 97	Teste de aderência – Caso 2. (a) Resultados experimentais – correntes pelo filtro eletromagnético; (b) Resultados simulados – correntes pelo filtro eletromagnético.....	143
Figura 98	Diagrama esquemático de ensaio do caso 3, com FAP de quatro braços.....	144
Figura 99	Caso 3 – FAP de quatro braços em operação com tensões e cargas equilibradas: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).....	144
Figura 100	Caso 3 – FAP de quatro braços em operação com tensões e cargas equilibradas: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).....	145

Figura 101	Caso 3 – FAP de quatro braços em operação com tensões e cargas equilibradas: (a) Potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase <i>S</i> .....	146
Figura 102	Caso 4 – Sem filtros com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).....	147
Figura 103	Caso 4 – Sem filtros com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).....	148
Figura 104	Caso 4 – Sem filtros com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase <i>S</i> .....	149
Figura 105	Caso 5 – SE e FAP de três braços em operação com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).....	149
Figura 106	Caso 5 – SE e FAP de três braços em operação com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).....	150
Figura 107	Caso 5 – SE e FAP de três braços em operação com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase <i>S</i> .....	151
Figura 108	Correntes no filtro eletromagnético.....	152
Figura 109	Espectros harmônicos das correntes no filtro eletromagnético: (a) Espectro de fase; (b) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).	153
Figura 110	Caso 6 – FAP de quatro braços em operação com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).....	154
Figura 111	Caso 6 – FAP de quatro braços em operação com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).....	154
Figura 112	Caso 6 – FAP de quatro braços em operação com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase <i>S</i> .....	155
Figura 113	Diagrama esquemático de ensaio do caso 7, sem filtros.....	156

Figura 114	Caso 7 – Sem filtros com tensões desequilibradas e cargas equilibradas: a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).....	157
Figura 115	Caso 7 – Sem filtros com tensões desequilibradas e cargas equilibradas: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).....	157
Figura 116	Caso 7 – FAP de quatro braços em operação com tensões desequilibradas e cargas equilibradas: (a) Potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase S.....	158
Figura 117	Diagrama esquemático de ensaio do caso 8, com arranjo híbrido de filtros	159
Figura 118	Caso 8 – SE e FAP de três braços em operação com tensões desequilibradas e cargas equilibradas: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico)	160
Figura 119	Caso 8 – SE e FAP de três braços em operação com tensões desequilibradas e cargas equilibradas: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).....	160
Figura 120	Caso 8 – SE e FAP de três braços em operação com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase S.....	161
Figura 121	Correntes no filtro eletromagnético.....	162
Figura 122	Espectros harmônicos das correntes no filtro eletromagnético: (a) Espectro de fase; (b) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).	163
Figura 123	Diagrama esquemático de ensaio do caso 9, com FAP de quatro braços....	164
Figura 124	Caso 9 – FAP de quatro braços em operação com tensões desequilibradas e cargas equilibradas: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).....	164
Figura 125	Caso 9 – FAP de quatro braços em operação com tensões desequilibradas e cargas equilibradas: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).....	165
Figura 126	Caso 9 – FAP de quatro braços em operação com tensões desequilibradas e cargas equilibradas: (a) Potências na fonte; (b) Tensão	

	e corrente na fase $S$ .....	166
Figura 127	Dimensões das lâminas E-I do filtro eletromagnético.....	182
Figura 128	Dimensões das lâminas E-I do bloqueador eletromagnético.....	184
Figura 129	Caso 1: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 85(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 85(c); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 86(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 86(c).....	187
Figura 130	Caos 2: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 91(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 91(c); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 92(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 92(c).....	188
Figura 131	Caso 3: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 99(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 99(d); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 100(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 100(c).....	189
Figura 132	Caso 4: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 102(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 102(c); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 103(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 103(c).....	190
Figura 133	Caso 5: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 105(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 105(c); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 106(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 106(c).....	191
Figura 134	Caso 6: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 110(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 110(c); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 111(b); (d) Tabela correspondente ao	



	espectro das correntes sequenciais da figura 111(c).....	192
Figura 135	Caso 7: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 114(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 114(c); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 114(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 114(c).....	193
Figura 136	Caso 8: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 118(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 118(b); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 119(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 119(c).....	194
Figura 137	Caso 9: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 124(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 124(c); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 125(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 125(c).....	195



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Distribuição sequencial de correntes harmônicas.....	37
Tabela 2	Valores das distorções harmônicas nos pontos de entrega até a 25ª ordem, expressas em percentagem da tensão nominal.....	39
Tabela 3	Limite de distorção de tensão em sistemas de distribuição.....	40
Tabela 4	Limites de distorção de corrente em sistemas de distribuição.....	40
Tabela 5	Valores de referência global das distorções harmônicas totais (% da tensão fundamental).....	40
Tabela 6	Níveis de referência para Distorção Harmônica Individual de Tensão (% da tensão fundamental).....	41
Tabela 7	Características construtivas e elétricas do protótipo do filtro eletromagnético.....	88
Tabela 8	Características construtivas e elétricas do protótipo do bloqueador.....	91
Tabela 9	Dados do sistema simulado.....	105
Tabela 10	Resultados para diferentes combinações do arranjo híbrido de filtros.....	115
Tabela 11	Condições de simulação.....	117
Tabela 12	Especificações técnicas do <i>Fluke 434</i> .....	129
Tabela 13	Dados nominais da carga não linear.....	130
Tabela 14	Dados nominais do filtro eletromagnético.....	131
Tabela 15	Dados nominais do bloqueador eletromagnético.....	131
Tabela 16	Parâmetros do filtro ativo paralelo.....	131
Tabela 17	Ensaio experimentais selecionados.....	132
Tabela 18	Comparativo entre os casos 1 e 2.....	140
Tabela 29	Distribuição sequencial das harmônicas pelo filtro eletromagnético (valores de pico).....	141
Tabela 20	Valores RMS por fase das correntes no filtro eletromagnético.....	141
Tabela 21	Comparativo entre os casos 1, 2 e 3.....	146
Tabela 22	Dados da carga não linear.....	147
Tabela 23	Comparativo entre os casos 4 e 5.....	152
Tabela 24	Distribuição sequencial das harmônicas pelo filtro eletromagnético (valores de pico).....	152

Tabela 25	Valores RMS por fase das correntes no filtro eletromagnético.....	153
Tabela 26	Comparativo entre os casos 4, 5 e 6.....	156
Tabela 27	Comparativo entre os casos 7e 8.....	162
Tabela 28	Distribuição sequencial das harmônicas pelo filtro eletromagnético (valores de pico).....	162
Tabela 29	Valores RMS por fase das correntes no filtro eletromagnético.....	163
Tabela 30	Comparativo entre os casos 7, 8 e 9.....	166
Tabela 31	Valor total das correntes de compensação de FAPs de três e quatro braços.....	167
Tabela 32	Quadro comparativo de desempenho e custo.....	167
Tabela 33	Dados de projeto do filtro eletromagnético.....	181
Tabela 34	Dados de projeto do bloqueador eletromagnético.....	182

## LISTA DE SÍMBOLOS

$h$	Ordem da componente harmônicas
$I_+, I_-, I_0$	Correntes de seqüências positiva, negativa e zero
$I_{cc}$	Corrente de curto-circuito
$I_1$	Valor eficaz de corrente fundamental
$I_h$	Correntes harmônicas
$V_n$	Tensão nominal
$f$	Frequência
$I_R, I_S, I_T$	Correntes nas fases $R, S$ e $T$
$V_R, V_S, V_T$	Tensões nas fases $R, S$ e $T$
$V_{P_i}$	Tensão na bobina principal da fase $i$ do filtro eletromagnético
$V_{A_i}$	Tensão na bobina auxiliar da fase $i$ do filtro eletromagnético
N	Neutro
$L_{ij}$	Indutância entre fases do filtro eletromagnético
$L_{P_i}$	Indutância própria do enrolamento principal da fase $i$ do filtro eletromagnético
$L_{A_i}$	Indutância própria do enrolamento auxiliar da fase $i$ do filtro eletromagnético
$V_+, V_-, V_0$	Tensões de seqüências positiva, negativa e zero
$L_j$	Indutâncias próprias idênticas do filtro eletromagnético
$M_f$	Indutâncias mútuas entre bobinas de uma mesma coluna idêntica do filtro.
$M_{adj}$	Indutâncias mútuas entre bobinas principais e auxiliares de colunas distintas e adjacentes do filtro.
$M_{ext}$	Indutâncias mútuas entre bobinas principais e auxiliares de colunas distintas e externas do filtro.
$L_{P_f}$	Indutância do enrolamento principal do filtro.
$L_{A_f}$	Indutância do enrolamento auxiliar do filtro.
$\lambda$	Fator de acoplamento entre bobinas.
$\omega$	Frequência fundamental.
$\varphi$	Defasamento angular.
$L_b$	Indutâncias próprias do bloqueador
$M_b$	Indutâncias mútuas entre as bobinas de diferentes fases do bloqueador

$L_{b_i}$	Indutância própria do bloqueador da fase $i$
$X_s$	Reatância da fonte
$L$	Indutância
$V_s$	Tensão na fonte
$V_h$	Tensão harmônica
$V_1$	Tensão na frequência fundamental
$V_t$	Tensão terminal
$V_{ond}$	Tensão ondulatória
$1\varphi$	Monofásico
$3\varphi$	Trifásico
$I_S$	Corrente do sistema
$L_S$	Indutância do sistema
$L_F$	Indutância de saída do filtro ativo paralelo
$v_\alpha, v_\beta, v_0$	Tensões no eixo $\alpha$ - $\beta$ -0
$i_\alpha, i_\beta, i_0$	Corrente no eixo $\alpha$ - $\beta$ -0
$p$	Potência instantânea
$\bar{p}$	Valor médio da potência real instantânea
$\tilde{p}$	Valor alternado da potência real instantânea
$q$	Potência imaginária instantânea
$\bar{q}$	Valor médio da potência imaginária instantânea
$\tilde{q}$	Valor oscilatório da potência imaginária instantânea
$\bar{p}_0$	Valor médio da potência instantânea de sequência zero
$\tilde{p}_0$	Valor oscilatório da potência instantânea de sequência zero
$Z_{SZ_f}$	Impedância de sequência zero do filtro paralelo
$Z_{SZ_b}$	Impedância de sequência zero do bloqueador em série
$Z_{SZ_s}$	Impedância de sequência zero do sistema de suprimento
$I_{SZ_s}$	Corrente de sequência zero do sistema
$Z_b$	Impedância do bloqueador
$\lambda_f$	Fator de acoplamento do filtro eletromagnético
$\lambda_b$	Fator de acoplamento do bloqueador
$\xi_f$	Fator de conformidade do filtro eletromagnético

$\xi_b$	Fator de conformidade do bloqueador
$J_{SZ\_NL}$	Corrente de sequência zero gerada pela carga não linear
$I_{SZ\_F}$	Corrente de sequência zero através do filtro paralelo





## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	35
1.1	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	35
1.2	DISTORÇÕES HARMÔNICAS	36
1.3	DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE SEQUÊNCIA ZERO	37
1.4	LEGISLAÇÕES E NORMAS SOBRE HARMÔNICAS	38
1.5	SOLUÇÕES PARA ELIMINAÇÃO E/OU REDUÇÃO DE HARMÔNICAS	42
1.6	PROPOSTA DA TESE	44
1.7	ORGANIZAÇÃO DA TESE	46
<b>2</b>	<b>SUPRESSOR ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA ZERO</b>	49
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	49
2.2	FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA ZERO	49
2.2.1	<i>MODELAGEM MATEMÁTICA – FILTRO ELETROMAGNÉTICO COM NÚCLEO DE TRÊS COLUNAS</i>	51
2.2.2	<i>SIMPLIFICAÇÕES DO MODELO DO FILTRO ELETROMAGNÉTICO</i>	53
2.3	BLOQUEADOR ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA ZERO	55
2.3.1	<i>MODELAGEM MATEMÁTICA – ARRANJO ELETROMAGNÉTICO</i>	56
2.3.2	<i>SIMPLIFICAÇÕES DO MODELO DO BLOQUEADOR ELETROMAGNÉTICO</i>	57
2.4	SUPRESSOR ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA ZERO	60
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
<b>3</b>	<b>FILTROS ATIVOS DE POTÊNCIA</b>	63
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	63
3.2	FILTROS ATIVOS DE POTÊNCIA – PRINCÍPIOS BÁSICOS	63
3.3	CLASSIFICAÇÃO DOS FILTROS ATIVOS DE POTÊNCIA	65
3.4	TIPOS DE INVERSORES	66
3.5	FILTRO ATIVO PARALELO	67
3.6	CONEXÕES DO FAP COM O SISTEMA ELÉTRICO	68
3.7	ESTRATÉGIA DE CONTROLE – TEORIA P-Q	71
3.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	

<b>4</b>	<b>MODELAGEM PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DO ARRANJO HÍBRIDO DE FILTROS</b>	<b>77</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	77
4.2	ARRANJO HÍBRIDO DE FILTRAGEM HARMÔNICA	78
4.3	FUNDAMENTAÇÃO FÍSICA DA COMPENSAÇÃO HARMÔNICA	82
4.3.1	<i>FILTROS PASSIVOS</i>	82
4.3.2	<i>FILTRO ATIVO PARALELO</i>	84
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
<b>5</b>	<b>DIMENSIONAMENTO, ANÁLISE FUNCIONAL DOS DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS E APRESENTAÇÃO DO PROTÓTIPO DO FILTRO ATIVO PARALELO</b>	<b>87</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	87
5.2	CONCEPÇÃO FÍSICA DO SUPRESSOR ELETROMAGNÉTICO – DIMENSIONAMENTO E PROJETO	87
5.2.1	<i>FILTRO ELETROMAGNÉTICO</i>	88
5.2.2	<i>BLOQUEADOR ELETROMAGNÉTICO</i>	90
5.3	ENSAIO DAS CARACTERÍSTICAS DOS DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS	92
5.3.1	<i>MATERIAIS E EQUIPAMENTOS</i>	92
5.3.2	<i>FILTRO ELETROMAGNÉTICO</i>	94
5.3.3	<i>BLOQUEADOR ELETROMAGNÉTICO</i>	96
5.4	PROTÓTIPO DO FILTRO ATIVO PARALELO	98
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
<b>6</b>	<b>VALIDAÇÃO POR SIMULAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO DE FILTRAGEM</b>	<b>103</b>
6.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	103
6.2	VALIDAÇÃO POR SIMULAÇÃO	103
6.2.1	<i>RESULTADOS DE SIMULAÇÕES EM REGIME PERMANENTE</i>	105
6.2.2	<i>RESULTADOS DE SIMULAÇÃO EM REGIME TRANSITÓRIO</i>	117
6.3	ARRANJO HÍBRIDO DE FILTROS <i>VERSUS</i> FILTRO ATIVO DE QUATRO BRAÇOS	121
6.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	123

<b>7</b>	<b>ANÁLISES EXPERIMENTAIS DA FUNCIONALIDADE DO ARRANJO HÍBRIDO DE FILTROS</b>	<b>125</b>
7.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	125
7.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	125
7.2.1	<i>VARIADOR DE TENSÃO</i>	128
7.2.2	<i>MEDIÇÃO E PROCESSAMENTO DE SINAIS</i>	128
7.2.3	<i>CARGA NÃO LINEAR</i>	130
7.2.4	<i>FILTRO ELETROMAGNÉTICO</i>	131
7.2.5	<i>BLOQUEADOR ELETROMAGNÉTICO</i>	131
7.2.6	<i>FILTRO ATIVO PARALELO</i>	131
7.3	ANÁLISES EXPERIMENTAIS DAS FUNCIONALIDADES DO ARRANJO HÍBRIDO DE FILTROS	132
7.4	COMPARAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA ENTRE O ARRANJO HÍBRIDO DE FILTROS E UM FILTRO ATIVO DE QUATRO BRAÇOS	166
7.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	168
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>171</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>177</b>
	<b>APÊNDICE A - PROJETOS DOS DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS</b>	<b>181</b>
	<b>APÊNDICE B - TABELAS CORRESPONDENTES AOS CASOS ENSAIADOS NO CAPÍTULO 7</b>	<b>187</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A qualidade da energia elétrica tem se firmado ao longo dos últimos anos como objeto de interesse de consumidores e empresas distribuidoras que prestam serviços de eletricidade. Antes, essa qualidade era restringida simplesmente à continuidade do fornecimento, ou seja, tensões e frequências operando dentro dos limites aceitáveis e energia sem interrupções.

Atualmente, com o acelerado desenvolvimento da eletrônica de potência o termo “Qualidade da Energia Elétrica” alcançou uma definição mais ampla e agora está relacionado a uma série de fatores que podem prejudicar e/ou comprometer o serviço de suprimento de eletricidade. A constante alteração da natureza das cargas consumidoras, a proliferação da cogeração, a crescente preocupação com questões ambientais relacionadas à questão da geração e a desregulamentação quanto a normas para emissão de “energia limpa” são algumas das muitas transformações que estão gerando impacto no setor elétrico. Nesse novo cenário, desvios que possam ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica caracterizam uma rede elétrica com qualidade de suprimento comprometida (DUGAN et al., 2003).

Na busca pela competitividade no mercado globalizado, muitos segmentos industriais estão empregando equipamentos tecnologicamente mais avançados em suas linhas de produção. Nesse âmbito, grande parte das cargas elétricas atuais é composta por dispositivos não lineares, como diodos, tiristores, transistores, etc. Esses dispositivos estão associados ao uso da energia elétrica de modo mais eficiente e otimizam processos de controle. No entanto, decorrente da não linearidade, esses dispositivos são, por muitas vezes, a causa de prejuízos econômicos e de problemas relacionados à qualidade da energia elétrica.

De um modo geral, a utilização progressiva desses dispositivos é justificada, pois os benefícios decorrentes do seu uso são muito mais visíveis do que os efeitos prejudiciais causados pelos mesmos. Não obstante a esse fato, a proliferação de equipamentos eletrônicos que operam como cargas não lineares provocando distorções harmônicas nas correntes e tensões dos sistemas elétricos tem sido relevantes no setor elétrico mundial (RAVAGNANI, 2008).

Sob essas perspectivas, de forma crescente, as correntes harmônicas geradas por consumidores predominantemente domésticos estão sendo somadas às emitidas por complexos industriais e consumidores do setor de serviços. Esse fato tem contribuído sistematicamente para a perda de qualidade da energia elétrica disponibilizada, resultando em

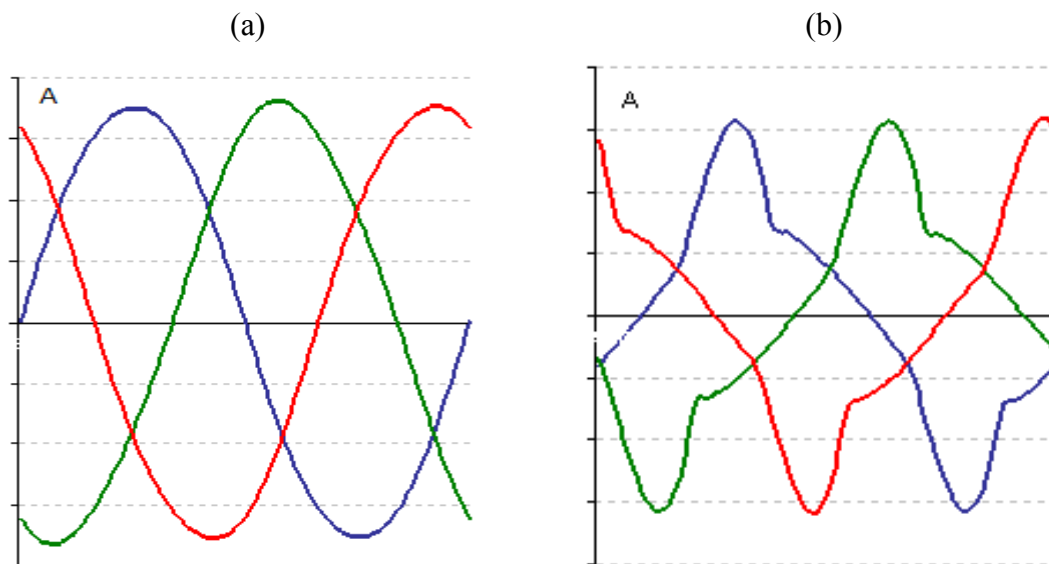
graves consequências para consumidores e empresas do setor de distribuição da energia elétrica.

## 1.2 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Dentre os diversos distúrbios que comprometem o bom funcionamento dos sistemas de energia elétrica, as distorções harmônicas ganham uma posição de destaque uma vez que se caracterizam por fenômenos permanentes na rede, ao contrário dos demais que podem ocorrer de forma esporádica. As distorções harmônicas são uma espécie de “energia poluída” e estão diretamente relacionadas ao emprego elevado de cargas não lineares.

As harmônicas, especialmente as correntes harmônicas, geradas por todas as cargas chamadas não lineares, apresentam como resposta a um sinal elétrico de frequência fixa (tensão senoidal) uma resposta diferente do sinal de alimentação (FIGUEREDO, 1986). A seguir, apresenta-se o exemplo de formas de onda trifásicas com distorções harmônicas, figura 1.

Figura 1 – Comparativo entre formas de onda trifásicas: (a) Formas de onda senoidais e periódicas; (b) Formas de onda periódicas submetidas a distorções harmônicas.



Fonte: Dados da autora.

Para os casos de sistemas elétricos que apresentam desequilíbrios de tensões e correntes, o método das componentes simétricas se apresenta como uma ferramenta muito atrativa. A metodologia das componentes simétricas consiste na decomposição dos elementos de tensão ou corrente das fases, em parcelas iguais, mas com ângulos diferentes, sendo extensivamente útil em estudos de desempenho de sistemas de potência. Tratando-se de

sistemas elétricos trifásicos equilibrados, decompondo-se uma forma de onda de tensão ou corrente distorcida, as ordens harmônicas advindas dessa decomposição, em termos de componentes simétricas de sequências de fase positiva, negativa e zero, são as apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição sequencial de correntes harmônicas.

<i>Seq.</i>	<i>Fund.</i>	<i>2h</i>	<i>3h</i>	<i>4h</i>	<i>5h</i>	<i>6h</i>	<i>7h</i>	<i>8h</i>	<i>9h</i>
<i>I<sub>+</sub></i>	✓			✓			✓		
<i>I<sub>-</sub></i>		✓			✓			✓	
<i>I<sub>0</sub></i>			✓			✓			✓

Fonte: Dados da autora.

Conhecer a sequência de fases de cada ordem harmônica é fundamental em decorrência ao fato de que os princípios de funcionamento dos equipamentos de atenuação harmônica estão baseados nas propriedades apresentadas na tabela 1.

### 1.3 DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE SEQUÊNCIA ZERO

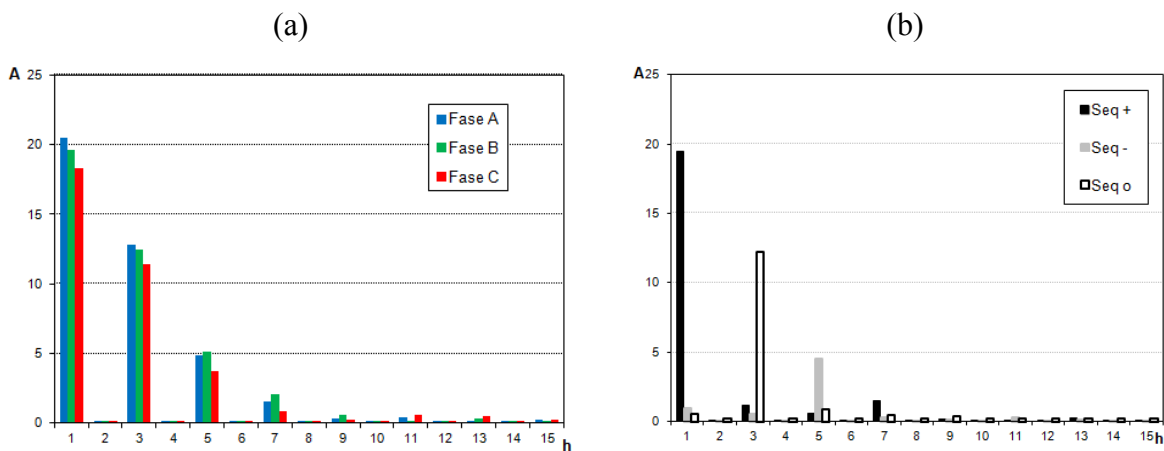
Visando o interesse desta tese, nesta seção o foco é essencialmente direcionado à presença das denominadas harmônicas de ordem três ou “*triplens*”, em outras palavras, aquelas que são múltiplas da terceira harmônica ( $h = 3^a, 9^a, 15^a, 21^a, \dots$ ). Em sistemas trifásicos a quatro fios, com cargas não lineares equilibradas, essas frequências se manifestam na forma de componentes de sequência zero exigindo, para sua presença no sistema elétrico, a existência de conexões em estrela aterrada para o suprimento e para a carga e, quando isso ocorre surge um grande carregamento para o neutro do sistema trifásico (VENDRAMINI, 2006). Essas correntes harmônicas no condutor neutro podem atingir, algumas vezes, níveis superiores aos registrados para a componente fundamental (OLIVEIRA; RAVAGNANI; MILANES, 2007a). Nesse contexto, alguns problemas além do carregamento do neutro são comumente ocasionados, destacando-se o superaquecimento de transformadores de distribuição, redução do fator de potência e interferência em sistemas de comunicação (BELCHIOR et al., 2006).

Componentes de sequência zero podem também ser notadas em instalações trifásicas em que a rede e/ou carga se apresentam desequilibradas. Nessa situação, além das denominadas “*triplens*”, é possível perceber que as demais frequências podem ainda produzir componentes de sequência com as características da sequência zero, aqui consideradas. Para

possibilitar análises reais dos níveis das distorções harmônicas é prática comum a instalação de analisadores de energia elétrica, fixados em baixa e média tensão.

A análise e quantificação numérica harmônica das correntes medidas é habitualmente realizada por meio da decomposição do sinal pela Transformada Discreta de Fourier (IEEE SA 519-1992). A figura 2 ilustra dois tipos de espectros para representação dos níveis de distorções harmônicas individuais, sendo eles de componentes de fase e de componentes sequenciais.

Figura 2 – Espectros harmônicos: (a) Componentes de fase; (b) Componentes sequenciais.



Fonte: Dados da autora.

#### 1.4 LEGISLAÇÕES E NORMAS SOBRE HARMÔNICAS

As distorções nas grandezas do sistema elétrico provocadas pela presença de harmônicas têm crescido acentuadamente pelas razões previamente apontadas.

Notadamente, os principais efeitos nocivos das harmônicas em equipamentos e componentes dos sistemas elétricos são (IEEE TASK FORCE, 1993):

- Avarias, falhas e mau funcionamento de aparelhos mais sensíveis ligados à rede, nomeadamente computadores, sistemas de controle comandados por microcontroladores, etc;
- Aumento nas perdas nos condutores;
- Disparos intempestivos de alguns dispositivos de corte e proteção;
- Erros nos aparelhos de medida de energia elétrica e nos instrumentos de medição;
- Vibrações mecânicas nas máquinas elétricas;
- Aumento das perdas, saturação, ressonâncias, vibrações nos enrolamentos e redução da vida útil dos transformadores;



- Aquecimento, ruído audível, fadiga mecânica e consequente redução da vida útil das máquinas elétricas rotativas e acessórios mecânicos a elas acoplados;
- Redução da vida útil das lâmpadas e flutuação da intensidade luminosa (*flicker*) no caso da ocorrência de inter-harmônicas;
- Disparo indevido dos semicondutores de potência em retificadores controlados e reguladores de tensão;
- Interferência eletromagnética com equipamentos de comunicações.

No quesito “Normas de Qualidade da Energia Elétrica”, a Europa é o continente mais avançado. A norma EN 50160 foi adotada por vários países do continente (EUROPEAN STANDARD EN 50160, 1999). Segundo tal norma, os valores de referência para as distorções harmônicas totais de tensão, incluindo as harmônicas até a ordem 40, devem ser iguais ou inferiores a 8%.

Devem ser obedecidos também os demais valores das distorções harmônicas individuais de tensão indicadas na tabela 2 (EUROPEAN STANDARD EN 50160, 1999).

Tabela 2 – Valores das distorções harmônicas nos pontos de entrega até a 25ª ordem, expressas em percentagem da tensão nominal.

<b>Harmônicas Ímpares</b>				<b>Harmônicas Pares</b>	
<b>Não múltiplas de 3</b>		<b>Múltiplas de 3</b>			
Ordem harmônica	Tensão relativa (%)	Ordem harmônica	Tensão relativa (%)	Ordem harmônica	Tensão relativa (%)
5	6,0	3	5	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25					

*Nota:* Não são indicados valores para harmônicas de ordem superior a 25, por serem em geral de pequena amplitude, mas muito imprevisíveis devido a efeitos de ressonância.

Fonte: European Standart EN 50160 (1999).

Nos Estados Unidos da América, diversas concessionárias têm usado a norma IEEE SA 519-1992, no entanto, apenas como um referencial. Segundo essa norma, as medições da distorção harmônica total de tensão e corrente devem ser feitas no ponto de acoplamento

comum (PAC) do sistema elétrico. Logo, não importa o que ocorre dentro de uma instalação, nem seu tipo de carga, mas sim como a operação da mesma influencia o exterior, ou seja, os outros consumidores conectados à mesma rede de alimentação.

As tabelas 3 e 4 apresentam os limites de distorção total de tensão (DTT) e distorção total de corrente (DTC), respectivamente, para sistemas de distribuição.

Tabela 3 – Limite de distorção de tensão em sistemas de distribuição.

Tensão nominal no barramento	DTC (%)	DTT (%)
$\geq 69\text{kV}$	3	5

Fonte: IEEE SA 519-1992 (1993).

Tabela 4 – Limites de distorção de corrente em sistemas de distribuição.

Máxima corrente harmônica em percentual da corrente de carga						
Harmônicas ímpares:						
$I_{cc}/I_1$	$< 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 < h$	DTC (%)
$< 20$	4	2	1,5	0,6	0,3	5
$20 < 50$	7	3,5	2,5	1	0,5	8
$50 < 100$	10	4,5	4	1,5	0,7	12
$100 < 1000$	12	5,5	5	2	1	15
$> 1000$	15	7	6	2,5	1,4	20

Legenda:  $I_1$  – máxima corrente de carga (componente de frequência fundamental)

$I_{cc}$  – máxima corrente de curto-circuito no PAC

Fonte: IEEE SA 519-1992 (1993).

No âmbito nacional, as ações encaminhadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) por meio do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) fixaram limites operacionais aceitáveis para as distorções harmônicas (PRODIST, 2008). Os limites fixados para distorções harmônicas totais e individuais de diferentes níveis de tensão são apresentados nas tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5 – Valores de referência global das distorções harmônicas totais (% da tensão fundamental).

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (%)
$V_n \leq 1\text{kV}$	10
$1\text{kV} < V_n \leq 13,8\text{kV}$	8
$13,8\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	6
$69\text{kV} < V_n \leq 230\text{kV}$	3

Fonte: PRODIST (2008).

Tabela 6 – Níveis de referência para Distorção Harmônica Individual de Tensão (% da tensão fundamental).

harmônicas	Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)				
	h	$V_n \leq 1\text{kV}$	$1\text{kV} < V_n \leq 13,8\text{kV}$	$13,8\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} < V_n \leq 230\text{kV}$
<i>Ímpares não múltiplas de 3</i>	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
<i>ímpares múltiplas de 3</i>	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
<i>pares</i>	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: PRODIST (2008).

O monitoramento dos sinais por meio de sistemas de medição estabelecidos em tecnologia com microprocessadores é indispensável para a avaliação dos níveis de distorção harmônica. As medições de distorções harmônicas em sistemas elétricos trifásicos devem ser feitas no esquema fase-neutro para sistema estrela aterrado e fase-fase para as demais configurações.

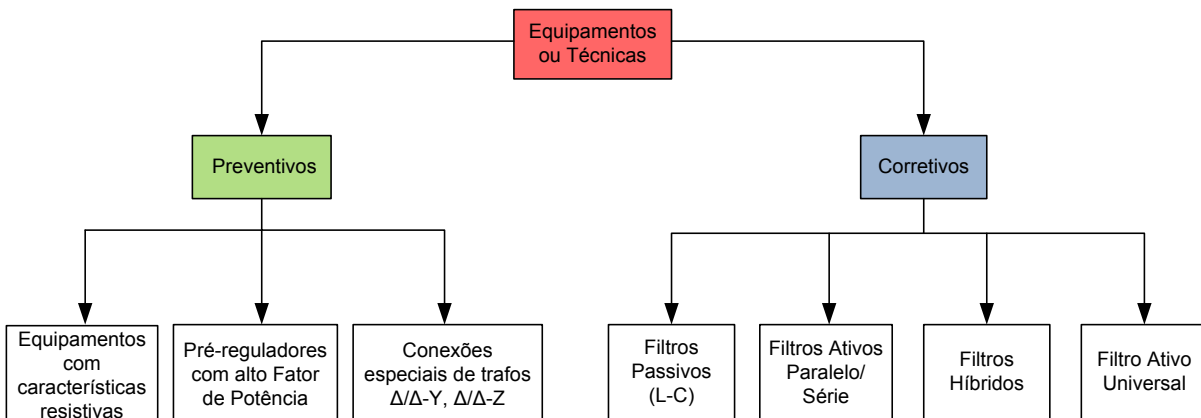
Apesar do aspecto de desregulamentação no que se refere à aplicação de normas que estabelecem limites para emissão de conteúdo harmônico em redes elétricas, prevê-se que essa situação não se prolongue por muito tempo mais. Tendo em vista ordenar e controlar o desenvolvimento constante do sistema elétrico, é provável que contratos com cláusulas de qualidade de energia venham a se tornar comuns no futuro.

## 1.5 SOLUÇÕES PARA ELIMINAÇÃO E/OU REDUÇÃO DE HARMÔNICAS

Com vistas à mitigação das distorções harmônicas, sempre que possível, são adotadas medidas operacionais normalmente relacionadas à adequação das cargas geradoras de harmônicas fazendo-se uso de tecnologias menos poluentes, multiplicação do número de pulsos em instalações conversoras de grande porte, alteração da topologia das redes elétricas, entre outras (RAVAGNANI, 2008). Ocorre, no entanto, que em diversas vezes tais medidas são inviáveis sob o ponto de vista econômico ou mesmo insuficientes para garantir o funcionamento adequado do sistema e/ou atender os limites estabelecidos pelas normas e recomendações técnicas. Nesses casos, torna-se indispensável o uso de equipamentos especiais para atenuação da distorção harmônica (BELCHIOR et al., 2006).

Soluções envolvendo filtros de potência passivos, ativos ou híbridos, são empregadas com o intuito de reduzir ou mesmo eliminar os problemas causados pelas correntes harmônicas conforme apresentado em (AFONSO et al., 2000a; RAVAGNANI, 2008; FREITAS, 2011). A figura 3 ilustra uma possível maneira de classificar técnicas ou equipamentos, utilizados na atenuação ou eliminação dos problemas relacionados à qualidade da energia elétrica.

Figura 3 – Técnicas e equipamentos utilizados na atenuação/eliminação de problemas relacionados à QEE.



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2003).

A solução preventiva destina-se às novas instalações ou à substituição de equipamentos já instalados. Baseia-se na utilização de equipamentos não geradores e não consumidores de correntes harmônicas e de energia reativa.

Já a solução corretiva é uma técnica que possibilita a atenuação ou eliminação dos distúrbios presentes no sistema elétrico sem exigir a troca dos equipamentos nele presentes.

Na categoria de filtros passivos, é possível identificar duas principais vertentes, os filtros ressonantes e os filtros eletromagnéticos.

Os filtros passivos ressonantes são constituídos por elementos resistivos, indutivos e capacitivos, convenientemente conectados e especificados para oferecer baixas ou altas impedâncias à circulação de uma ou mais frequências harmônicas. Entre as principais vantagens da sua aplicação, destacam-se a robustez, a alta confiabilidade operacional, a insensibilidade a surtos, a operação silenciosa e o baixo custo. Por outro lado, apresentam como desvantagens, o peso e o volume, além de interferirem no desempenho global do sistema devido à possibilidade de aparecimento de ressonâncias indesejáveis com outros componentes da rede (OLIVEIRA; RAVAGNANI; MILANES, 2007a). Ainda no contexto das tecnologias passivas, destacam-se os dispositivos eletromagnéticos. Esses equipamentos se baseiam exclusivamente no uso de arranjos eletromagnéticos e, portanto, dispensam o emprego de capacitores evitando-se assim a possibilidade de aparecimento de ressonâncias indesejáveis. Podem ser magneticamente configurados para apresentarem altas ou baixas impedâncias de sequência zero e, nessas condições, podem, então, ser utilizados como filtros ou bloqueadores para todas as componentes harmônicas homopolares (OLIVEIRA et al., 2009; FREITAS et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2010).

Os dispositivos eletromagnéticos voltados à mitigação de harmônicas de sequência zero apresentam como principais vantagens em relação aos filtros ressonantes a confiabilidade operacional, a não interferência na resposta em frequência da rede elétrica e a atuação sobre todo o espectro harmônico concentrado em sequência zero e não apenas àquelas harmônicas previamente sintonizadas. Tratando-se também de uma alternativa de baixo custo de implantação, sua utilização combinada com outros sistemas de filtragem harmônica pode ser uma alternativa atraente na tentativa de contornar algumas deficiências do uso das tecnologias passivas baseadas apenas no uso de filtros ressonantes (OLIVEIRA et al., 2010).

Fundamentados na eletrônica de potência, os filtros ativos têm o seu princípio de funcionamento baseado no cancelamento de componentes harmônicas por meio da geração de componentes de mesmas amplitudes e frequências, mas, com ângulos de fases opostos àqueles produzidos pela carga não linear (PENG; ADAMS, 2001). Baseado, pois, nesse princípio operacional, são dispositivos inerentemente adaptativos (AFONSO et al., 2000a; AFONSO; SILVA; MARTINS, 2001).

É reconhecido que os filtros harmônicos ativos têm inúmeras vantagens operacionais sobre os demais. Possuem, em geral, características que permitem não só reduzir o conteúdo harmônico, mas também incorporar funções adicionais de controle para compensação da

energia reativa e desbalanceamento de correntes. O princípio de funcionamento fundamentado na síntese de formas de ondas por meio do controle de chaves eletrônicas viabilizam sua ação mitigadora sobre uma larga faixa do espectro harmônico, atenuando inclusive outras componentes inter-harmônicas, que são múltiplas não inteiras da frequência fundamental. Além disso, não provocam ressonâncias nocivas ao sistema de distribuição e, conseqüentemente, não causam amplificações de harmônicas. O desempenho global do filtro ativo costuma ser independente das características operacionais do sistema de suprimento sendo, portanto, praticamente imune às alterações no carregamento e/ou reconfiguração das redes elétricas.

Como desvantagens da operação de filtros harmônicos ativos, podem ser citadas a necessidade de chaveamentos rápidos para altos valores de corrente e ruídos de alta frequência. Esses chaveamentos e ruídos acarretam por muitas vezes o surgimento de interferências eletromagnéticas. Pode-se ainda citar seu custo, limites tecnológicos para altas potências e complexidade operacional. No cenário atual e, particularmente em aplicações direcionadas para redes de distribuição de energia elétrica, seu uso é restrito a casos específicos, sobretudo por razões de natureza econômica.

Os filtros híbridos, derivados de uma combinação de filtros ativos e passivos, são uma opção a mais no quesito de soluções corretivas. Apesar dos filtros ativos apresentarem algumas vantagens em relação aos passivos, esses também apresentam desvantagens que podem ser superadas com o uso conjunto dos mesmos, pois ao serem combinados, apresentam melhores características do que aquelas que apresentariam individualmente (LINDEKE, 2003). Nesse contexto, um trabalho que contempla a operação conjunta de dispositivos ativos e passivos, notadamente um filtro ativo de três braços e um transformador de conexão zig-zag (JOU et al., 2008) em um sistema com baixo nível de curto-circuito, revelou resultados animadores. Esse fato motivou o aprofundamento das investigações desta pesquisa no sentido de obter, por meio da combinação de filtros ativos e dispositivos eletromagnéticos, um novo e vantajoso arranjo híbrido de filtragem harmônica capaz de atuar em sistemas tanto de baixo quanto de alto nível de curto circuito.

## 1.6 PROPOSTA DA TESE

A proposta desta tese consiste na utilização de um novo arranjo híbrido de compensação baseado na ação combinada de um filtro ativo de potência do tipo paralelo e de estruturas eletromagnéticas para compensação de distorções harmônicas.

Os filtros ativos paralelos mais usuais são equipamentos baseados no uso de um inversor de fonte de tensão com controle de corrente com capacitor no lado de corrente contínua, de forma a atuar como uma fonte de corrente. As topologias utilizadas podem conter três ou quatro braços compostos por seis ou oito chaves eletrônicas, respectivamente.

Os sistemas trifásicos alimentando cargas equilibradas e que não apresentam correntes harmônicas múltiplas de três, não requerem compensação das potências de sequência zero. Nestas condições um inversor mais simples com apenas três braços é suficiente para prover as correntes compensatórias de um filtro ativo de forma a garantir a correção das distorções harmônicas das correntes de alimentação, desequilíbrios e fator de potência. Esta solução requer apenas quatro sensores de corrente e possui um sistema de controle mais simples (AFONSO et al., 2000a; AFONSO; SILVA; MARTINS, 2001).

A topologia de um filtro ativo paralelo com quatro braços é aplicada em sistemas trifásicos com fio neutro e, pode ser utilizada para compensar harmônicas, corrigir o fator de potência, além de prover o balanceamento das correntes de carga, mesmo com carregamentos monofásicos. Entretanto esta solução, além de requerer o uso de oito chaves eletrônicas, ainda necessita de seis sensores de corrente e quatro sensores de tensão para suprir a base de dados necessária para um sistema de controle também mais complexo que do caso anterior.

Considerando-se, pois, a expectativa de aplicação de estruturas compensadoras em sistemas elétricos a quatro fios com carregamentos monofásicos, pretende-se utilizar um filtro ativo de menor custo, ou seja, a topologia com três braços contendo, portanto, apenas seis chaves eletrônicas. Esta simplificação topológica implica também na utilização de um número menor de sensores de corrente e tensão, bem como na facilitação dos procedimentos de controle. Entretanto, frente a um carregamento monofásico com cargas lineares ou não lineares a compensação das componentes de sequência zero não pode ser realizada. Nestas condições pretende-se realizar a compensação das componentes homopolares através de estruturas eletromagnéticas.

O supressor de sequência zero, compostos por um filtro e um bloqueador, ambos eletromagnéticos, são estruturas passivas simples, robustas e confiáveis, com conhecimento tecnológico dominado e com custos bem definidos. Considerando-se o mesmo nível de potência a ser processado, presume-se que os custos dos dispositivos eletromagnéticos sejam menores quando comparados aos dispositivos de estado sólido, notadamente as chaves eletrônicas que podem ser eliminadas. Espera-se que esta junção seja ainda mais favorável quando se incorpora os custos associados com os dispositivos relacionados ao processamento de sinais e controle das chaves eletrônicas.

Particularmente, como objetivo específico deste trabalho pretende-se, portanto, dar continuidade aos estudos preliminares realizados em trabalhos anteriores (FREITAS, 2011; RIBEIRO, 2003; AFONSO; SILVA; MARTINS, 2001;), investigando-se agora por meio de estudos teóricos, simulados e experimentais o desempenho dessa nova estrutura híbrida de filtragem harmônica.

## 1.7 ORGANIZAÇÃO DA TESE

O capítulo 2 reúne as considerações teóricas e os desenvolvimentos matemáticos relacionados com a proposição de modelos para representação analítica do supressor eletromagnético de sequência zero.

Tratando-se de filtros ativos, o capítulo 3 apresenta uma breve classificação dos filtros ativos de potência, incluindo seus princípios básicos de operação e abordando a „Teoria Geral da Potência Reativa Instantânea em Sistemas Trifásicos“ como técnica de controle empregada.

O capítulo 4 trata especificamente da proposta deste trabalho, incluindo a lógica do novo arranjo híbrido de filtragem proposto, composto pelo supressor eletromagnético e pelo filtro ativo paralelo. É também revelada a fundamentação da compensação harmônica proporcionada pela operação conjunta dos dispositivos, bem como o novo fluxo de potências entre fonte e carga.

No capítulo 5 são abordados os principais aspectos relacionados com o dimensionamento dos dispositivos de confinamento de sequência zero, com ênfase à maximização da sua funcionalidade como bloqueador e filtro de sequência zero. São apresentadas as principais características dos protótipos utilizados para investigações experimentais, incluindo o filtro ativo paralelo.

O capítulo 6 mostra a validação dos protótipos por simulação, visando garantir a segurança da futura implementação do sistema de filtragem harmônica. Para tanto, utiliza-se um simulador no domínio do tempo de ampla aceitação no meio de ciências exatas e engenharias, o *software* de simulação *PSIM*<sup>®</sup> da empresa Powersim.

O capítulo 7 apresenta diferentes análises experimentais acerca da funcionalidade do arranjo híbrido de filtragem harmônica sobre diferentes condições operacionais e parâmetros do sistema. É exposta também a comparação técnico-econômica entre um filtro ativo paralelo de quatro braços e o arranjo híbrido de filtros proposto nesta tese.

Finalmente, no capítulo 8, são destacadas, resumidamente, as principais conclusões obtidas ao longo dos capítulos anteriores, indicando as contribuições distintas relativas à



originalidade e importância deste trabalho na atenuação de distorções harmônicas. São ainda apresentadas sugestões de trabalhos futuros.



## 2 SUPRESSOR ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA ZERO

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS

Uma das formas para atenuação da injeção de harmônicas de sequência zero nas redes elétricas de suprimento fundamenta-se no emprego de dispositivos eletromagnéticos (VENDRAMINI, 2006). Esses dispositivos dispensam o emprego de capacitores e outros recursos habitualmente empregados em outros arranjos, a exemplo dos filtros ressonantes sintonizados. Por esse motivo, esses dispositivos tornam-se economicamente atrativos e proporcionam uma solução mais robusta para os esquemas de filtragem harmônica (BELCHIOR et al., 2006).

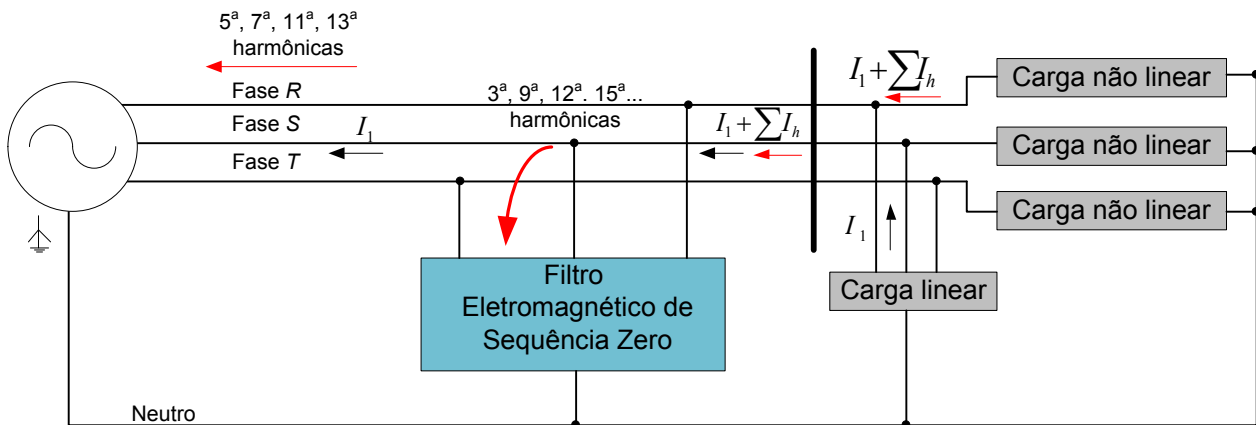
A classificação desses dispositivos pode ser realizada em duas modalidades, distintas pela funcionalidade segundo às suas impedâncias de sequência zero (FREITAS, 2010; OLIVEIRA; RAVAGNANI; MILANES, 2007a). Na primeira modalidade, o arranjo eletromagnético utilizado faz com que o dispositivo apresente uma baixa impedância para correntes de sequência zero. Dessa forma, esse dispositivo conectado em paralelo com a rede pode ser utilizado como um filtro de harmônicas de sequência zero. Na segunda modalidade, o arranjo eletromagnético de bobinas faz com que o dispositivo apresente uma alta impedância de sequência zero. Desse modo, quando conectado em série com a rede, pode ser utilizado para o bloqueio de correntes harmônicas homopolares (CZARNECKI, 1994) e como dispositivo adaptador de impedância no PAC do sistema elétrico.

Nas seções subsequentes, serão abordadas a modelagem e as funcionalidades de um filtro e de um bloqueador, ambos eletromagnéticos, bem como os benefícios e a eficácia do uso conjunto desses dispositivos como sistema de filtragem de correntes harmônicas de sequência zero geradas por cargas não lineares.

### 2.2 FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA ZERO

O arranjo ilustrado na figura 4 possibilita a visualização do mecanismo de filtragem das componentes harmônicas de sequência zero proporcionado pela ação do filtro eletromagnético (FE). O objetivo do filtro conectado em paralelo a uma carga geradora de harmônicas é prover meios para que as mencionadas componentes harmônicas homopolares fiquem restritas ao circuito composto pela carga e o filtro propriamente dito (VENDRAMINI, 2006), não havendo alteração do conteúdo harmônico produzido pela carga, e sim, um desvio em seu caminho de circulação.

Figura 4 – Posicionamento de um filtro eletromagnético paralelo à rede.



Fonte: Dados da autora.

As componentes harmônicas de sequência zero predominam em instalações elétricas cujas cargas não lineares estão conectadas entre uma fase e o neutro. A título de exemplo de uso comum é possível citar microcomputadores, iluminação fluorescente compacta, impressoras, etc. Nesse cenário, há possibilidade de sobrecargas nos condutores neutros devido à presença de correntes harmônicas, que poderão vir a causar efeitos indesejáveis no sistema, como por exemplo, sobreaquecimento dos condutores, excessiva diferença de potencial entre o neutro e terra, ruídos, excitação de ressonâncias, entre outros.

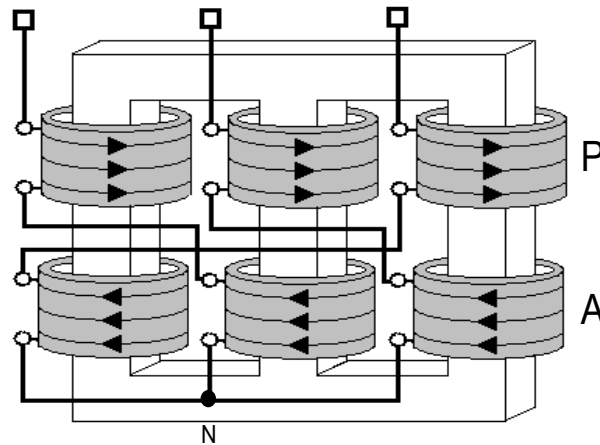
Visando minimizar a intensidade desses efeitos, uma das soluções baseia-se na utilização de enrolamentos eletromagnéticos interligados em zigue-zague, com os quais se obtém um dispositivo capaz de oferecer um caminho de baixa impedância para as componentes de sequência zero, que pode se tornar preponderante em relação ao restante do circuito elétrico ao qual pertence o dispositivo (OLIVEIRA et al., 2006).

Os benefícios desse método na mitigação harmônica são visíveis e mostram uma clara redução dos níveis de corrente no condutor neutro. Os filtros convencionais, estabelecidos em circuitos ressonantes sintonizados, utilizam combinações  $R$ ,  $L$  e  $C$  para filtrar ordens harmônicas específicas, enquanto o filtro eletromagnético de componentes de sequência zero, cuja função também é a de oferecer um caminho de baixa impedância para determinadas ordens harmônicas, se fundamenta na compensação de todas as harmônicas de ordem três e suas múltiplas (RAVAGNANI, 2008).

### 2.2.1 MODELAGEM MATEMÁTICA – FILTRO ELETROMAGNÉTICO COM NÚCLEO DE TRÊS COLUNAS

Baseado em modelagens desenvolvidas em trabalhos anteriores (RAVAGNANI, 2008), pode-se concluir que, qualquer que seja a configuração do núcleo magnético (núcleos individuais ou trifásicos), os arranjos eletromagnéticos apresentam um comportamento similar com respeito às impedâncias sequenciais. Portanto, será abordado neste trabalho, um arranjo de núcleo trifásico. A figura 5 mostra o arranjo eletromagnético com núcleo de três colunas utilizado na concepção dos filtros eletromagnéticos de sequência zero.

Figura 5 – Conexão zigue-zague do filtro eletromagnético.



Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2007b).

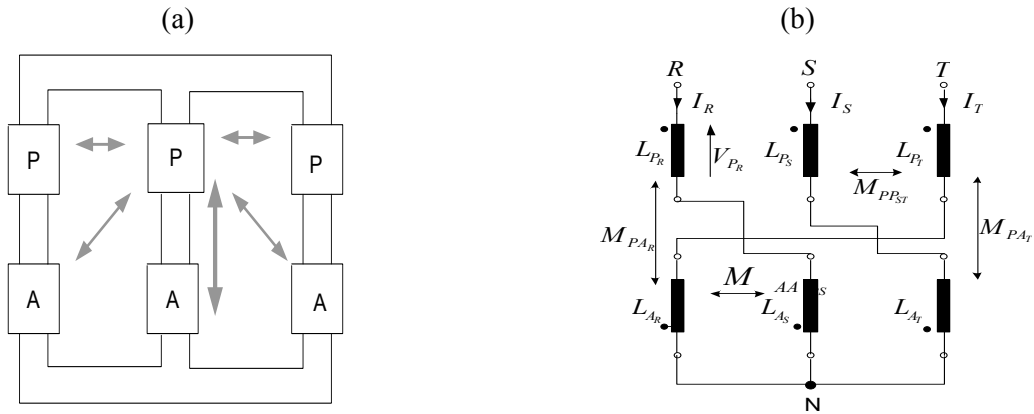
Esse arranjo é composto por duas bobinas idênticas, denominadas principal (P) e auxiliar (A), dispostas sobre uma mesma coluna do núcleo magnético. Essa denominação não implica o grau de importância das bobinas, uma vez que é utilizada apenas para identificar cada conjunto de bobinas. Para a composição da conexão zigue-zague cada bobina principal de uma fase é interligada à bobina auxiliar de outra fase, e essas conectadas ao condutor neutro. (RAVAGNANI, 2008).

A associação série é composta pela bobina de um ramo magnético do núcleo denominada principal, conectada diretamente a uma das fases do sistema alimentador, e em contra-fase a uma bobina denominada auxiliar de outro ramo magnético do núcleo (FREITAS, 2011). A interligação trifásica do conjunto de bobinas é efetuada no sentido de compor um sistema trifásico em estrela aterrado (BELCHIOR et al., 2006).

A utilização de núcleos magnéticos trifásicos implica em acoplamentos mútuos entre todas as bobinas que compõe o arranjo magnético, refletindo diretamente em uma maior complexidade do modelo matemático. No decorrer deste trabalho algumas simplificações

serão apresentadas, sendo que estão diretamente relacionadas à similaridade construtiva dos enrolamentos, à simetria do núcleo e à linearidade do meio magnético e, têm como objetivo estabelecer alguns procedimentos construtivos que maximizem a funcionalidade desejada. O desenvolvimento matemático detalhado do filtro eletromagnético é encontrado em (RAVAGNANI, 2008). Todos os acoplamentos magnéticos a serem considerados para a bobina principal da coluna magnética central são ilustrados na figura 6(a). A interconexão dos conjuntos das bobinas é mostrada na figura 6(b).

Figura 6 – Filtro eletromagnético de três colunas: (a) Acoplamentos magnéticos; (b) Conexões elétricas.



Fonte: Adaptado de Ravagnani (2008).

A partir do diagrama elétrico ilustrado na figura 6(b), obtêm-se, na forma matricial, as equações que regem o funcionamento do filtro eletromagnético. A equação (1) mostra as tensões compostas para as fases  $R$ ,  $S$  e  $T$ , para cada ordem harmônica  $h$ :

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{V}_S \\ \dot{V}_T \end{bmatrix}^h = \begin{bmatrix} \dot{V}_{P_R} \\ \dot{V}_{P_S} \\ \dot{V}_{P_T} \end{bmatrix}^h + \begin{bmatrix} \dot{V}_{A_S} \\ \dot{V}_{A_T} \\ \dot{V}_{A_R} \end{bmatrix}^h \quad (1)$$

Nessas condições, a matriz que representa as relações das tensões e correntes no domínio da frequência é:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_R \\ \dot{V}_S \\ \dot{V}_T \end{bmatrix}^h = jh\omega \begin{bmatrix} L_{RR} & -L_{RS} & -L_{RT} \\ -L_{SR} & L_{SS} & -L_{ST} \\ -L_{TR} & -L_{TS} & L_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_R \\ \dot{I}_S \\ \dot{I}_T \end{bmatrix}^h \quad (2)$$

Os termos das indutâncias da equação (2) podem ser obtidos nas expressões (3) a (11).

$$L_{RR} = L_{P_R} + L_{A_S} + M_{P_A R S} + M_{P_A S R} \quad (3)$$

$$L_{SS} = L_{P_S} + L_{A_T} + M_{P_A S T} + M_{P_A T S} \quad (4)$$

$$L_{TT} = L_{P_T} + L_{A_R} + M_{P_A T R} + M_{P_A R T} \quad (5)$$

$$L_{RS} = M_{PA_S} + M_{PP_{RS}} + M_{AA_{ST}} - M_{PA_{TR}} \quad (6)$$

$$L_{SR} = M_{PA_S} + M_{PP_{RS}} + M_{AA_{ST}} - M_{AP_{TR}} \quad (7)$$

$$L_{ST} = M_{PA_T} + M_{PP_{ST}} + M_{AA_{TR}} - M_{PA_{SR}} \quad (8)$$

$$L_{TS} = M_{PA_T} + M_{PP_{TS}} + M_{AA_{RT}} - M_{PA_{RS}} \quad (9)$$

$$L_{TR} = M_{PA_R} + M_{PP_{TR}} + M_{AA_{RS}} - M_{PA_{ST}} \quad (10)$$

$$L_{RT} = M_{PA_R} + M_{PP_{RT}} + M_{AA_{RS}} - M_{AP_{TS}} \quad (11)$$

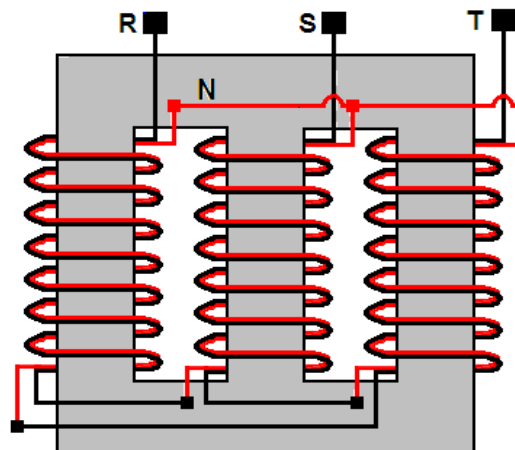
Para possibilitar as análises para as quais o filtro eletromagnético se destina, a modelagem deste trabalho deve ser direcionada a uma análise no espaço matemático das componentes sequenciais. Nessas condições, fazendo a transformação linear do espaço das componentes de fase para as componentes simétricas, tem-se, resumidamente a equação que representa as relações das tensões e correntes do filtro eletromagnético:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}^h = jh\omega \begin{bmatrix} L_{00} & L_{01} & L_{02} \\ L_{10} & L_{11} & L_{12} \\ L_{20} & L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}^h \quad (12)$$

### 2.2.2 SIMPLIFICAÇÕES DO MODELO DO FILTRO ELETROMAGNÉTICO

O arranjo eletromagnético do filtro é formado por dois enrolamentos justapostos sobre um mesmo núcleo magnético e tem por objetivo fazer com que haja um acoplamento com o mínimo de dispersões, que proporcione a maximização de sua funcionalidade, obtido por meio de um coeficiente de acoplamento de valor unitário, figura 7.

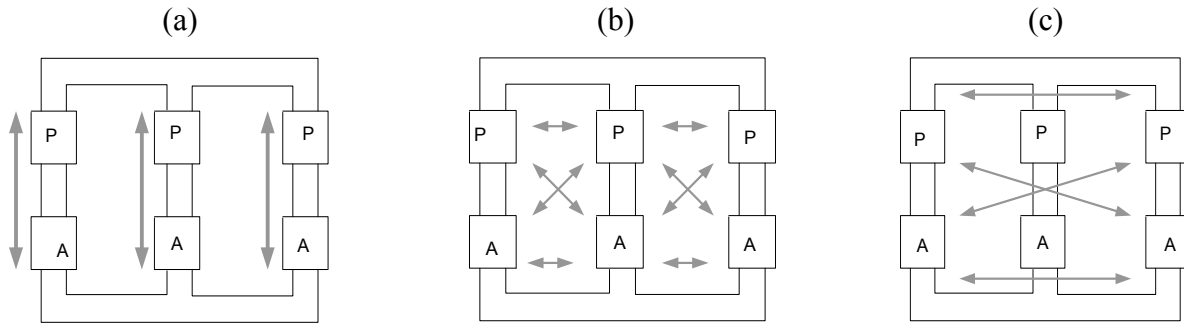
Figura 7 – Detalhe dos enrolamentos e interligação das bobinas.



Fonte: Ravagnani (2008).

Considerando-se, portanto, as indutâncias próprias das bobinas idênticas,  $L_f$ , indutâncias mútuas entre bobinas de uma mesma coluna idênticas,  $M_f$ , figura 8(a), e indutâncias mútuas entre bobinas de colunas distintas idênticas,  $M$ , figuras 8(b) e 8(c), obtêm-se então as equações das tensões sequenciais positiva e negativa (13), que são similares uma vez que se trata de um equipamento estático à tensão de sequência zero, equação (14).

Figura 8 – Indutâncias Mútuas: (a) Entre bobinas de uma mesma coluna  $M_f$ ; (b) Entre bobinas de colunas adjacentes  $M_{adj}$ ; (c) Entre bobinas de colunas externas  $M_{ext}$ .



Fonte: Dados da autora.

$$V_{1,2}^h = j\omega h [2L_f + M_f + 3M] I_{1,2}^h \quad (13)$$

$$V_0^h = j\omega h [L_f - M_f] I_0^h \quad (14)$$

Pela equação (14), constata-se que, à medida em que o valor da indutância mútua entre as bobinas principal e auxiliar de uma mesma coluna,  $M_f$ , se aproxima do valor da indutância própria das bobinas,  $L_f$ , a indutância equivalente de sequência zero tende a um valor mínimo. Idealmente, essas indutâncias se relacionam conforme apresentado na equação (15).

$$M_f = \lambda_f \sqrt{L_{Pf} \cdot L_{Af}} \quad (15)$$

Onde:

$\lambda_f$  - fator de acoplamento entre as bobinas de uma mesma coluna do filtro eletromagnético;

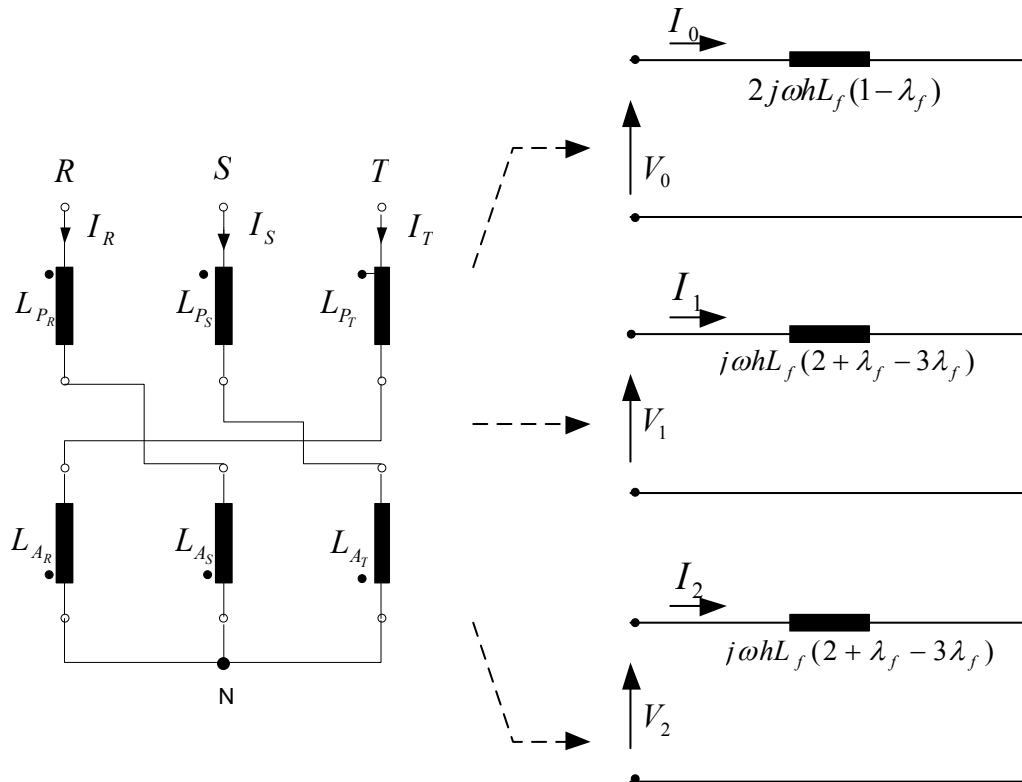
$L_{Pf}$  - indutância própria do enrolamento principal;

$L_{Af}$  - indutância própria do enrolamento auxiliar.

Considerando o fator de acoplamento entre as bobinas de uma mesma coluna do núcleo trifásico do filtro, o sistema de equações obtido em (13) e (14) pode ser representado através dos circuitos sequenciais desacoplados ilustrados na figura 9.



Figura 9 – Circuitos sequenciais desacoplados.



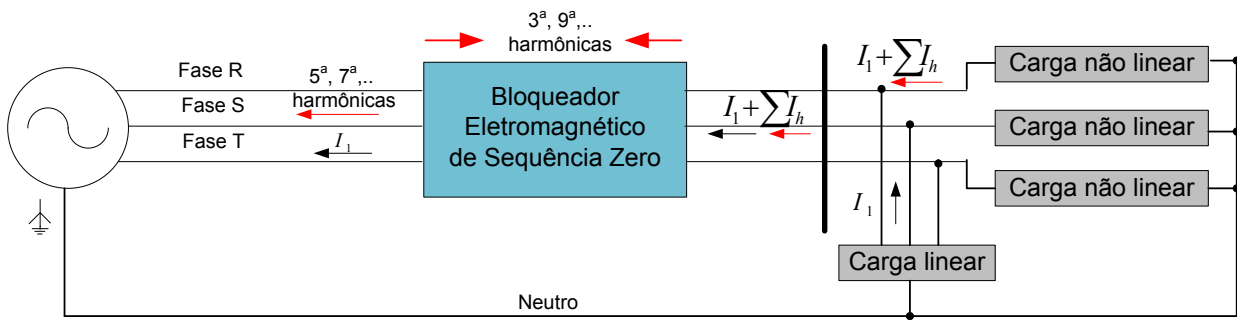
Fonte: Adaptado de Ravagnani (2008).

Para um acoplamento perfeito ( $\lambda_f = 1$ ), a indutância para seqüência zero resulta nula, ou seja,  $M_f = L_f$ . Pode-se dizer então, que o dispositivo proposto representa um curto-circuito para todas as correntes de seqüência zero, sendo, portanto, um filtro ideal para esta seqüência.

### 2.3 BLOQUEADOR ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA ZERO

O bloqueador eletromagnético (BE) foi desenvolvido para executar o bloqueio de sinais elétricos de tensões ou correntes harmônicas com forte expressão de componentes homopolares. O arranjo eletromagnético ilustrado na figura 10 mostra o mecanismo de atenuação das referidas componentes harmônicas. O bloqueador de seqüência zero realiza duas funções. A primeira é evitar que as correntes harmônicas de seqüência zero produzidas pela carga fluam para a fonte. A segunda é isolar a carga e o filtro eletromagnético dos efeitos das componentes de seqüência zero das tensões do sistema de alimentação. Esse dispositivo pode operar isoladamente ou atuar como dispositivo auxiliar adaptador de impedâncias para os filtros eletromagnéticos instalados em sistemas com alto nível de curto circuito no PAC (CZARNECKI, 1994; DAHONO et al., 1997).

Figura 10 – Posicionamento do bloqueador eletromagnético em série com a rede elétrica.



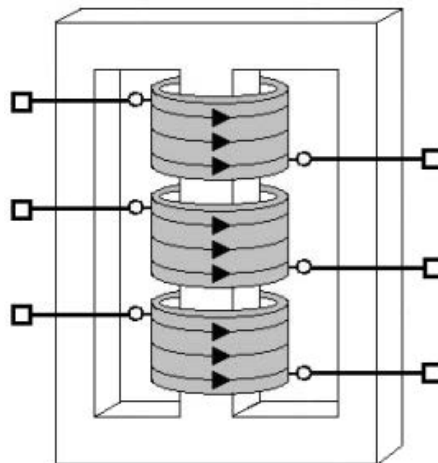
Fonte: Dados da autora.

O processo de bloqueio das componentes harmônicas de sequência zero é alcançado por meio da construção de um núcleo magnético composto por três bobinas de mesmo número de espiras.

### 2.3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA – ARRANJO ELETROMAGNÉTICO

O arranjo eletromagnético do bloqueador de sequência zero é formado por três enrolamentos dispostos em um mesmo núcleo magnético, figura 11.

Figura 11 – Arranjo eletromagnético do bloqueador eletromagnético.

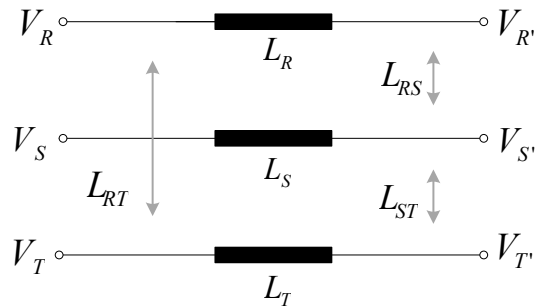


Fonte: Dados da autora.

O modelo matemático para o bloqueador eletromagnético é desenvolvido com base nas relações de tensões e correntes das bobinas mutuamente acopladas e alimentadas por um sistema trifásico. O desenvolvimento matemático detalhado do bloqueador é encontrado em (FREITAS, 2011).

A figura 12 ilustra o comportamento das indutâncias mútuas e próprias para o dispositivo eletromagnético.

Figura 12 – Esquema elétrico dos enrolamentos das bobinas.



Fonte: Dados da autora.

Com base na relação de acoplamento dos enrolamentos, pode-se escrever a matriz de quedas de tensões em função das correntes e das indutâncias mútuas e próprias dos enrolamentos das bobinas, representada no domínio da frequência. Desconsiderando-se o efeito resistivo do cobre das bobinas e tomando por base a frequência angular fundamental  $\omega$  e a ordem harmônica genérica  $h$ , então, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{RR'} \\ \dot{V}_{SS'} \\ \dot{V}_{TT'} \end{bmatrix}^h = jh\omega \begin{bmatrix} L_R & L_{RS} & L_{RT} \\ L_{SR} & L_S & L_{ST} \\ L_{TR} & L_{TS} & L_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_R \\ \dot{I}_S \\ \dot{I}_T \end{bmatrix}^h \quad (16)$$

Assim, como para o filtro eletromagnético, a modelagem matemática do bloqueador de sequência zero requer uma análise no espaço matemático das componentes simétricas. Dessa forma, deve-se remeter a equação (16) a uma transformação linear, que visa converter as componentes de fase para componentes simétricas. Nessas condições, tem-se, resumidamente, a matriz da síntese:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}^h = jh\omega \begin{bmatrix} L_{00} & L_{01} & L_{02} \\ L_{10} & L_{11} & L_{12} \\ L_{20} & L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}^h \quad (17)$$

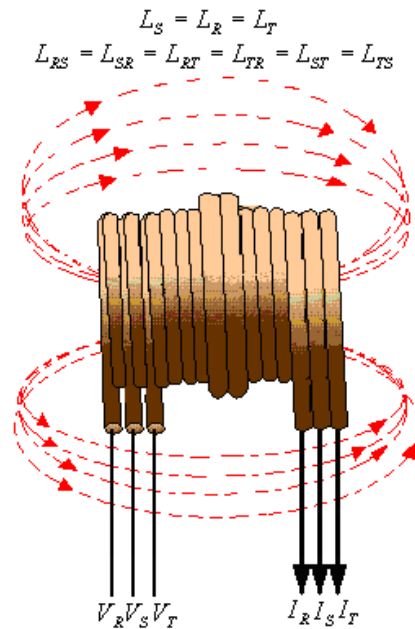
A matriz desenvolvida representa genericamente a relação entre as componentes sequenciais das tensões e correntes para o bloqueador eletromagnético idealizado.

### 2.3.2 SIMPLIFICAÇÕES DO MODELO DO BLOQUEADOR ELETROMAGNÉTICO

O arranjo eletromagnético do bloqueador é formado por três enrolamentos justapostos sobre um mesmo núcleo magnético e tem por objetivo fazer com que haja um acoplamento

com o mínimo de dispersões que proporcione a maximização de sua funcionalidade, obtido por meio de um coeficiente de acoplamento de valor unitário, figura 13.

Figura 13 – Acoplamento magnético do bloqueador eletromagnético.



Uma vez realizado o arranjo eletromagnético para as bobinas, podem ser adotadas algumas considerações, baseadas na similaridade dos enrolamentos e dos aspectos geométricos e construtivos do núcleo magnético. Essas simplificações garantem, sob o ponto de vista de análise, que o comportamento das componentes de sequência zero de tensão e corrente seja investigado isoladamente.

Admitindo-se, portanto, igualdade entre as indutâncias próprias de cada bobina,  $L_b$ , e entre as indutâncias mútuas entre as bobinas de diferentes fases,  $M_b$ , obtêm-se as seguintes expressões das tensões sequenciais:

$$V_{1,2}^h = j\omega h[L_b - M_b]I_{1,2}^h \quad (18)$$

$$V_0^h = j\omega h[L_b + 2M_b]I_0^h \quad (19)$$

Observa-se pela equação (19) que, para que o dispositivo efetue o bloqueio da sequência zero proporcionando uma alta indutância equivalente e, simultaneamente, ofereça baixa indutância equivalente para as sequências positiva e negativa, há necessidade de obter um acoplamento máximo entre os enrolamentos das bobinas de tal forma que as indutâncias próprias,  $L_b$ , e mútuas,  $M_b$ , sejam muito similares.

A equação (20) relaciona as indutâncias próprias e mútuas através de um fator de acoplamento,  $\lambda_b$ . Assim tem-se:

$$M_b = \lambda_b \cdot L_b \quad (20)$$

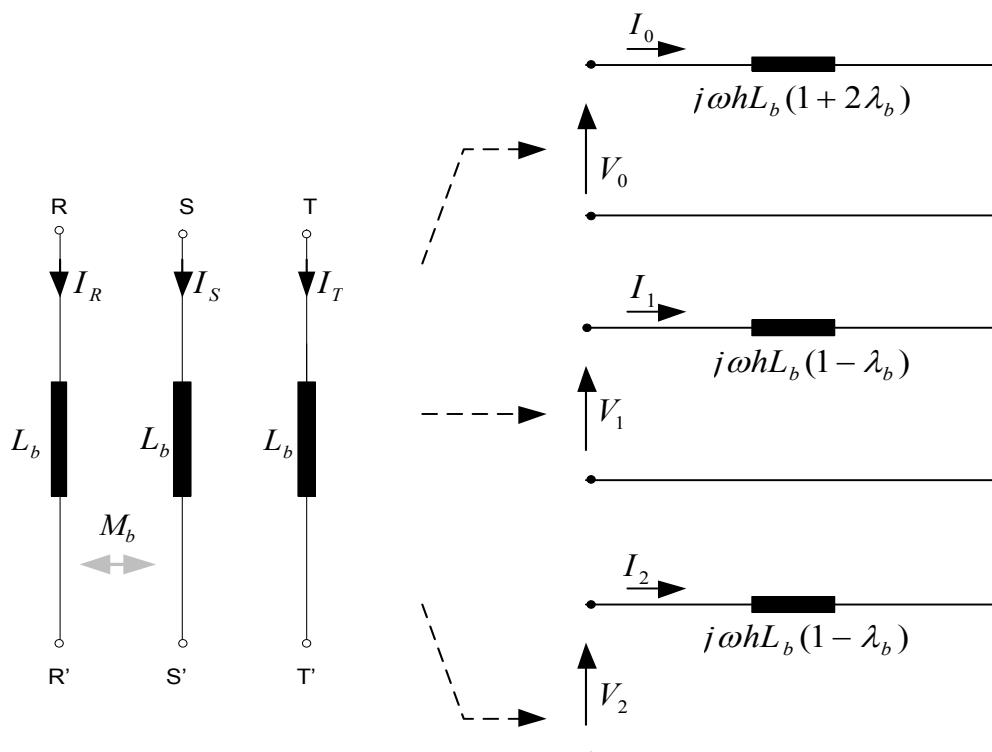
onde:

$\lambda_b$  - fator de acoplamento entre as bobinas do bloqueador eletromagnético;

$L_b$  - indutância própria das bobinas do bloqueador.

Para que haja uma igualdade entre os valores de indutâncias próprias e mútuas, há necessidade de um acoplamento ideal, ou seja ( $\lambda_b = 1$ ). Dessa forma, para a sequência zero, as indutâncias próprias e mútuas iriam se somar ocasionando uma indutância três vezes maior. O contrário acontece para as sequências positiva e negativa, sendo que as indutâncias próprias e mútuas se anulam, formando um caminho livre para essas componentes. A figura 14 ilustra a análise do ponto de vista dos circuitos sequenciais equivalentes para um acoplamento ideal entre as bobinas.

Figura 14 – Circuitos sequenciais desacoplados do bloqueador.



Fonte: Dados da autora.

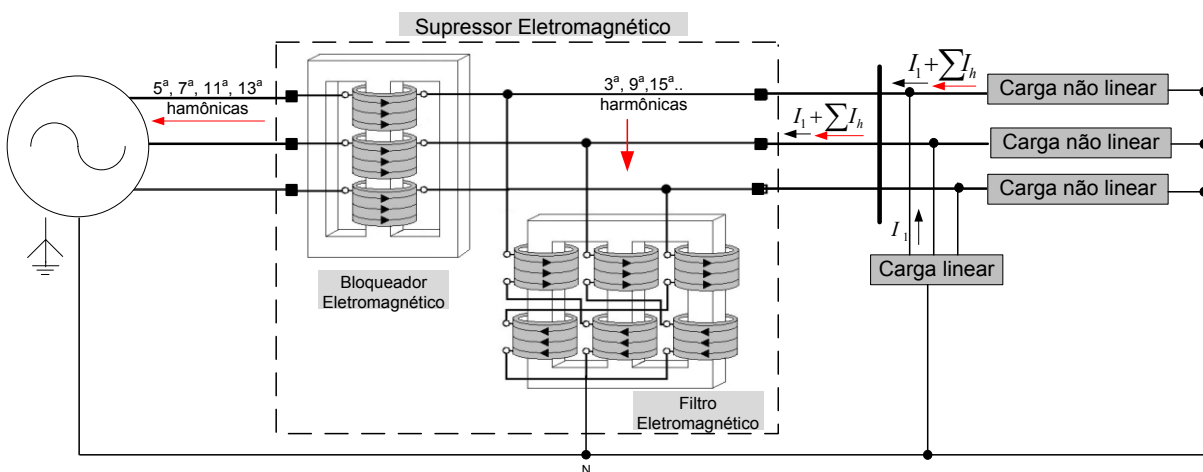
Essas características revelam a ação do bloqueio às componentes de sequência zero, cuja eficácia é proporcional ao fator de acoplamento, sendo idealmente de valor unitário.

## 2.4 SUPRESSOR ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA ZERO

Esta seção apresenta as potencialidades do uso conjunto dos dispositivos eletromagnéticos supramencionados, como sistema de filtragem de correntes harmônicas de sequência zero geradas por cargas não lineares.

O denominado supressor eletromagnético de sequência zero (SE) é formado pela composição de um filtro conectado em paralelo ao sistema de distribuição e de um bloqueador conectado em série, figura 15.

Figura 15 – Instalação conjunta do filtro e do bloqueador de sequência zero em um sistema.



Fonte: Dados da autora.

A eficiência na operação do filtro eletromagnético depende da proporção entre sua impedância de sequência zero e a respectiva impedância do sistema no ponto de acoplamento comum (FREITAS et al., 2010).

O bloqueador de sequência zero, como destacado nos itens anteriores, é um dispositivo que apresenta uma alta impedância de sequência zero. Nesse sentido, é possível identificar duas funções básicas para sua utilização, sendo que a primeira consiste em minimizar a circulação de correntes harmônicas de sequência zero entre a fonte e a carga, e a segunda refere-se ao seu funcionamento como adaptador de impedância de sequência zero, cooperando para a maximização do funcionamento do filtro eletromagnético. Essa aplicação é importante à medida que se vislumbra a utilização de filtros eletromagnéticos em um PAC com alto nível de curto circuito.

A eficácia do filtro eletromagnético será tanto maior quando menor for sua impedância de sequência zero frente à respectiva impedância da rede no PAC. Nesse contexto, almeja-se a operação conjunta dos dois dispositivos eletromagnéticos aqui

abordados, sendo que a principal função do bloqueador é adaptar a impedância total no PAC vista pelo filtro, objetivando um desempenho nos padrões requeridos (FREITAS, 2011).

O desempenho do supressor eletromagnético foi investigado a partir do método das transmitâncias harmônicas sequenciais, proposto em trabalhos anteriores como citado nas referências (OLIVEIRA et al., 2009; FREITAS, 2011). Essa metodologia está baseada em técnicas no domínio da frequência e é particularmente atraente, pois permite que sejam investigados os efeitos individuais de cada uma das fontes harmônicas presentes e de outros parâmetros físicos e construtivos do equipamento mitigador (OLIVEIRA et al., 2007b).

Neste trabalho, as análises do comportamento desses dispositivos serão realizadas por meio de simulações digitais no domínio do tempo.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as premissas metodológicas para a definição dos modelos no domínio da frequência de um filtro e de um bloqueador, ambos eletromagnéticos, que contribuem para a mitigação de componentes harmônicas de sequência zero.

Foram feitos alguns comentários que tiveram como objetivo esclarecer os princípios físicos que norteiam a operação do filtro e do bloqueador eletromagnéticos, ficando assim evidente o mecanismo por meio do qual se dá o surgimento de um caminho de baixa e um de alta impedância para as referidas correntes harmônicas de sequência zero.

Foram propostos modelos baseados nas componentes sequenciais de tensões e correntes de alimentação desses dispositivos. Apresentaram-se hipóteses simplificadoras consideradas aceitáveis para a precisão numérica almejada, tendo em vista a melhor interpretação de suas funcionalidades como filtro e bloqueador de componentes harmônicas de sequência zero.

É possível afirmar que o principal parâmetro associado ao comportamento desses dispositivos eletromagnéticos é o fator de acoplamento,  $\lambda$ , entre as bobinas de uma mesma coluna magnética, e que a maximização desse desempenho operacional está diretamente associada à concretização de acoplamentos quase perfeitos, ou seja, quase ideais.

Além da exposição isolada acerca das funcionalidades operacionais desses dispositivos eletromagnéticos, neste capítulo foi também apresentada a composição do denominado supressor eletromagnético, destinado ao controle da circulação de correntes harmônicas de sequência zero no sistema elétrico. Os parâmetros desses dispositivos podem ser convenientemente ajustados visando obter o desempenho desejado.

Destaca-se finalmente que as modelagens apresentadas neste capítulo são tomadas como base para o desenvolvimento dos protótipos dos dispositivos eletromagnéticos, que são apresentados no capítulo 5.



### 3 FILTROS ATIVOS DE POTÊNCIA

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta uma breve classificação dos filtros ativos de potência, incluindo seus princípios básicos de operação e abordando a „Teoria Geral da Potência Reativa Instantânea em Sistemas Trifásicos“ (AKAGI, 1983) como técnica de controle dos mesmos.

Os itens contidos neste capítulo mostram os tipos de inversores apropriados ao projeto e desenvolvimento de filtros ativos e, dão ênfase especialmente nos filtros ativos paralelos por serem classificados como os mais utilizados na eliminação de correntes harmônicas, compensação de potência reativa e balanceamento de correntes desequilibradas. Esses fatores motivaram a escolha dessa topologia para compor o sistema de filtragem híbrido estudado nesta tese.

É oportuno ressaltar que este capítulo encontra-se especialmente baseado em (AFONSO; COUTO; MARTINS 2000b), (RIBEIRO, 2003) e (OMORI, 2007). A escolha das referências foi baseada na constatação de que elas apresentam uma boa síntese sobre dos itens abordados.

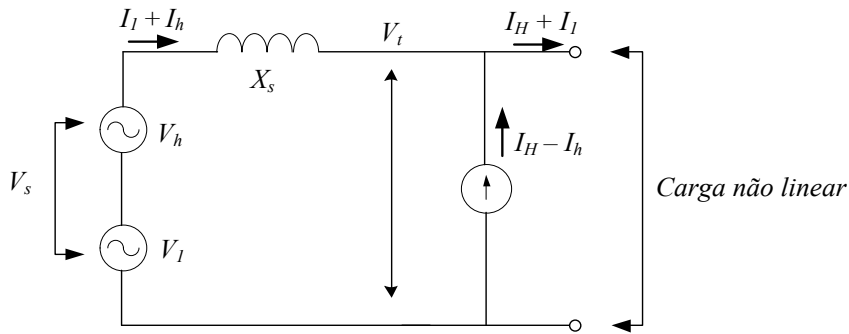
#### 3.2 FILTROS ATIVOS DE POTÊNCIA – PRINCÍPIOS BÁSICOS

Nesta seção, apresentam-se os princípios básicos de funcionamento de um filtro ativo de potência. Os filtros ativos, teoricamente perfeitos, podem ser entendidos como geradores ideais de tensão e/ou corrente (GYUGYI; STRYCUDA, 1976).

Seja uma fonte de alimentação alternada com uma tensão não senoidal e uma impedância interna  $X_s = \omega.L$ , suprindo uma carga. A tensão da fonte é dada pela soma vetorial  $V_s = V_l + V_h$ , onde  $V_l$  é a tensão na frequência fundamental e  $V_h$  representa todas as tensões harmônicas geradas internamente. A corrente de carga  $I_o$  é constituída por todas as correntes harmônicas  $I_H$  e pela corrente fundamental  $I_l$ , ou seja,  $I_o = I_H + I_l$ .

Nessa condição, a distorção da tensão terminal,  $V_t$ , é causada pelas tensões harmônicas geradas internamente e pela circulação das correntes da carga, através da impedância interna da fonte. Um filtro ideal pode remover as harmônicas da tensão terminal sem afetar o fluxo da corrente fundamental da carga. Esse filtro pode ser entendido como um gerador de correntes ondulatórias  $(I_H - I_h)$  interconectando-se os terminais da fonte de corrente alternada, como ilustrado na figura 16.

Figura 16 – Filtros Ativos – Gerador ideal de corrente.

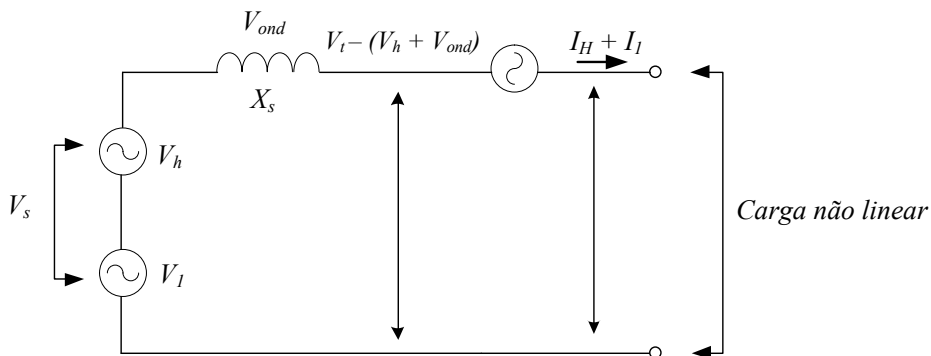


Fonte: Adaptado de Ribeiro (2003).

Como o gerador ideal de corrente compensa todas as harmônicas de corrente existentes, sejam elas advindas da tensão da fonte (correntes  $I_h$ ) ou da carga não linear (correntes  $I_H$ ), elas não circularão através da impedância interna da fonte. Tal fato garante que os terminais serão curto-circuitados em todas as frequências harmônicas, e conseqüentemente a tensão terminal,  $V_t$ , será uma senoide na frequência fundamental da fonte (RIBEIRO, 2003).

A filtragem harmônica também pode ser conseguida pela geração de componentes que se oponham e cancelem a tensão terminal harmônica. A tensão terminal,  $V_t$ , é em geral a soma da tensão fundamental,  $V_l$ , da tensão harmônica gerada internamente  $V_h$  (soma de todas as tensões harmônicas) e da tensão ondulatória  $V_{ond}$ , produzida pelas correntes harmônicas da carga fluindo pela reatância da fonte  $X_s$ . Resumidamente, escreve-se  $V_t = V_l + V_h + V_{ond}$ . Portanto, a tensão terminal ondulatória pode ser cancelada pela conexão de um gerador ideal de tensões ondulatórias  $-(V_h + V_{ond})$  entre a fonte e a carga, conforme ilustra a figura 17.

Figura 17 – Filtros Ativos – Gerador ideal de tensão.

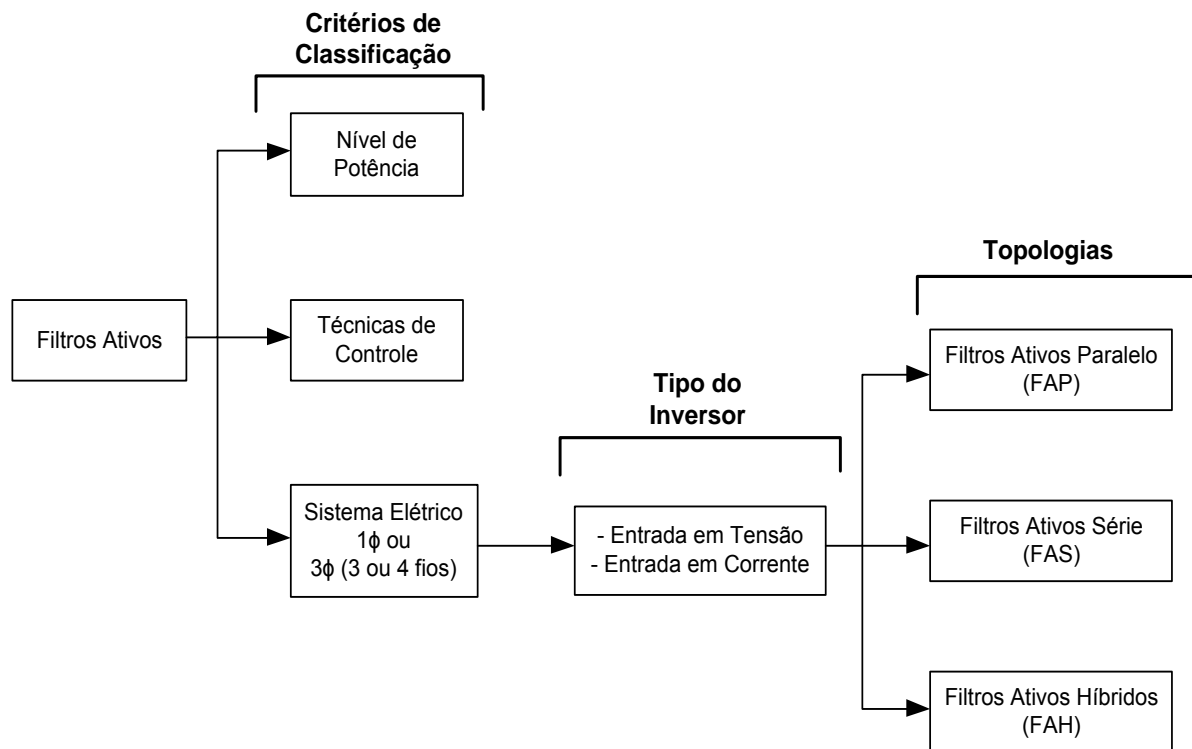


Fonte: Adaptado de Ribeiro (2003).

### 3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS FILTROS ATIVOS DE POTÊNCIA

Diferentes critérios podem ser utilizados para realizar a classificação dos filtros ativos (SINGH; AL-HADDAD; CHANDRA, 1999). Na figura 18, a classificação dos filtros ativos é apresentada por meio de blocos, sendo que os critérios de classificação dos mesmos são abordados nesta seção e os tipos de inversores e a topologia paralela nas seções subsequentes.

Figura 18 – Classificação dos Filtros Ativos de Potência.



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2003).

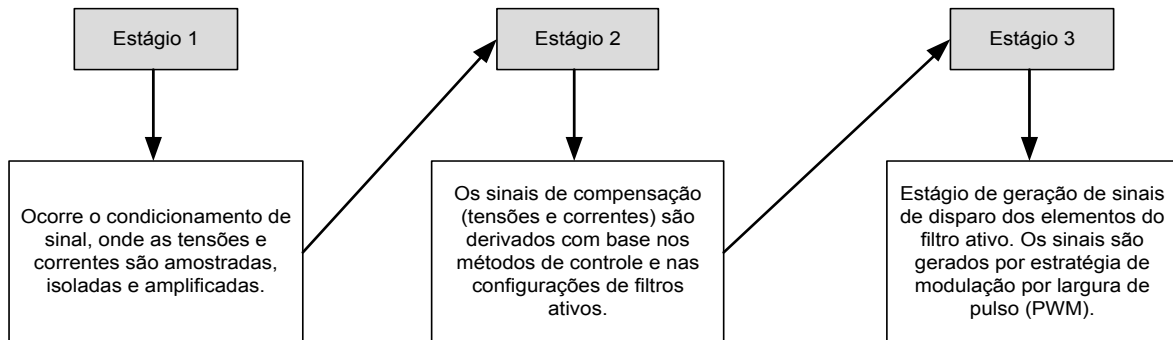
No critério nível de potência, a potência e a velocidade de resposta do sistema que está sendo compensado é de substancial relevância, pois auxilia na decisão da metodologia de controle para implementar o filtro ativo adequado. Suas aplicações são subdivididas em:

- Baixa Potência: menor que 100kVA;
- Média Potência: de 100kVA a 10MVA;
- Alta Potência: maior que 10MVA.

O segundo critério é a classificação por técnicas de controle, que pode ser estabelecida no domínio do tempo, no domínio da frequência e por inteligência artificial.

A título de exemplo, a figura 19 apresenta estágios da implementação de um sistema de controle de filtros ativos.

Figura 19 – Estágios da implementação do critério técnicas de controle nos domínios do tempo e da frequência.



Fonte: Dados da autora.

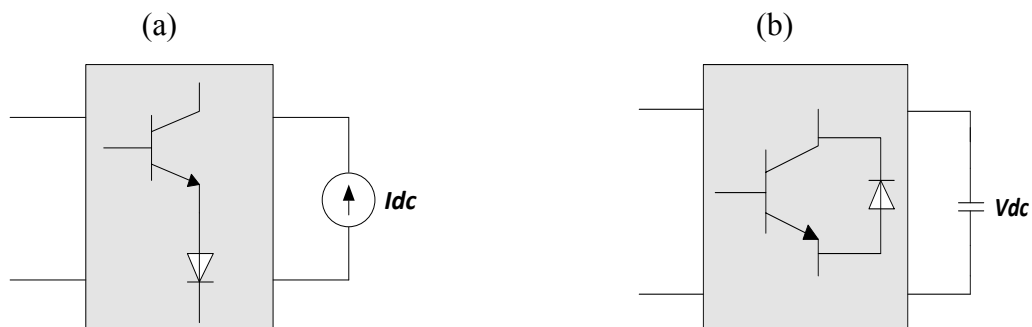
No terceiro critério, a classificação dos filtros ativos é baseada no sistema de alimentação ou na carga, sendo que o sistema pode ser do tipo monofásico ou trifásico a três ou quatro fios.

### 3.4 TIPOS DE INVERSORES

Dois tipos de inversores, também chamados conversores, são apropriados para o projeto e desenvolvimento de filtros ativos de potência e aplicáveis aos três critérios de classificação apresentados na seção anterior. A figura 20(a) representa, de modo simplificado, um inversor de corrente (CSI – *current source inverter*). A operação desse inversor ocorre de maneira que a corrente contínua  $I_{dc}$ , disponível do seu lado CC, assuma um comportamento que se adeque às características das correntes harmônicas da carga não linear (RIBEIRO, 2003).

Outro inversor utilizado como filtro ativo, mostrado na figura 20(b), é o inversor de tensão (VSI – *voltage source inverter*), que dispõe de uma tensão contínua obtida por meio de um ou mais capacitores em seu lado CC. Essa alternativa revelou-se dominante pelo fato de apresentar menor custo e tamanho, além de possibilitar o uso em configurações com multiníveis (RIBEIRO, 2003).

Figura 20 – Tipos de Inversores. (a) CSI; (b) VSI.

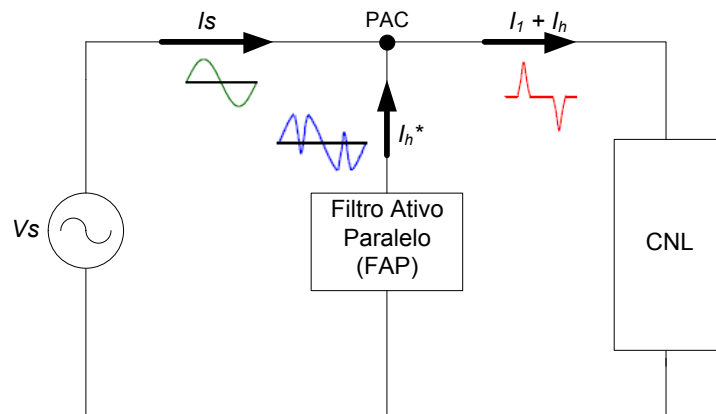


Fonte: Adaptado de Ribeiro (2003).

### 3.5 FILTRO ATIVO PARALELO

No que diz respeito às estruturas dos inversores, os filtros ativos paralelos (FAPs) são os mais utilizados na eliminação de correntes harmônicas, compensação de potência reativa e balanceamento de correntes desequilibradas (RIBEIRO, 2003). O FAP é normalmente colocado junto às cargas não lineares (CNL) em decorrência das correntes harmônicas produzidas pelas mesmas. A compensação ocorre no PAC do sistema elétrico, de modo que, os FAPs injetam correntes iguais e em oposição de fase às correntes harmônicas geradas pelo conjunto de cargas, proporcionando assim o cancelamento das mesmas. Pela rede elétrica circula então apenas a componente fundamental da corrente da carga, resultando, portanto, num comportamento ideal da carga (LINDEKE, 2003), como se pode observar na figura 21.

Figura 21 – Princípio de funcionamento de um FAP.



Fonte: Adaptado de Lindeke (2003).

Tomando nota da descrição a cerca do princípio de funcionamento do FAP monofásico, pode-se concluir que, por exemplo, para uma carga puramente resistiva o FAP não injetará nenhuma corrente no sistema, uma vez que a corrente drenada por uma carga puramente resistiva já é senoidal e em fase com a tensão.

Na mesma lógica, espera-se que para uma carga de caráter indutivo ou capacitivo, o FAP injetará uma corrente adiantada ou atrasada de  $90^\circ$ , respectivamente, compensado assim somente os reativos de deslocamento da carga e, logo, a corrente total drenada da rede será em fase com a tensão.

Como mencionado, para uma carga não linear, como no caso dos retificadores, o filtro ativo atuará no sentido de compensar as harmônicas de corrente e como nos casos anteriores, a corrente total que flui na rede se tornará senoidal e em fase com a tensão.

É importante destacar que não é preciso alterar a carga para acrescentar o FAP, pois ele é conectado em paralelo à rede. Desse modo, caso o FAP deixe de operar, a carga continua sendo alimentada normalmente pela fonte (LINDEKE, 2003).

Além das potencialidades já destacadas, o FAP tem ainda a habilidade de se adaptar a diversas topologias e combinações de cargas, lineares e não lineares, desde que sejam respeitados os limites de potência para o qual foi projetado.

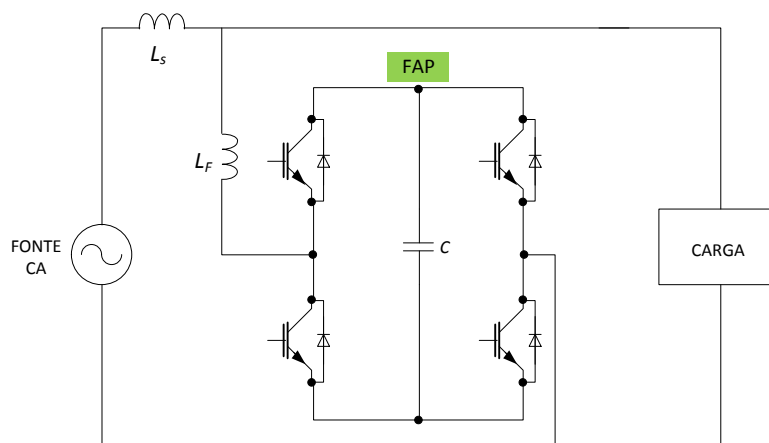
### 3.6 CONEXÕES DO FAP COM O SISTEMA ELÉTRICO

A conexão dos FAPs nas redes elétricas é determinada pelas possíveis configurações dos sistemas de energia. Baseado nas padronizações adotadas desde o início do século XX, o sistema de distribuição mais comum é o trifásico e suas variações (OMORI, 2007). Sistemas de distribuição monofásicos também são muito utilizados, principalmente para alimentação de pequena potência à consumidores remotos (OMORI, 2007).

O sistema monofásico utiliza, normalmente, um ou dois fios (fase e neutro). No entanto, a conexão de dois fios é a mais utilizada. Esse sistema pode ser aplicado a redes de média e baixa tensão, atendendo cargas de pequena potência e que se encontrem distante dos centros consumidores, como por exemplo, em áreas rurais. O sistema monofásico é bastante utilizado em aplicações domésticas e frequentemente alimenta cargas com elevada não linearidade.

Como anteriormente mencionado, a alimentação dos inversores do FAP pode se dar tanto por fonte de corrente quanto por elementos armazenadores de energia. A figura 22 mostra um FAP conectado a um sistema monofásico a dois fios, utilizando-se inversores do tipo fonte de tensão.

Figura 22 – FAP conectado a um sistema monofásico a dois fios.

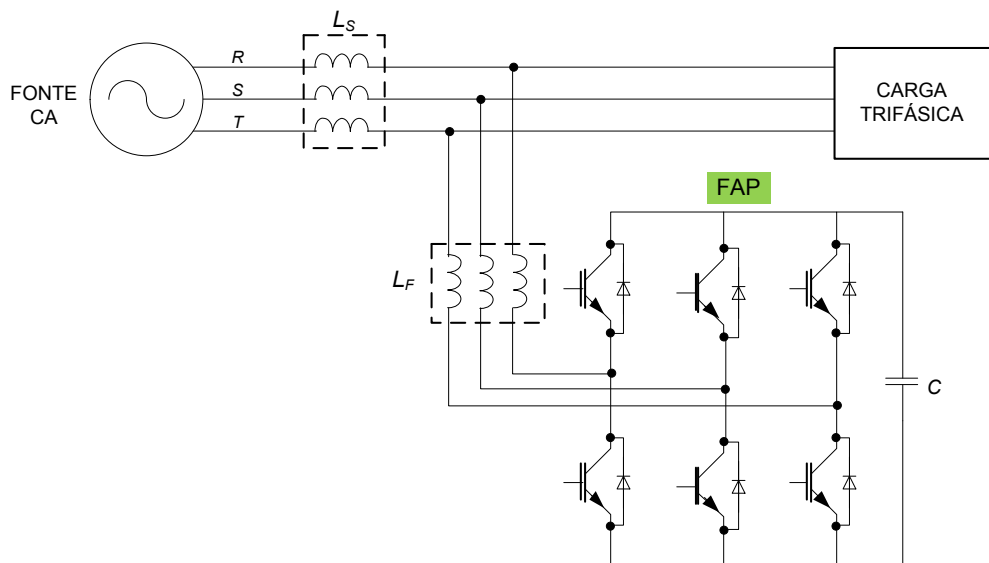


Fonte: Adaptado de Omori (2007).

O sistema trifásico a três fios é geralmente aplicado à alimentação de cargas trifásicas equilibradas, como por exemplo, motores trifásicos e retificadores trifásicos (usados em variadas aplicações, como por exemplo, os variadores de velocidade para motores).

Normalmente, nos sistemas trifásicos a três fios os FAPs são usados a fim de compensar as harmônicas de corrente e o fator de potência da rede elétrica. A figura 23 ilustra um FAP trifásico a três fios (que utiliza um inversor do tipo fonte de tensão - VSI) conectado à rede elétrica.

Figura 23 – FAP a três fios conectado a um sistema trifásico.



Fonte: Adaptado de Omori (2007).

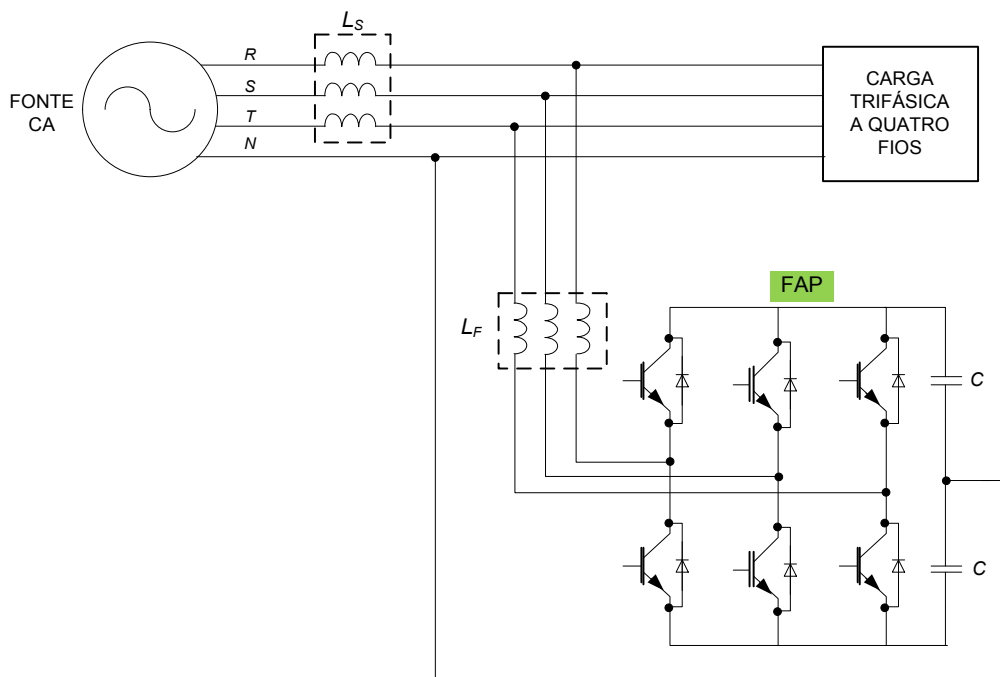
Residências, estabelecimentos comerciais e até mesmo pequenas indústrias são normalmente alimentadas em baixa tensão por meio de sistemas trifásicos a quatro fios. Nessas instalações, a principal característica é a possibilidade de distribuir a potência nas três fases disponíveis no sistema elétrico, alimentar cargas trifásicas de baixa potência e alimentar cargas monofásicas entre fase e neutro (OMORI, 2007). Logo, o que difere os sistemas de distribuição trifásicos a três e a quatro fios é o emprego do fio neutro como condutor carregado.

Nessa perspectiva, o FAP pode ser empregado tanto para compensação das indesejáveis correntes de neutro e de desequilíbrios de corrente, quanto para a compensação de potência reativa e de harmônicas de corrente.

Há duas topologias para o posicionamento do capacitor no inversor do FAP. A primeira é conhecida pela utilização de capacitores em derivação no barramento de corrente contínua, sendo essa configuração conhecida como *split capacitor*, podendo ser vista em

maiores detalhes na referência (OMORI, 2007). Nessa topologia, a corrente no neutro circula através do barramento de corrente contínua dividida por dois capacitores de elevada capacitância. Nessa configuração, as componentes harmônicas *triplens* circulam através dos capacitores. A maior vantagem do emprego dessa topologia está na economia gerada pela utilização de um número reduzido de chaves eletrônicas. Em contrapartida, as principais desvantagens estão na necessidade de elevadas capacitâncias no barramento de corrente contínua e na complexidade e esforço do sistema de controle para manter equilibrada a carga entre os capacitores. A figura 24 ilustra a configuração *split capacitor*.

Figura 24 – FAP *split capacitor* conectado a um sistema trifásico a quatro fios.

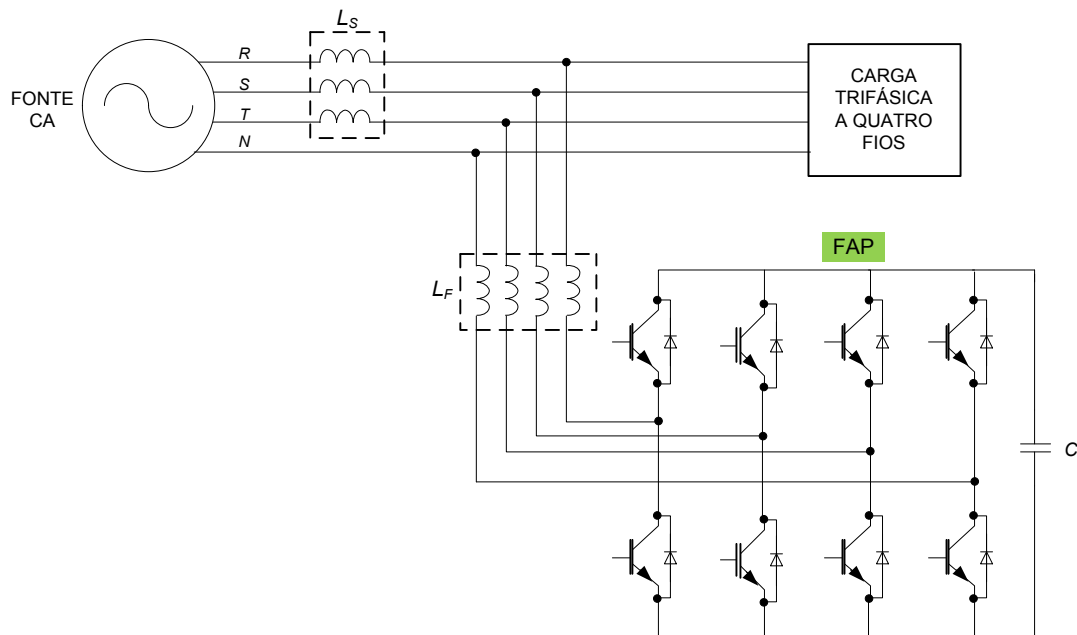


Fonte: Adaptado de Omori (2007).

A segunda topologia possível para sistemas trifásicos a quatro fios é conhecida como inversor a quatro braços. Para essa configuração, o quarto braço é utilizado unicamente para a circulação da corrente de neutro através do FAP. As vantagens em comparação à topologia *split capacitor* estão no menor esforço de corrente no capacitor do barramento de corrente contínua e no sistema de controle que possibilita um desempenho dinâmico do controle de tensão e de corrente do filtro. A principal desvantagem está no emprego de um número superior de chaves semicondutoras, fato que eleva os custos com materiais e torna o sistema de controle mais complexo. A figura 25 ilustra a topologia com o inversor a quatro braços.



Figura 25 – FAP de quatro braços conectado a um sistema trifásico a quatro fios.



Fonte: Adaptado de Omori (2007).

### 3.7 ESTRATÉGIA DE CONTROLE – TEORIA P-Q

A „Teoria Geral da Potência Reativa Instantânea em Sistemas Trifásicos“ ou ainda, genericamente, designada por „Teoria p-q“ foi proposta por Akagi et. al.. em 1983, e estendida por Watanabe e Aredes (WATANABE, 1998) para sistemas trifásicos a quatro fios, possibilitando a análise em regime transitório e permanente das potências ativa e reativa de um sistema elétrico.

A teoria p-q é um dos muitos métodos que podem ser utilizados no controle de filtros ativos paralelo e série (AFONSO; COUTO; MARTINS, 2000b), sendo que, normalmente, os algoritmos de controle baseados na teoria p-q atuam sobre valores instantâneos de tensões e correntes. No entanto, na análise apresentada a seguir, considera-se um sistema operando em regime permanente puramente senoidal. Esse procedimento tem por finalidade demonstrar a representação fasorial das grandezas elétricas e das componentes simétricas, visando uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos.

A equação (21) representa a transformação das tensões do sistema estacionário trifásico  $R-S-T$  para o eixo  $\alpha-\beta-0$ , onde  $V_R$ ,  $V_S$  e  $V_T$  representam as tensões de fase do circuito. Essa transformação é também conhecida como Transformada de Clarke.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} \quad (21)$$

De forma análoga, a transformação das correntes do sistema trifásico  $R-S-T$  para o eixo  $\alpha-\beta-0$  é dado pela expressão (22):

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} \quad (22)$$

Os valores instantâneos das potências da teoria p-q podem então ser calculados a partir dos valores das tensões e correntes tomando como referência os eixos  $\alpha-\beta-0$ .

A potência real instantânea  $p$  pode ser convenientemente representada por meio dos seus valores médio e oscilantes, conforme a expressão a seguir:

$$p = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta = \bar{p} + \tilde{p} \quad (23)$$

Sendo:

$\bar{p}$  - o valor médio da potência real instantânea que corresponde à energia transferida da fonte para a carga por unidade de tempo, através dos eixos  $\alpha-\beta$ , ou seja, pelas fases do sistema trifásico.

$\tilde{p}$  - o valor alternado da potência real instantânea que corresponde à energia por unidade de tempo trocada entre fonte e carga, de uma forma oscilante, ou seja, a fonte fornece determinada parcela de energia, que logo é devolvida para a carga através das fases do sistema.

A componente  $q$ , apresentada na expressão (24), representa a potência imaginária instantânea e corresponde a uma energia por unidade de tempo trocada entre as fases do sistema e não contribui para qualquer transferência de energia entre a fonte e a carga.

$$q = v_\alpha \cdot i_\beta - v_\beta \cdot i_\alpha = \bar{q} + \tilde{q} \quad (24)$$

Sendo:

$\bar{q}$  - o valor médio da potência imaginária instantânea que em alguns casos corresponde à potência reativa trifásica convencional.

$\tilde{q}$  - o valor oscilatório da potência imaginária instantânea.

A potência instantânea de sequência zero  $p_o$ , apresentada na equação (25), corresponde à energia transferida da fonte para a carga por unidade de tempo através das componentes de sequência zero das tensões e das correntes. No sistema elétrico, é transferida por uma ou mais fases e pelo neutro. Assim como nas potências anteriormente apresentadas, também pode ser representada por meio de uma componente média e uma oscilatória.

$$p_o = \bar{p}_o + \tilde{p}_o \quad (25)$$

Onde:

$\bar{p}_o$  - o valor médio da potência instantânea de sequência zero.

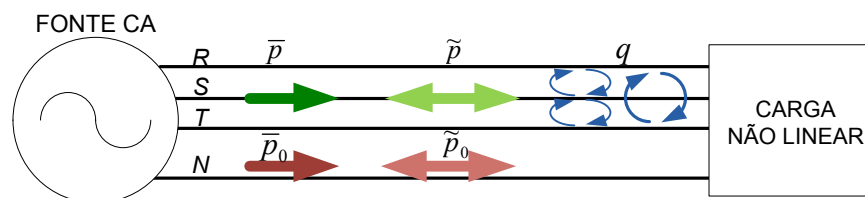
$\tilde{p}_o$  - o valor oscilatório da potência instantânea de sequência zero.

Finalmente, destaca-se que a soma da potência instantânea  $p$  com a potência instantânea  $p_o$  é igual à potência ativa instantânea trifásica total  $p_{3\phi}$ , como mostrado na equação (26).

$$p_{3\phi} = v_R \cdot i_R + v_S \cdot i_S + v_T \cdot i_T = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta + v_o \cdot i_o = p + p_o \quad (26)$$

A figura 26 ilustra, de forma geral, o fluxo das potências definidas na teoria p-q no suprimento de uma carga genérica.

Figura 26 – Fluxo de potências baseado na teoria p-q.



Fonte: Adaptado de Afonso (2001).

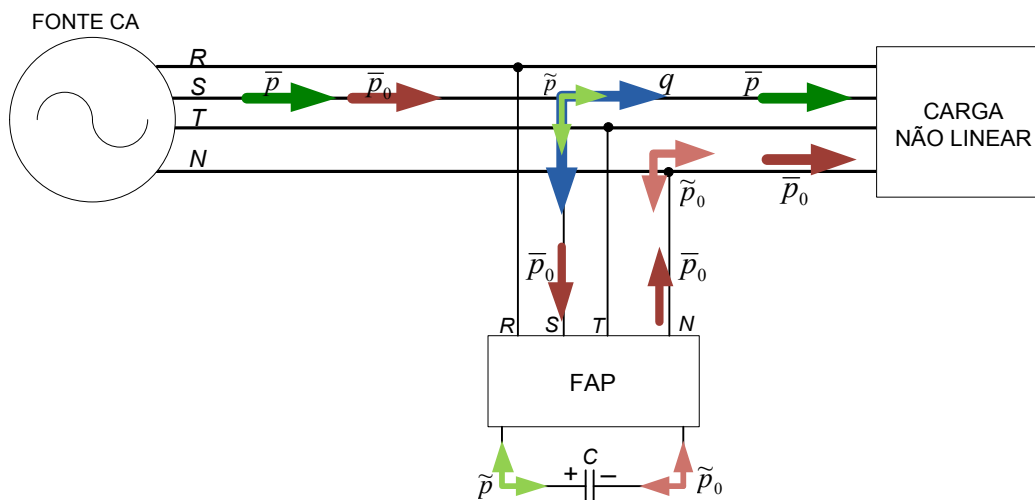
De todas as potências ilustradas, apenas o valor médio da potência real instantânea  $\bar{p}$  e o valor médio da potência de sequência zero  $\bar{p}_o$ , precisam ser fornecidos pela fonte de alimentação, pois somente essas componentes de potência realizam, efetivamente, trabalho junto à carga. As demais potências estão relacionadas com a presença de harmônicas, desequilíbrios e energia reativa, notadamente,  $\tilde{p}$ ,  $\tilde{p}_o$  e  $q$ . Essas potências podem ser compensadas com a utilização de um filtro ativo paralelo (AFONSO; SILVA; MARTINS, 2001).

A topologia de um filtro ativo paralelo com quatro braços é utilizada em sistemas trifásicos com fio neutro, e tem ampla aplicação. Pode ser utilizada para compensar

harmônicas, corrigir fator de potência e prover o balanceamento das correntes de carga, mesmo com carregamentos monofásicos.

A figura 27 ilustra esquematicamente o fluxo das potências ativas e reativas pelo sistema elétrico, compensadas por um filtro ativo de quatro braços, próprio para sistemas a quatro fios.

Figura 27 – Compensação das potências  $q$ ,  $\tilde{p}$ ,  $\bar{p}_0$  e  $\tilde{p}_0$  com o uso de um FAP de quatro braços.



Fonte: Adaptado de Afonso (2000b).

Observa-se que com a atuação do FAP as potências  $\tilde{p}$  e  $\tilde{p}_0$  deixam de ser trocadas entre a fonte e a carga e passam a ser trocadas entre a carga e o filtro ativo paralelo, que continuamente armazena e libera potência para compensar essas potências oscilatórias (AFONSO; PINTO; GONÇALVES, 2013).

### 3.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada uma visão geral do funcionamento de filtros ativos de potência. Inicialmente, foram apresentados os princípios básicos do funcionamento de um filtro ativo teoricamente ideal.

Em seguida, foram apresentados os critérios utilizados na classificação dos filtros ativos. Esses critérios fundamentam-se no nível de potência a ser processado, nas técnicas de controle e no tipo de sistema ao qual o mesmo conecta-se.

Foram expostos dois tipos de inversores (fonte de corrente e fonte de tensão) utilizados na construção de filtros ativos. A operação de ambos foi relatada e a alternativa do

inversor de fonte de tensão, VSI, foi destacada como dominante pelo fato de apresentar menor custo e tamanho, além de possibilitar o uso em configurações multiníveis.

Discorreu-se, com ênfase especial, sobre a estrutura do filtro ativo paralelo. Esse dispositivo é um dos escolhidos como objeto de análise deste estudo. A causa que determinou a escolha dessa topologia foi o fato de o mesmo ser o mais utilizado na eliminação de correntes harmônicas, compensação de potência reativa e balanceamento de correntes desequilibradas.

Finalmente, foi abordada a teoria p-q, uma metodologia que permite o controle de filtros ativos confiável e amplamente utilizada, que possibilita determinar as potências compensatórias de um sistema, a partir de valores instantâneos de tensões e correntes.



## **4 MODELAGEM PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DO ARRANJO HÍBRIDO DE FILTROS**

### **4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Sistemas de distribuição de baixa tensão a quatro fios que alimentam cargas com características não lineares, como computadores, retificadores monofásicos não controlados e outras, apresentam normalmente correntes expressivas no condutor neutro. Estudos específicos indicaram que as correntes no neutro são concentradas em sequência zero. Essa condição estabelece o denominado carregamento de neutro, com correntes de valores elevados, que podem ser até superiores às correspondentes correntes de linha.

Nesse contexto, os equipamentos eletromagnéticos se apresentam como uma alternativa promissora, direcionada exclusivamente à filtragem das preconizadas componentes homopolares, tanto das harmônicas quanto mesmo da fundamental. A aplicação desses dispositivos pode ser tanto para uso isolado como para uso combinado, compondo sistemas híbridos constituídos por filtros passivos e ativos. Esses equipamentos constituem-se de arranjos eletromagnéticos e dispensam emprego de capacitores e outros recursos habitualmente empregados em outros dispositivos, a exemplo de filtros sintonizados. Por essa razão, esses equipamentos tornam-se atrativos sob o ponto de vista econômico e proporcionam uma solução mais robusta para os esquemas de filtragem harmônica (BELCHIOR et al., 2006).

Ainda que para as cargas não lineares supramencionadas em sistemas de distribuição a quatro fios, a expressão de harmônicas de sequência zero seja dominante, há ainda parcelas consideráveis das harmônicas de sequências positiva e negativa. Essas harmônicas, assim como as de sequência zero, se apresentam igualmente nocivas ao sistema. A título de exemplo, considerando-se um motor trifásico, as harmônicas de sequência positiva tendem a fazer o motor girar no mesmo sentido da componente fundamental, provocando então, um somatório dos efeitos das correntes harmônicas e fundamental, causando sobrecorrente nos seus enrolamentos. Em suma, essas harmônicas provocam aquecimentos indesejados em motores, transformadores, condutores e outros equipamentos (RODRIGUES, 2009). Por outro lado, as harmônicas de sequência negativa tendem a fazer o motor girar em sentido contrário ao giro produzido pela fundamental, causando frenagem e conseqüentemente aquecimentos. Logo, para filtragem dessas harmônicas se faz necessário um arranjo que seja capaz de compensá-las, a exemplo dos filtros ativos.

Em síntese, o princípio de funcionamento dos FAPs baseia-se na injeção de correntes com fase oposta às correntes harmônicas, sendo, portanto, inerentemente adaptativos. Considerando-se os casos a serem abordados nesta tese e levando em consideração que ficará a cargo do FAP a compensação apenas das harmônicas de sequências positiva e negativa, um inversor de apenas três braços é suficiente para prover as correntes compensatórias de um filtro ativo de forma a garantir a correção das distorções harmônicas das correntes de alimentação. Para essa configuração, o FAP possui um sistema de controle mais simples se comparado à configuração de quatro braços.

Levando, portanto, em consideração todas as funcionalidades do FAP de três braços e do supressor eletromagnético (filtro e bloqueador), será discutida nos itens subsequentes deste capítulo a modelagem de um novo arranjo híbrido de filtragem que une as potencialidades dos dispositivos supramencionados no sentido de obter a compensação de distorções harmônicas de corrente em sistemas elétricos.

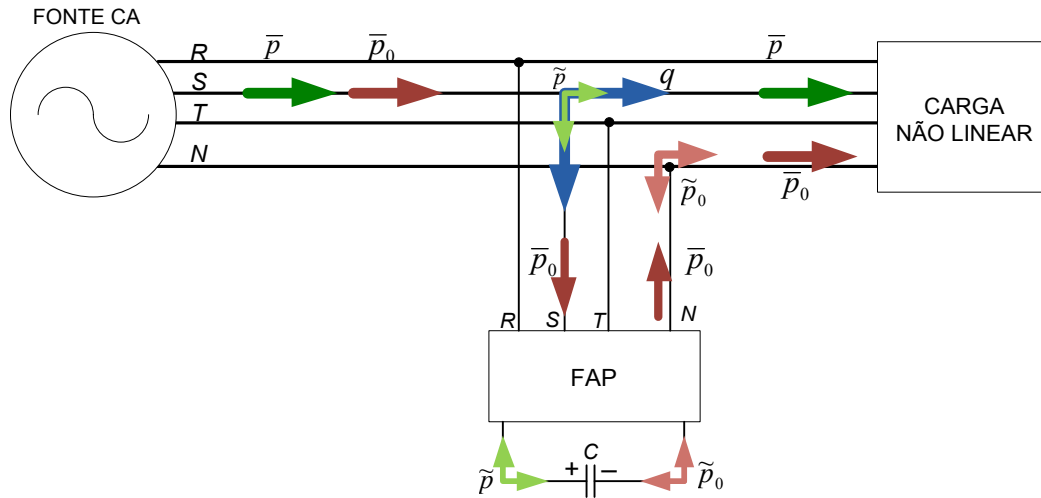
#### 4.2 ARRANJO HÍBRIDO DE FILTRAGEM HARMÔNICA

Considerando-se a expectativa da aplicação de estruturas compensadoras em sistemas elétricos a quatro fios com cargas monofásicas, aspirou-se a possibilidade de um novo arranjo de compensação harmônica que incorpore simultaneamente filtragem ativa e passiva e, que apresente todas as funcionalidades, no que tange a compensação harmônica, de um filtro ativo de quatro braços. Nesta perspectiva, vislumbra-se a utilização conjunta de um filtro ativo de três braços, responsável pela filtragem das componentes de sequências positiva e negativa e de um supressor eletromagnético, ao qual é atribuída a função de drenar componentes de sequência zero. A título de comparação, feita a seguir, a figura 28 ilustra novamente o fluxo de potências pelo sistema elétrico, compensadas por um FAP a quatro braços.

Nessas condições, à luz da teoria das potências complexas instantâneas, o novo fluxo de potências se fará conforme ilustrado na figura 29. As parcelas  $\overline{p}_0$  e  $\widetilde{p}_0$ , relacionadas com as componentes de sequência zero ficam drenadas pela ação do supressor eletromagnético. As potências relacionadas com a parte oscilante da potência ativa  $\tilde{p}$ , bem como a parcela total da potência reativa instantânea  $q$ , são compensadas pelo filtro ativo de três braços, mesmo que haja um carregamento monofásico. Observa-se que, idealmente, sob a ação conjunta dos dois dispositivos, somente a parcela real da potência instantânea será proveniente da fonte de alimentação.

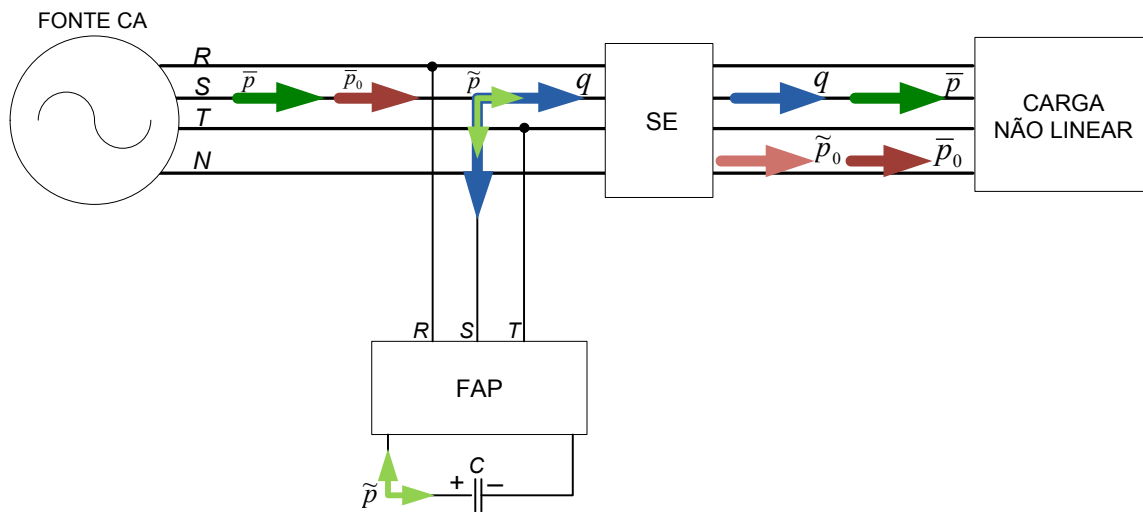


Figura 28 – Compensação das potências  $q$ ,  $\tilde{p}$ ,  $\bar{p}_0$  e  $\tilde{p}_0$  com o uso de um FAP de quatro braços.



Fonte: Adaptado de Afonso (2000b).

Figura 29 – Fluxo das potências p-q com o uso do arranjo híbrido de filtragem.



Fonte: Dados da autora.

Para essa configuração, a compensação harmônica do filtro ativo paralelo se dará como em um sistema trifásico a três fios (CZARNECKI, 2006), uma vez que a responsabilidade do quarto fio é transferida para o supressor eletromagnético. Logo, a transformada de Clarke das tensões e corrente de fase para as coordenadas  $\alpha$  e  $\beta$  são expressas nas equações (27) e (28).

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} \quad (28)$$

Tendo as tensões e corrente transformadas para as coordenadas  $\alpha$  e  $\beta$ , a potência ativa instantânea (real) e a potência reativa instantânea (imaginária) são definidas pelas equações (29) e (30), respectivamente.

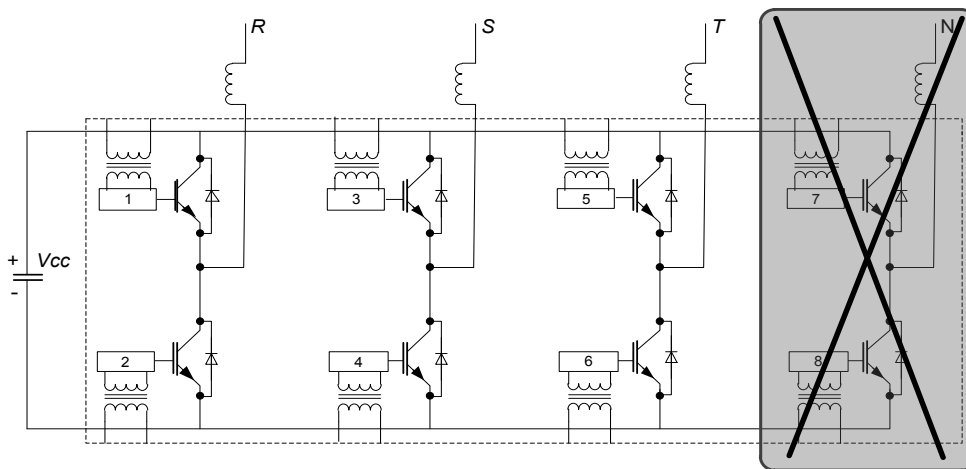
$$p = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta = \bar{p} + \tilde{p} \quad (29)$$

$$q = v_\alpha \cdot i_\beta - v_\beta \cdot i_\alpha \quad (30)$$

Como destacado anteriormente, os dispositivos eletromagnéticos são estruturas passivas simples e robustas, para os quais o conhecimento de projetos e aplicações já se encontram dominados e com custos bem definidos. Considerando-se o mesmo nível de potência a ser processado, supõe-se que os custos dos dispositivos eletromagnéticos sejam inferiores aos das chaves eletrônicas. Essa relação pode ser ainda mais favorável levando em conta os custos relacionados ao processamento de sinais e controle das chaves eletrônicas.

Dessa forma, sob o ponto de vista topológico e de operação, todas as funcionalidades de um filtro ativo de quatro braços se farão com o uso do arranjo híbrido de filtragem, composto por um filtro ativo de três braços e um supressor eletromagnético. A figura 30 ilustra, simplificada, as alterações relativas ao filtro ativo, onde a parte destacada é o quarto braço do filtro ativo que será substituído pela incorporação das estruturas eletromagnéticas.

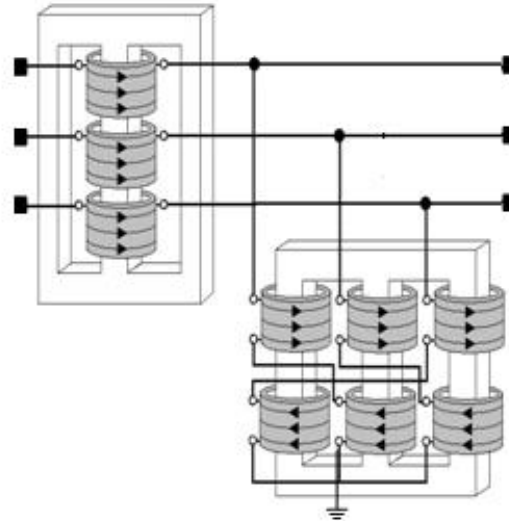
Figura 30 – Alteração da topologia do filtro ativo.



Fonte: Adaptado de Afonso et al. (2000a).

A figura 31 ilustra o arranjo eletromagnético incorporado ao sistema de compensação harmônica para substituição do quarto braço do filtro ativo de potência.

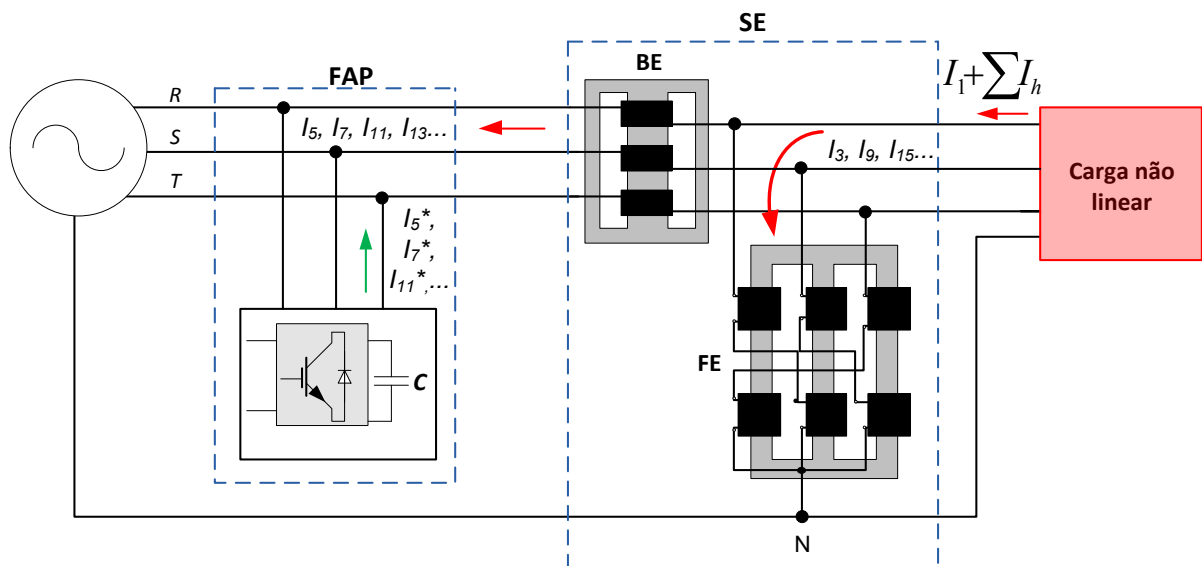
Figura 31 – Estrutura eletromagnética incorporada.



Fonte: Dados da autora.

Logo, o novo arranjo híbrido de filtragem harmônica proposto será conectado a um sistema elétrico como sugere a figura 32.

Figura 32 – Arranjo híbrido de filtragem harmônica proposto.



Fonte: Dados da autora.

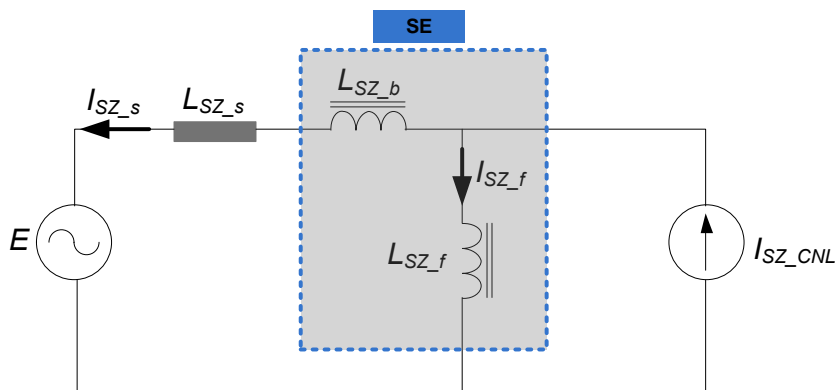
### 4.3 FUNDAMENTAÇÃO FÍSICA DA COMPENSAÇÃO HARMÔNICA

Visando reforçar o entendimento relacionado à fundamentação física da compensação harmônica proporcionada pelo novo arranjo híbrido de filtros proposto, segue uma breve explicação no que tange à fundamentação da compensação harmônica proporcionada pelo supressor eletromagnético de sequência zero e pelo FAP, respectivamente.

#### 4.3.1 FILTROS PASSIVOS

Observando-se o supressor eletromagnético mostrado na figura 31 (seção 4.2), fica claro que há conexão entre as impedâncias de sequência zero do filtro (em paralelo),  $L_{SZ_f}$ , e do bloqueador (série),  $L_{SZ_b}$ , como propõe o circuito equivalente simplificado de sequência zero ilustrado na figura 33.

Figura 33 – Circuito equivalente simplificado.



Fonte: Dados da autora.

A equação (15) (capítulo 2) relaciona as indutâncias mútuas com a indutância de acoplamento entre as bobinas principal e auxiliar de um mesmo braço magnético do filtro de sequência zero. Nesta lógica, a equação (31) mostra o fator de conformidade do filtro eletromagnético,  $\xi_f$ , denominação atribuída neste trabalho para destacar as indispensáveis similaridades construtivas dos enrolamentos das bobinas principal e auxiliar de uma mesma coluna magnética.

$$\xi_f = \frac{L_{Af}}{L_{Pf}} \quad (31)$$

Considerando-se a indutância característica do filtro dada pela equação (32):

$$L_f = L_{Pf} = L_{Af} \quad (32)$$

Então, a indutância de sequência zero do filtro é dada por:

$$L_{SZ\_f} = L_f \left( 1 - \lambda_f \sqrt{\xi_f} \right) \quad (33)$$

Tratando-se de bloqueadores eletromagnéticos, a equação (20) relaciona as indutâncias próprias e indutâncias mútuas por meio de um fator de acoplamento. Novamente, assim como para o caso do filtro e, tendo em vista ressaltar a similaridade construtiva dos enrolamentos entre as bobinas de cada uma das três fases ( $R$ ,  $S$  e  $T$ ) do bloqueador, o fator de conformidade,  $\xi_b$ , é mostrado na equação:

$$\xi_b = L_R / L_S / L_T \quad (34)$$

A equação (35) mostra a indutância característica do bloqueador:

$$L_b = L_R = L_S = L_T \quad (35)$$

Tem-se então, a indutância de sequência zero do bloqueador:

$$L_{SZ\_b} = L_b \left( 1 + 2\lambda_b \sqrt{\xi_b} \right) \quad (36)$$

Considerando, por simplicidade, apenas as indutâncias e tomando como base o princípio do divisor de corrente, a parcela de corrente de sequência zero produzida pela carga,  $I_{SZ\_f}$ , e desviada para o filtro pode ser determinada pela seguinte equação:

$$I_{SZ\_f} = \frac{L_{SZ\_S}}{(L_{SZ\_S} + L_{SZ\_b}) + L_{SZ\_f}} \cdot J_{SZ\_NL} \quad (37)$$

Sendo:

$J_{SZ\_NL}$  - Corrente de sequência zero gerada pela carga não linear;

$I_{SZ\_f}$  - Corrente de sequência zero através do filtro paralelo;

$L_{SZ\_S}$  - Indutância de sequência zero do sistema de suprimento;

A equação (37) mostra que quanto menor a indutância de sequência zero do filtro, em relação à mesma indutância do sistema de alimentação e a do bloqueador, maior será sua eficácia em drenar correntes harmônicas de sequência zero.

Por outro lado, analogamente, a corrente resultante na fonte,  $I_{SZ\_S}$ , pode ser calculada por:

$$I_{SZ\_S} = \frac{L_{SZ\_f}}{L_{SZ\_f} + (L_{SZ\_b} + L_{SZ\_S})} \cdot J_{SZ\_NL} \quad (38)$$

A equação (38) pode ainda ser reescrita da seguinte maneira:

$$\frac{I_{SZ_S}}{I_{SZ_{CNL}}} = \frac{L_f(1 - \lambda_f \sqrt{\xi_f})}{L_f(1 - \lambda_f \sqrt{\xi_f}) + L_b(1 + 2\lambda_b \sqrt{\xi_b}) + (V_n^2 / \omega S_{cc})} \quad (39)$$

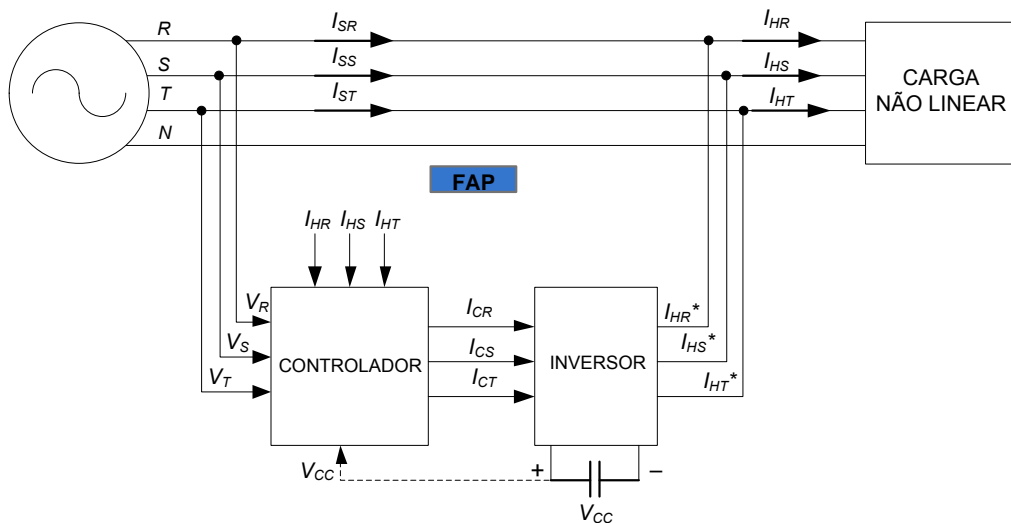
A equação (39) reafirma que o fluxo da corrente no sistema de suprimento será tão menor quanto maior for a indutância de sequência zero do sistema e do bloqueador quando comparada com a indutância de sequência zero do filtro. Dessa forma, destaca-se ainda que, a eficácia do sistema na compensação harmônica pode ser comprometida pelas características da rede à qual o mesmo encontra-se instalado.

#### 4.3.2 FILTRO ATIVO PARALELO

A teoria p-q permitiu a implementação do sistema de controle do filtro ativo paralelo de uma forma simples e eficaz, uma vez que os cálculos consistem apenas em operações algébricas que podem ser realizadas com aritmética do tipo inteiro (AFONSO; SILVA; MARTINS, 2001).

A figura 34 apresenta o esquema elétrico do filtro ativo em questão neste trabalho. Basicamente é composto por um inversor e pelo sistema de controle (controlador). A partir da medida dos valores instantâneos das tensões das fases ( $V_R$ ,  $V_S$  e  $V_T$ ) e das correntes de carga ( $I_{HR}$ ,  $I_{HS}$  e  $I_{HT}$ ), o controlador calcula as correntes de compensação de referência ( $I_{CR}$ ,  $I_{CS}$  e  $I_{CT}$ ) para o inversor. E, finalmente, o inversor produz as correntes de compensação de fator de potência e de compensação harmônica ( $I_{HR}^*$ ,  $I_{HS}^*$  e  $I_{HT}^*$ ) de mesmo modo e em oposição de fase as correntes harmônicas de carga.

Figura 34 – Esquema elétrico do FAP.



Fonte: Adaptado de Afonso; Silva; Martins (2001).

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foi apresentada a proposta para a operação de um arranjo híbrido de filtros para controle da injeção de corrente harmônicas no sistema elétrico. Considerando-se a diversidade da distribuição sequencial das componentes harmônicas de corrente, o arranjo de filtragem é composto por dois filtros passivos e por um FAP. O supressor eletromagnético, composto por dispositivos passivos (filtro e bloqueador) provê caminhos de alta e baixa impedância exclusivamente para as correntes harmônicas triplas, ou seja, as componentes de sequência zero. Já o filtro ativo paralelo é responsável pela compensação das componentes de sequências positiva e negativa por meio da geração de correntes conjugadas às harmônicas. Os parâmetros desses dispositivos podem ser convenientemente ajustados visando obter o desempenho almejado.

Foi apresentada, ainda, a fundamentação física da compensação harmônica proporcionada pelos filtros passivos e pelo filtro ativo paralelo. Logo, sob o ponto de vista topológico, espera-se que a concretização de todas as funcionalidades de um filtro ativo de quatro braços se faça com uso de um filtro híbrido composto por um filtro ativo de três braços e um supressor eletromagnético.





## **5 DIMENSIONAMENTO, ANÁLISE FUNCIONAL DOS DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS E APRESENTAÇÃO DO PROTÓTIPO DO FILTRO ATIVO PARALELO**

### **5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Neste capítulo, são apresentados os requisitos para o dimensionamento dos dispositivos passivos, filtro e bloqueador, que constituem o aqui denominado supressor eletromagnético de componentes de sequência zero. A finalidade dos protótipos construídos é disponibilizar versões reais dos dispositivos eletromagnéticos abordados neste trabalho. Esses dispositivos auxiliarão em estudos experimentais das suas características operacionais e na análise da funcionalidade do sistema híbrido de filtros, que contempla a operação conjunta do supressor eletromagnético e de um filtro ativo paralelo.

A etapa de dimensionamento dos dispositivos eletromagnéticos, apresentada nos itens seguintes, foi desenvolvida no Laboratório do Grupo de Eletrônica de Potência e Energia – GEPE – da Escola de Engenharia da Universidade do Minho (UMinho), Portugal. Neste ambiente, além do dimensionamento, foram estabelecidas diretrizes para a implementação e a realização de ensaios dos protótipos que compõe o supressor eletromagnético.

Outro componente essencial do novo arranjo híbrido de filtragem proposto é o filtro ativo paralelo. Esse equipamento encontra-se em um estágio bastante avançado de implantação no Laboratório do GEPE, onde, inclusive, já existem alguns protótipos construídos. Nessa ótica, no sentido de cumprir a etapa experimental desta tese de doutoramento foi estabelecida uma ação conjunta entre o Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – LQEE e o GEPE.

### **5.2 CONCEPÇÃO FÍSICA DO SUPRESSOR ELETROMAGNÉTICO – DIMENSIONAMENTO E PROJETO**

Além dos aspectos relacionados com o nível de potência a ser processado e a tensão nominal estabelecida, é preciso considerar ainda os demais aspectos construtivos necessários para alcançar a funcionalidade desejada, ou seja, o supressor eletromagnético, composto pela operação conjunta do bloqueador e do filtro de sequência zero. Logo, é fundamental que o projeto confira algumas particularidades topológicas que aumentem e minimizem a impedância equivalente, para sequência zero, necessária para a atuação dos respectivos dispositivos.

Visando, portanto, a investigação experimental do desempenho do supressor eletromagnético de sequência-zero, dois protótipos foram construídos com base na referência

de projetos de transformadores de potência (McLYMAN, 2004). As etapas que compreendem os projetos do filtro e do bloqueador eletromagnéticos estão contidas no Apêndice A.

### 5.2.1 FILTRO ELETROMAGNÉTICO

Para o dimensionamento do filtro eletromagnético, baseado no modelo teórico apresentado no capítulo 2, constata-se que a indutância equivalente de sequência zero tende a um valor mínimo à medida que as bobinas principais e auxiliares sejam similares, sob o ponto de vista das suas indutâncias próprias, e que o acoplamento magnético entre as mesmas se aproxime do ideal.

Com o intuito, portanto, de investigar experimentalmente o desempenho do filtro eletromagnético de sequência zero, um protótipo foi construído levando em consideração as características construtivas e elétricas apresentadas na tabela 7.

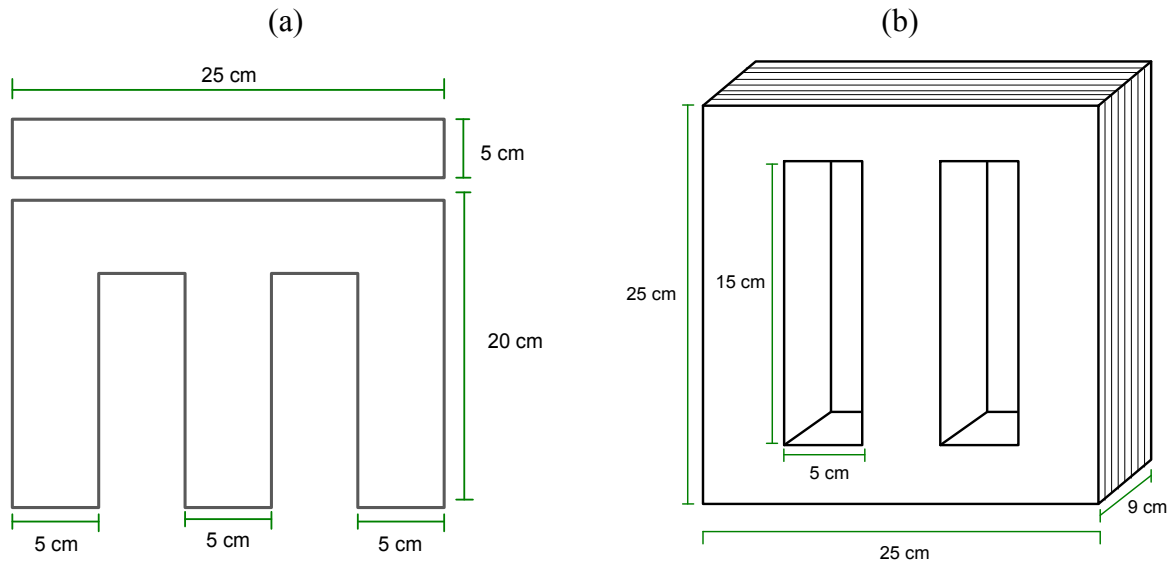
Tabela 7 – Características construtivas e elétricas do protótipo do filtro eletromagnético.

Potência	6,7 kVA
Frequência	50 Hz
Tensão máxima aplicada sobre os enrolamentos	230 V
Corrente máxima sobre os enrolamentos	10 A
Conexão dos enrolamentos	Zig-Zag
Tipo de lâmina	EI Series Trifásica
Material da lâmina	Aço-silício (grãos orientados)
Densidade de fluxo	1,37 T
Seção e material do condutor	4,2mm <sup>2</sup> – cobre esmaltado
Produto das áreas do núcleo magnético	5062,5 cm <sup>4</sup>
Número de espiras	168
Fator de acoplamento entre as bobinas	0,99

Fonte: Dados da autora.

É importante destacar que, para garantir o limite máximo adotado da densidade de fluxo, deve-se considerar a tensão equivalente composta pelas bobinas principal e auxiliar de cada coluna do circuito magnético, as quais são alimentadas por diferentes fases. A figura 35 ilustra a representação física do protótipo em questão.

Figura 35 – Dimensões das lâminas e montagem do núcleo do filtro eletromagnético: (a) Chapas magnéticas; (b) Montagem.



Fonte: Dados da autora.

Como mencionado anteriormente, no capítulo referente ao desenvolvimento teórico, a otimização da funcionalidade do dispositivo como filtro para correntes de sequência zero depende, principalmente, da maximização do acoplamento magnético entre as bobinas principal e auxiliar de um mesmo braço magnético.

Nesse contexto, pretendendo alcançar o melhor acoplamento possível na montagem das bobinas, além da adoção de enrolamentos concêntricos, utilizou-se ainda uma técnica construtiva particular, onde cada espira é composta pelos condutores de cada um dos enrolamentos justapostos.

Em contrapartida, no que se refere às indutâncias equivalentes de sequência positiva e negativa, é conveniente que as mesmas sejam maximizadas para que a interferência do filtro no sistema seja a menor possível.

Por se tratar de um componente propriamente indutivo, o fator predominante nesse aspecto refere-se à manutenção do fator de potência no sistema próximo ao seu valor original após a instalação do filtro (OLIVEIRA; RAVAGNANI; MILANES, 2007a). Além do mais, como pode ser visto em (OLIVEIRA et al., 2006), as impedâncias de sequência positiva e negativa normalmente apresentam altos valores e ainda crescem com o aumento da frequência. A figura 36 mostra fotos do protótipo construído.

Figura 36 – Protótipo do filtro eletromagnético construído: (a) Visão frontal; (b) Visão lateral.



Fonte: Dados da autora.

### 5.2.2 BLOQUEADOR ELETROMAGNÉTICO

Para o dimensionamento do bloqueador eletromagnético, baseado no modelo teórico apresentado no capítulo 2, verifica-se que os acoplamentos entre os enrolamentos das bobinas se aproximam de tal forma que as indutâncias mútuas e próprias se igualam e, conseqüentemente, o dispositivo proporcionará uma alta indutância de sequência zero, bloqueando assim essas componentes harmônicas. Para que haja essa igualdade entre as indutâncias próprias e mútuas há necessidade de um acoplamento ideal, que aumenta a eficiência do bloqueio das componentes de sequência zero e, para as demais componentes, de sequência positiva e negativa, acontece o contrário, pois obtem-se um curto-circuito para as mesmas.

Objetivando a investigação experimental do desempenho do bloqueador eletromagnético de sequência zero, também foi construído um protótipo. As características construtivas e elétricas a serem consideradas na construção do bloqueador são mostradas na tabela 8.

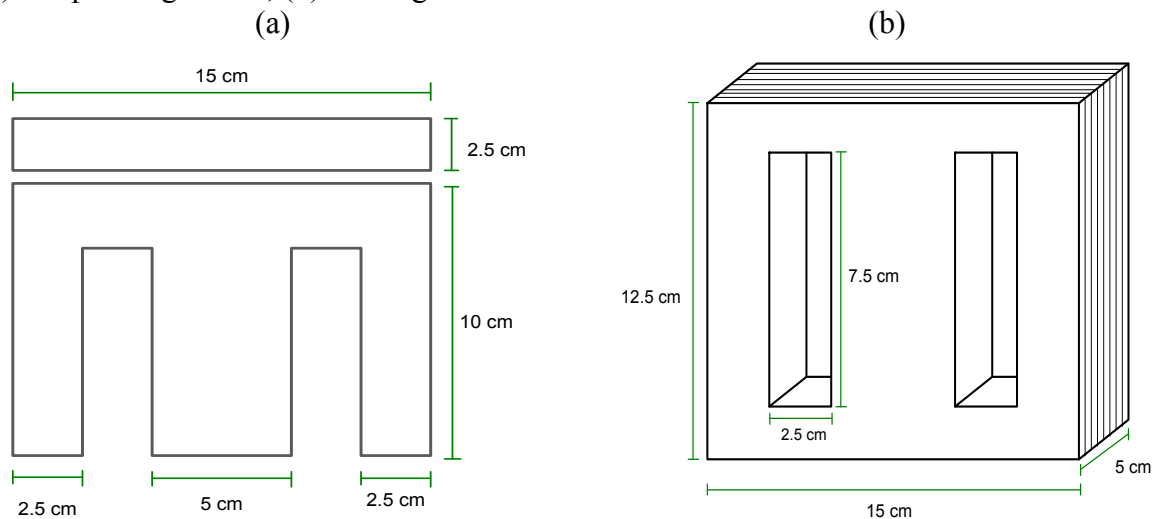
Tabela 8 – Características construtivas e elétricas do protótipo do bloqueador.

Potência	1,1 kVA
Frequência	50 Hz
Tensão máxima sobre os enrolamentos	15 V
Corrente máxima sobre os enrolamentos	22 A
Tipo de lâmina	EI Series Monofásica
Material da lâmina	Aço-silício (grãos orientados)
Densidade de fluxo	1,2 T
Seção e material do condutor	3,3mm <sup>2</sup> – cobre esmaltado
Produto das áreas do núcleo magnético	468,75 cm <sup>4</sup>
Número de espiras	22
Fator de acoplamento entre as bobinas	0,99

Fonte: Dados da autora.

O procedimento e as ponderações apontadas para projeto das bobinas e da seção transversal do núcleo seguem a mesma metodologia utilizada na construção do filtro eletromagnético. A figura 37 ilustra as dimensões das lâminas e a montagem do núcleo do bloqueador.

Figura 37 – Dimensões das lâminas e montagem do núcleo do bloqueador eletromagnético: (a) Chapas magnéticas; (b) Montagem.



Fonte: Dados da autora.

Como já visto no capítulo 2, esse dispositivo é concebido a partir de três bobinas magneticamente acopladas e dispostas sobre um mesmo núcleo constituindo-se, assim, os chamados bloqueadores eletromagnéticos de sequência zero. Para essa configuração, quando

conectados em série com a rede elétrica, apresentam uma alta impedância para as componentes de sequência zero e podem minimizar a circulação das harmônicas “*triplens*”. Para esse dispositivo há possibilidade de operação isolada ou conjunta como dispositivo auxiliar adaptador de impedância para o filtro eletromagnético instalado em sistemas com alto nível de curto-circuito no PAC (DAHONO et al., 2002; CZARNECKI, 1994). A figura 38 mostra imagens do bloqueador eletromagnético construído.

Figura 38 – Protótipo do bloqueador construído: (a) Visão frontal; (b) Visão lateral.



Fonte: Dados da autora.

### 5.3 ENSAIOS DAS CARACTERÍSTICAS DOS DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS






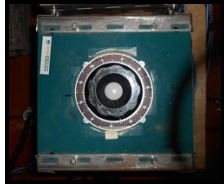
Com o objetivo de investigar as características dos protótipos do filtro e do bloqueador eletromagnéticos, dimensionados e construídos conforme os critérios anteriormente descritos, foram realizados alguns ensaios experimentais. Esse objetivo foi alcançado por meio de comparações entre as impedâncias sequenciais dos dispositivos, com alimentação de tensões de sequências positiva e zero. É importante mencionar que não foram realizadas medições com tensões de sequência negativa, visto que, nessa situação, os protótipos comportam-se exatamente da mesma forma que o de sequência positiva.

#### 5.3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os procedimentos experimentais para levantamento das características operacionais supracitadas foram viabilizados a partir dos materiais e equipamentos disponíveis no Grupo de Eletrônica de Potência e Energia da UMinho. No ensaio de tensão de sequência zero utilizou-se apenas um transformador conectado a um único variador de tensão monofásico, sendo ambos monofásicos. Essa configuração cria uma alimentação de tensões homopolares às três fases do sistema. Já para o ensaio com tensão de sequência positiva, utilizaram-se três

transformadores monofásicos conectados a um variador de tensão trifásico, a partir do qual foi possível definir as amplitudes para cada uma das tensões fase-neutro. Para captar as formas de onda das tensões e correntes do sistema foi utilizado o *Fluke 434 Power Quality Analyzer*<sup>®</sup>, o qual opera já calibrado e padronizado segundo a norma europeia de qualidade da energia EN50160. As especificações básicas dos principais equipamentos e recursos para medição de sinais estão listadas no quadro 1.

Quadro 1 – Materiais e equipamentos utilizados.

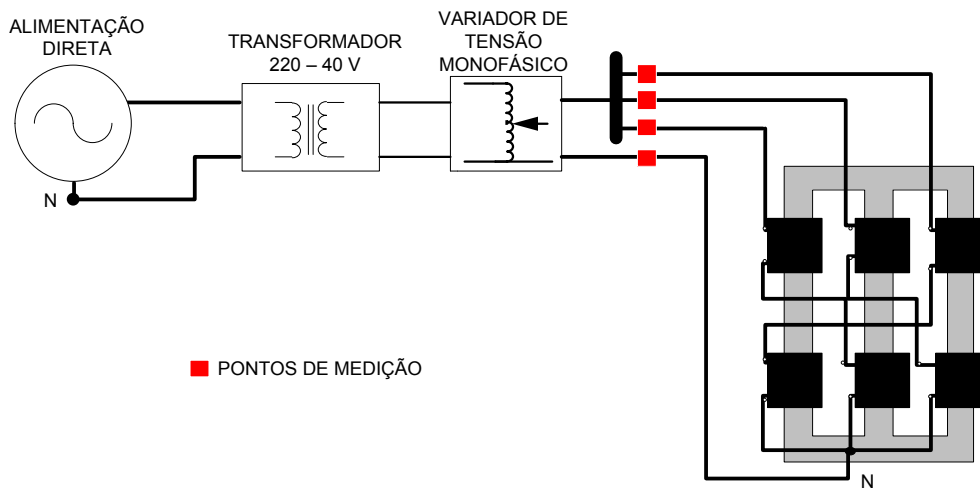
	<p><b>Equipamento de aquisição de dados:</b> <i>Fluke 434 Power Quality Analyzer</i><sup>®</sup></p> <p><b>Software de processamento de dados:</b> <i>FlukeView</i><sup>®</sup> <i>Power Quality Analyser</i> Versão 3.34</p>
	<p><b>Pinças de corrente:</b> Fluke i400s pinça CA. Duas faixas: 40 A e 400 A.</p>
	<p><b>Sensores LEM 100-P</b> Corrente máxima: 100 A Número de voltas do cabo: 4 Corrente de medição máxima 25 A</p>
	<p><b>Transformador monofásico:</b> Potência nominal de 11kVA Frequência 50/ 60Hz Tensão primária: 230 V CA Tensão secundária: 25/ 75/ 225 V CA</p>
	<p><b>Variador de tensão trifásico:</b> Potência nominal de 3,3 kVA Frequência 50/ 60Hz Tensão de Entrada: 230 V CA</p>
	<p><b>Variador de tensão monofásico:</b> Potência nominal de 6,5 kVA Frequência 50/ 60Hz Tensão de Entrada: 230 V CA</p>

Fonte: Dados da autora.

### 5.3.2 FILTRO ELETROMAGNÉTICO

Para analisar as impedâncias de seqüências zero do filtro eletromagnético, o arranjo experimental ilustrado na figura 39 foi implementado.

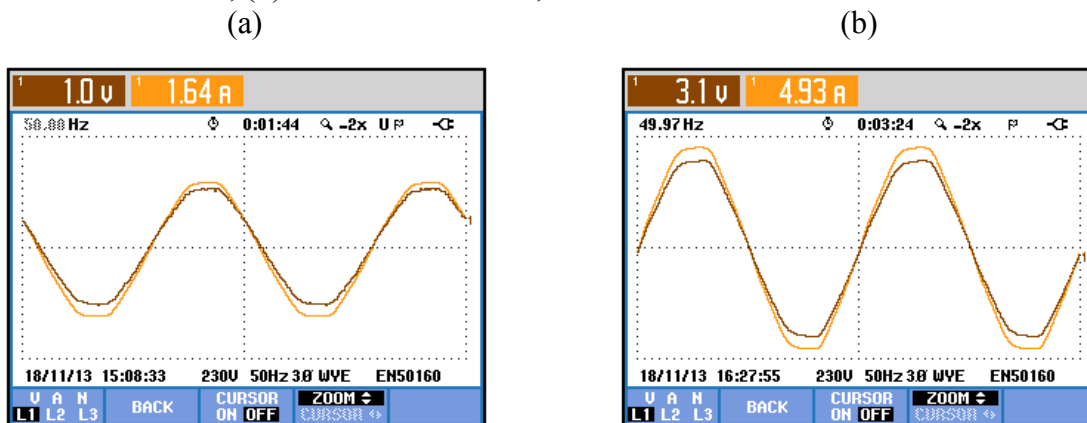
Figura 39 – Arranjo experimental para avaliação da impedância de seqüência zero do filtro eletromagnético.



Fonte: Dados da autora.

O experimento foi realizado aplicando-se, inicialmente, sobre o dispositivo eletromagnético, tensões de seqüência zero na frequência natural do sistema de Portugal, 50 Hz. Os resultados para dois diferentes níveis de tensão e corrente são apresentados na figura 40.

Figura 40 – Tensões e correntes de seqüência zero do ensaio do filtro eletromagnético: (a) Nível de tensão a 1 V; (b) Nível de tensão a 3,1 V.



Fonte: Dados da autora.

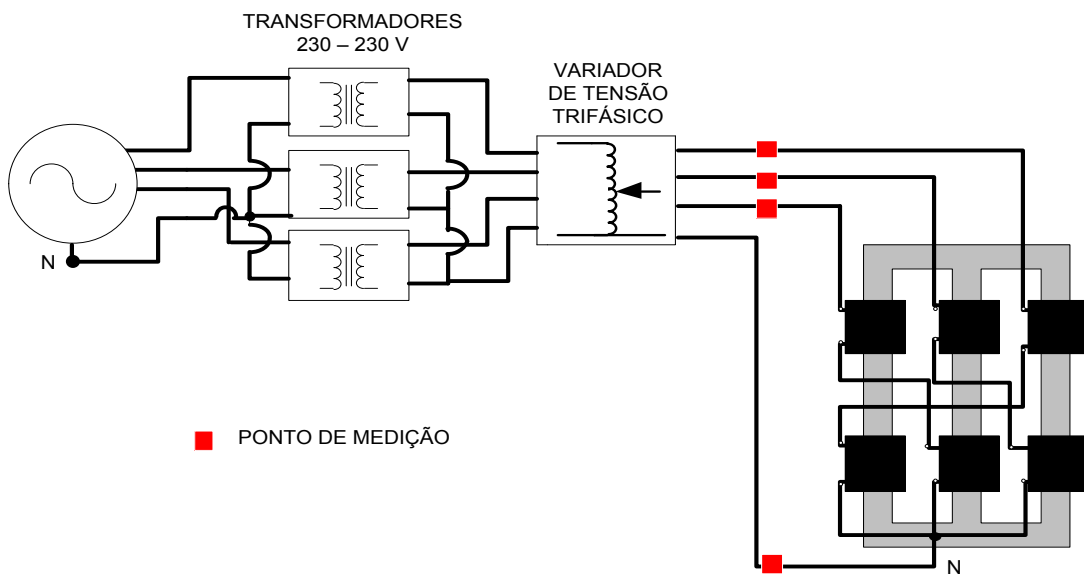
O valor da impedância de seqüência zero para esta análise foi obtido pela equação (40) e corresponde a um valor de aproximadamente  $0,6 \Omega$ , com natureza praticamente resistiva.



$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0} \tag{40}$$

Para possibilitar a comparação entre as impedâncias sequenciais do filtro, foi realizado um novo experimento, aplicando-se agora, sobre o dispositivo eletromagnético, tensões de sequência positiva para diferentes níveis de tensão. O arranjo experimental ilustrado na figura 41 foi implementado.

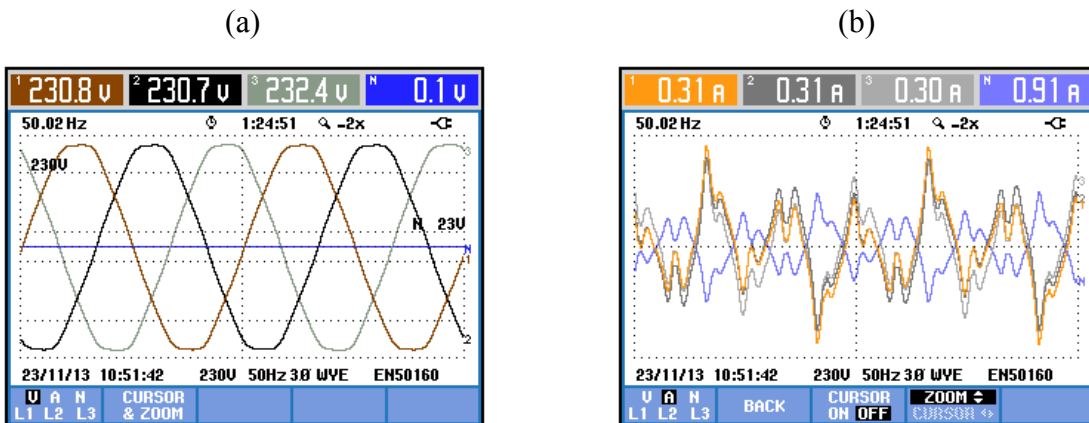
Figura 41 – Arranjo experimental para avaliação da impedância de sequência positiva do filtro eletromagnético.



Fonte: Dados da autora.

Os resultados colhidos em medições são apresentados na figura 42.

Figura 42 – Tensões e correntes de sequência positiva do filtro eletromagnético: (a) Tensões de alimentação trifásicas; (b) Correntes trifásicas.



Fonte: Dados da autora.

Para cada nível de tensão investigado, foram calculadas as médias entre os valores medidos nas fases. O valor da impedância de sequência positiva calculado pela equação (41) é de aproximadamente 765  $\Omega$ . Quanto às impedâncias, como previsto teoricamente, as de sequência positiva e negativa apresentam valores substancialmente maiores que as de sequência zero.

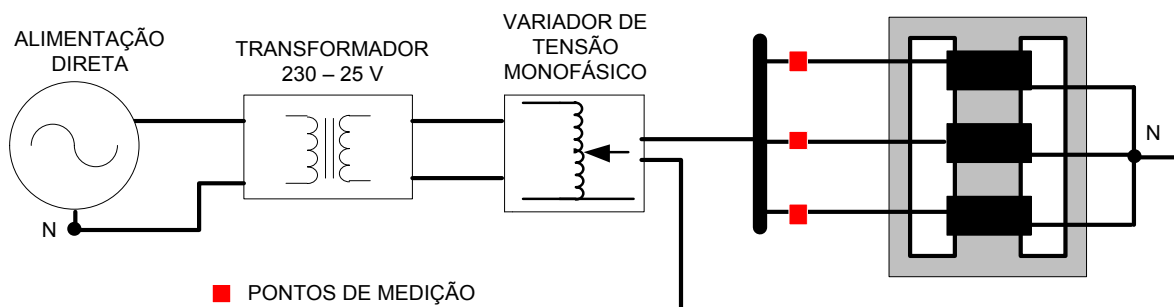
$$Z_{+,-} = \frac{V_+}{I_+} \quad (41)$$

Finalmente, a partir dos dados obtidos nas medições efetuadas, foi possível estabelecer uma comparação entre o comportamento das impedâncias do filtro eletromagnético, sendo que a impedância de sequência zero se apresenta aproximadamente 1275 vezes menor que a impedância de sequência positiva. Essa característica garante a eficácia do filtro de sequência zero projetado, na medida em que atende simultaneamente os principais requisitos pré-estabelecidos, qual seja, apresentar uma baixa impedância para as correntes de sequência zero. Ainda sob a ótica do projeto, esse fato confirma o bom acoplamento entre as bobinas principal e auxiliar de uma mesma coluna magnética.

### 5.3.3 BLOQUEADOR ELETROMAGNÉTICO

Tratando-se agora do bloqueador eletromagnético, foi realizado um ensaio circuito para viabilizar a análise de sua impedância de sequência zero. O arranjo experimental ilustrado na figura 43 foi implementado.

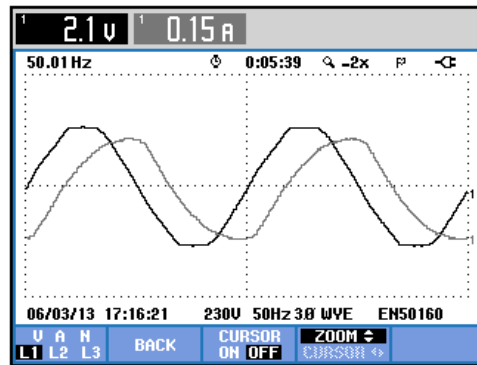
Figura 43 – Arranjo experimental para avaliação das características de sequência zero do bloqueador eletromagnético.



Fonte: Dados da autora.

De forma semelhante ao ensaio do filtro eletromagnético apresentado na seção anterior, o experimento do bloqueador foi realizado aplicando-se, inicialmente, tensões homopolares sobre os diferentes enrolamentos do mesmo. O resultado é apresentado na figura 44.

Figura 44 – Tensão e corrente de sequência zero do ensaio do bloqueador eletromagnético.

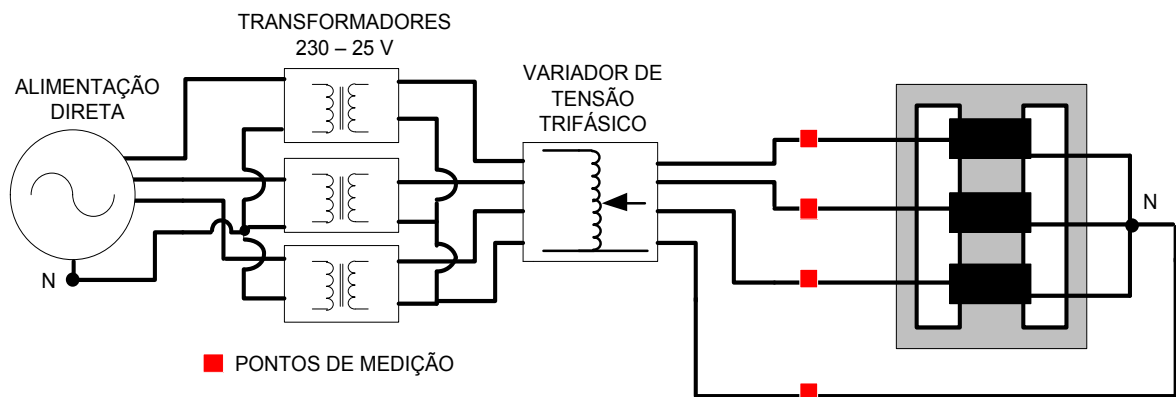


Fonte: Dados da autora.

A equação (40) utilizada para cálculo da impedância de sequência zero do filtro eletromagnético pode também ser, de forma análoga, utilizada para o cálculo da respectiva impedância do bloqueador. Logo, o valor da impedância de sequência zero calculado é de aproximadamente  $14 \Omega$ , com natureza fortemente indutiva.

Agora, com o objetivo de investigar as impedâncias de sequência positiva do bloqueador eletromagnético, o arranjo experimental ilustrado na figura 45 foi implementado.

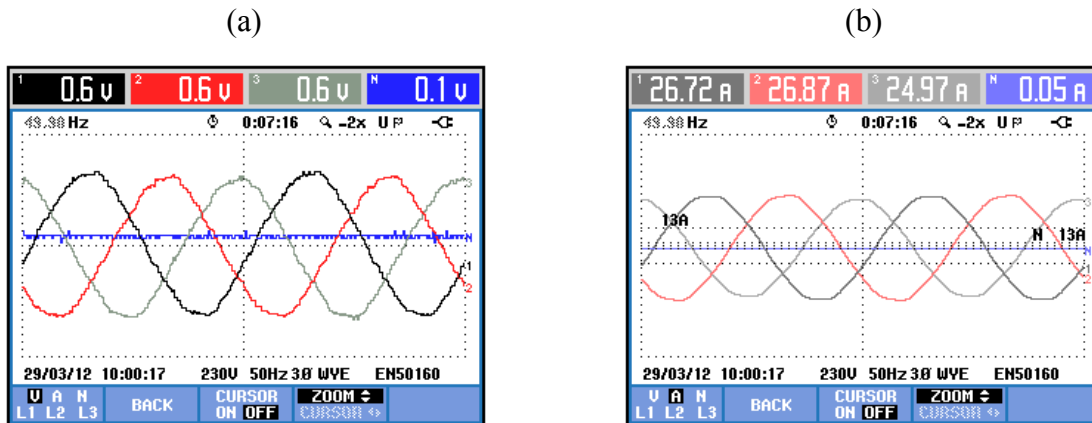
Figura 45 – Arranjo experimental para avaliação das características do bloqueador eletromagnético.



Fonte: Dados da autora.

Os resultados colhidos em medições são apresentados na figura 46.

Figura 46 – Tensões e correntes de sequência positiva do ensaio do bloqueador eletromagnético: (a) Tensões trifásicas; (b) Correntes trifásicas.



Fonte: Dados da autora.

O valor da impedância de sequência positiva calculado segundo equação (145) é de aproximadamente  $0,023 \Omega$ . Como previsto teoricamente, as impedâncias de sequência positiva e negativa apresentam valores substancialmente menores que as impedâncias de sequência zero.

Do exposto, tomando como base os resultados colhidos nas medições efetuadas, foi possível estabelecer uma comparação entre o comportamento das impedâncias do bloqueador, sendo que a impedância de sequência zero se apresenta aproximadamente 600 vezes maior que a impedância de sequência positiva. Essa característica garante a eficácia do bloqueador de sequência zero projetado, na medida em que atende simultaneamente os principais requisitos pré-estabelecidos, quais sejam, apresentar uma alta impedância para as correntes de sequência zero, com mínima interferência sobre o comportamento do sistema sob condições equilibradas na frequência fundamental.

#### 5.4 PROTÓTIPO DO FILTRO ATIVO PARALELO

O protótipo do filtro ativo paralelo utilizado neste trabalho como parte integrante do arranjo híbrido de filtros foi construído no âmbito de um projeto de pesquisa chamado *Projecto SINUS* (AFONSO et al., 2005; AFONSO et al., 2006; <http://www.sinus-pq.dei.uminho.pt/>). Baseado em trabalhos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico realizados no Departamento de Eletrônica Industrial da UMinho, esse projeto teve como objetivo a validação de tecnologia para compensação dinâmica de harmônicas, fator de potência e desequilíbrios, de forma a demonstrar, em situações reais as vantagens técnicas e econômicas de sua utilização.

De acordo com (AFONSO et al., 2006) o protótipo do filtro ativo paralelo é constituído por vários módulos, sendo eles:

- Sensores de tensão;
- Sensores de corrente (sensores de efeito *Hall*);
- DSP (*Digital Signal Processor*), que é responsável por adquirir os sinais das tensões e das correntes disponibilizados pelos sensores e por realizar os cálculos necessários para determinar a cada instante o valor das correntes de compensação;
- Inversor de eletrônica de potência, utilizado para injetar na rede elétrica as correntes de compensação determinadas pelo DSP;
- Circuitos eletrônicos de condicionamento de sinal, necessários para adaptar os níveis dos sinais provenientes dos sensores de tensão e corrente para os valores adequados aos ADSs (*Analog to Digital Converters*) do DSP e para amplificar os sinais de saída do DSP para o disparo correto dos semicondutores do inversor.

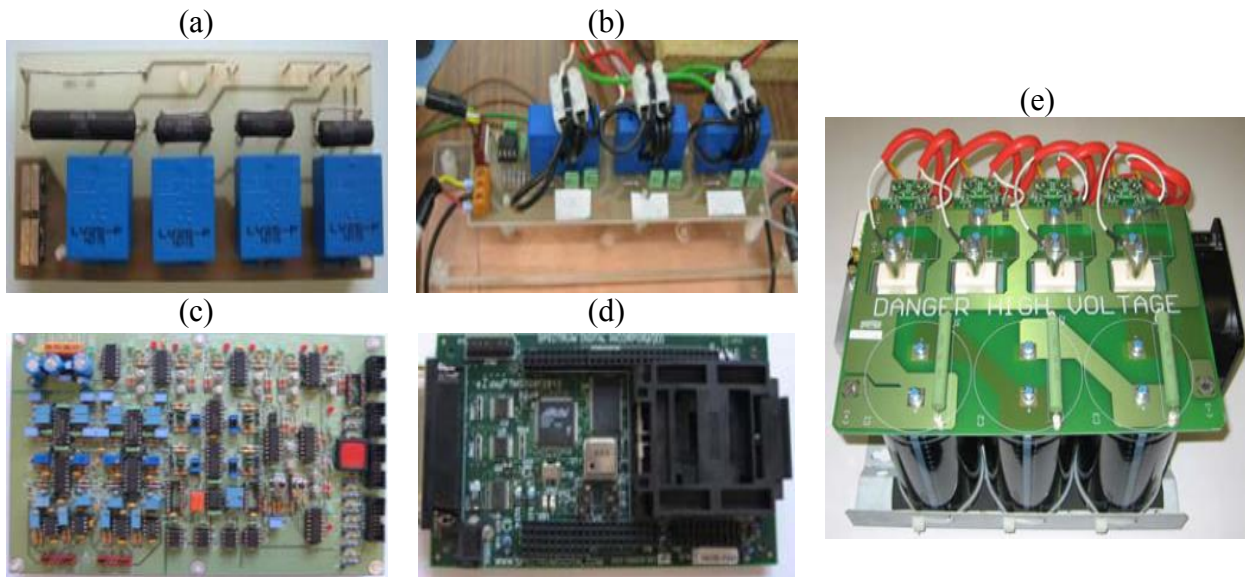
A figura 47 mostra uma imagem externa do gabinete do FAP, onde estão fixados seus botões de acionamento, segurança, luz vermelha de sinalização e o monitor de visualização de informações. Na parte interna do FAP estão contidos os módulos ilustrados na figura 48.

Figura 47 – Filtro ativo de potência paralelo.



Fonte: SINUS (2013)

Figura 48 – Módulos do filtro ativo paralelo: (a) Sensores de tensão; (b) Sensores de corrente; (c) Circuitos de condicionamento de sinal; (d) DSP; (e) Inversor.



Fonte: Afonso (2006).

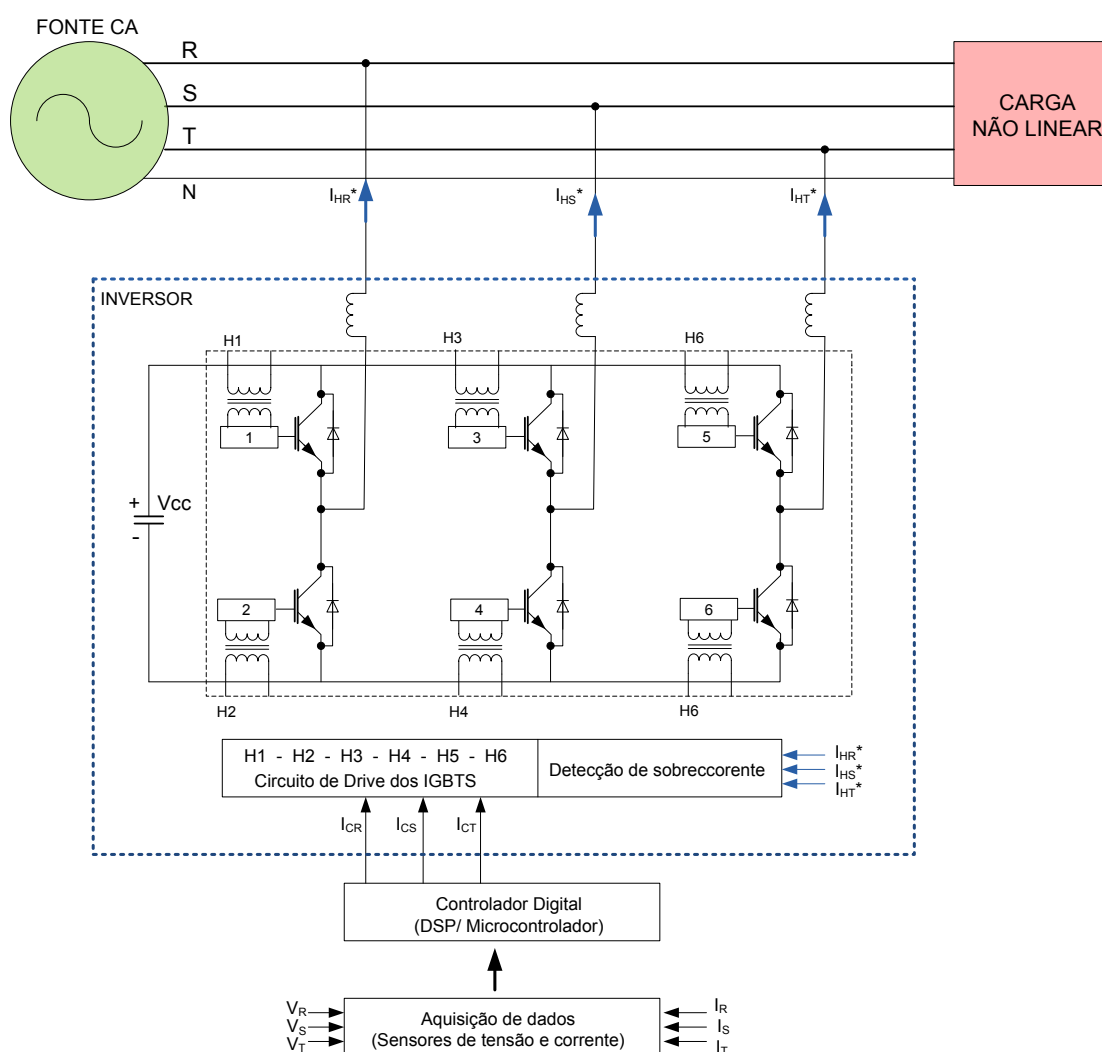
Algumas das características técnicas do filtro ativo de potência do tipo paralelo trifásico desenvolvido no âmbito do *Projeto SINUS* (AFONSO et al., 2005) são:

- Compensação dinâmica (automática e instantânea) de todas as harmônicas de corrente até a 25ª ordem;
- Corrente nominal de até 80 Amperes;
- Compensação dinâmica do fator de potência para a unidade (parâmetro ajustável);
- Possibilidade de gerar potência reativa capacitiva ou indutiva (parâmetro ajustável);
- Compensação dinâmica dos desequilíbrios de corrente das fases e da corrente de neutro (parâmetro ajustável);
- Adaptação dinâmica a alterações das cargas com tempo de resposta inferior a 20 ms;
- Não apresenta problemas de sobrecarga (limitado pelo sistema de controle para o valor nominal de corrente de compensação);
- Entrada suave em operação (ao ser ligado à rede e ao iniciar a operação de compensação);
- Inversor de potência composto por (IGBTs) e sistema de controle implementado em DSP (Digital Signal Processor);
- Não utiliza transformadores para ligação à rede elétrica;
- Rearmamento automático após falha da rede elétrica;

- Operação com baixo nível de ruído sonoro;
- Luz de sinalização vermelha para indicação de ligação à rede elétrica;
- Sistema de monitorização de qualidade de energia elétrica e de consumos integrado no equipamento, com monitor TFT de 17" para fácil visualização de informações localmente;
- Possibilidade de acesso remoto ao sistema de monitorização de qualidade de energia por meio de Ethernet ou placa 3G.

O sistema de controle do FAP em questão é baseado na teoria p-q e para se enquadrar nas funcionalidades almeçadas neste trabalho, teve seus parâmetros ajustados para atuar em um sistema trifásico a três fios, ou seja, compensar apenas as harmônicas de sequência positiva e negativa. A figura 49 ilustra o esquema representativo do filtro ativo de potência paralelo adaptado para um sistema trifásico a três fios.

Figura 49 – Esquema representativo do FAP adaptado para um sistema a três fios.



Fonte: Adaptado de Afonso (2006).

## 5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visando estabelecer os procedimentos e as orientações de projetos, foram investigadas as principais características operacionais dos protótipos dos dispositivos eletromagnéticos. Nesse contexto, foram construídos dois protótipos a partir dos quais foram investigadas as características das suas impedâncias sequenciais equivalentes.

Como previsto teoricamente, para o filtro eletromagnético as impedâncias de sequência positiva e negativa apresentaram valores substancialmente maiores que as impedâncias de sequência zero. Particularmente, no protótipo utilizado neste trabalho, a relação entre as componentes de sequências positiva e zero é de aproximadamente 1275 vezes.

Para o bloqueador eletromagnético ocorreu o contrário. As impedâncias de sequência positiva e negativa apresentaram valores substancialmente menores que as impedâncias de sequência zero. Para o caso específico do protótipo construído neste trabalho, a relação entre as componentes de sequências zero e positiva é de aproximadamente 600 vezes.

Considerando, portanto, favorável a relação entre as impedâncias de sequências zero e positiva para o bom funcionamento dos dispositivos eletromagnéticos, a próxima etapa deste trabalho consiste na validação por simulação do funcionamento do arranjo híbrido de filtros aqui proposto.



## 6 VALIDAÇÃO POR SIMULAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO DE FILTRAGEM

### 6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As análises propostas neste capítulo são direcionadas para a validação por simulação do arranjo híbrido de filtros e para a demonstração da viabilidade de cada uma das estruturas estudadas. Inicialmente, apresenta-se uma breve explicação dos procedimentos experimentais realizados para os testes das características dos protótipos construídos, incluindo uma descrição sucinta dos materiais e equipamentos utilizados.

Realizaram-se experimentos que têm por objetivo ilustrar as principais características dos dispositivos eletromagnéticos que compõe o sistema de filtragem harmônica. A partir dos dados colhidos nas análises experimentais, realizou-se a validação da funcionalidade do novo arranjo de filtros em um ambiente de simulação digital, onde se optou apenas por alguns casos específicos, nos quais o enfoque é ilustrar o comportamento do sistema frente a variações de topologia e condições operacionais.

### 6.2 VALIDAÇÃO POR SIMULAÇÃO

Para validação dos modelos eletromagnéticos dimensionados e do filtro ativo paralelo que compõe o sistema de filtragem híbrido, inicialmente realizaram-se estudos de simulação digital no *software PSIM*<sup>®</sup>. A figura 50 ilustra o *layout* do sistema simulado e seus respectivos sub-blocos.

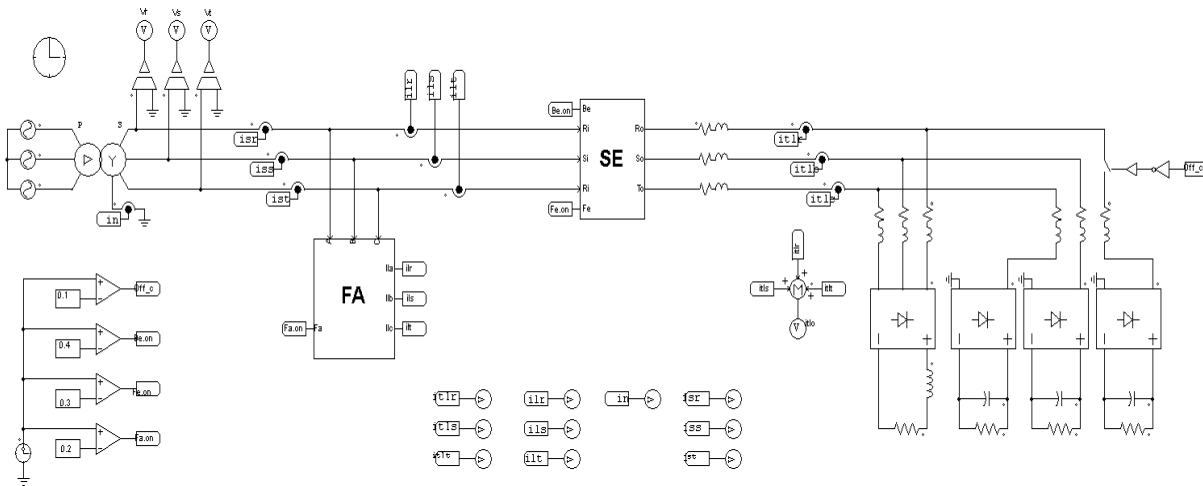
Os dispositivos eletromagnéticos, filtro e bloqueador, foram modelados a partir das metodologias propostas nos itens 5.2.1 e 5.2.2, respectivamente. Utilizou-se elementos básicos contendo indutores mutuamente acoplados da biblioteca do *PSIM*<sup>®</sup>. Os modelos foram compactados em um único bloco denominado SE, figura 50 (b). Os valores das indutâncias mútuas e próprias para os diferentes enrolamentos foram estabelecidos a partir de medições efetuadas com uma ponte RLC. É importante destacar que para as simulações foram adotados, em princípio, dispositivos com núcleo a ar.

A construção do filtro ativo de potência também utiliza elementos básicos da biblioteca do *software* de simulação digital, como diodos, fonte de corrente contínua e indutores, figura 50 (c). A técnica de controle do FAP em questão é baseada na teoria p-q e pode ser vista detalhadamente em (AFONSO; SILVA; MARTINS, 2001; AFONSO et al., 2005; AFONSO et al., 2006; AKAGI et al., 1983; PREGITZER et al., 2006).

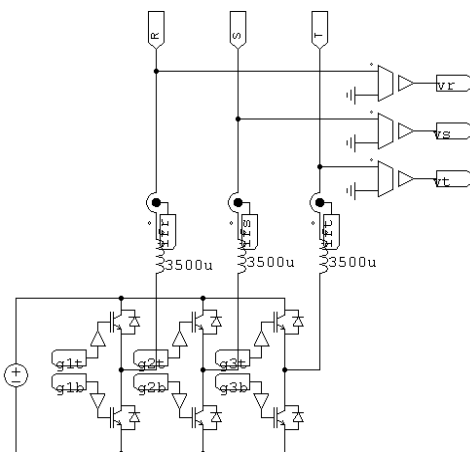
Os procedimentos para a composição da carga não linear seguem a mesma metodologia. A partir de elementos básicos do *PSIM*<sup>®</sup> foram configuradas dois tipo de cargas, trifásica e monofásicas. A carga trifásica é constituída por um retificador de seis pulsos a diodo alimentando uma carga *RL*. Para compor a carga total, escolheram-se três retificadores com ponte a diodos com filtro capacitivo alimentando uma carga resistiva. A carga trifásica é, portanto, composta por três cargas monofásicas. Para observar o comportamento do sistema de compensação frente ao desequilíbrio da carga, foi introduzida uma chave temporizada no modelo.

Figura 50 – Layout do sistema simulado no *PSIM*<sup>®</sup>: (a) Diagrama de simulação; (b) Filtro ativo paralelo; (c) Supressor eletromagnético.

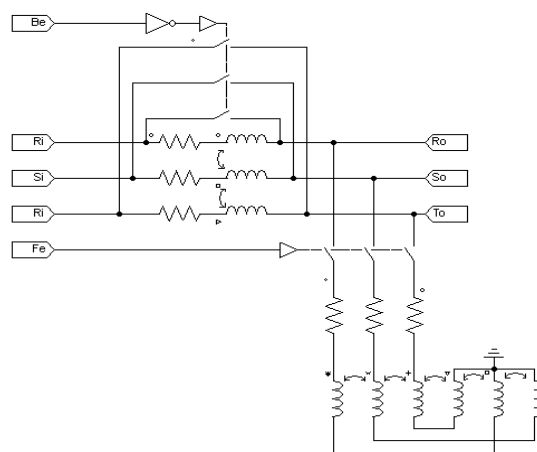
(a)



(b)



(c)



Fonte: Dados da autora.

A tabela 9 apresenta os dados utilizados na configuração dos elementos do sistema simulado.

Tabela 9 – Dados do sistema simulado.

Tensões na barra	$\approx 230$ V
Frequência	50 Hz
Filtro eletromagnético	$L_f = 300$ mH; $R_f = 0,2$ $\Omega$ ; $\lambda_f = 0,998$
Bloqueador eletromagnético	$L_b = 5$ mH; $R_b = 0,03$ $\Omega$ ; $\lambda_b = 0,998$
Retificadores monofásicos com filtro capacitivo	$R = 42$ $\Omega$ ; $C = 500$ $\mu$ F
Retificador trifásico com filtro indutivo	$R = 42$ $\Omega$ ; $L = 5$ mH
Tensão Vdc do FAP	750 V

Fonte: Dados da autora.

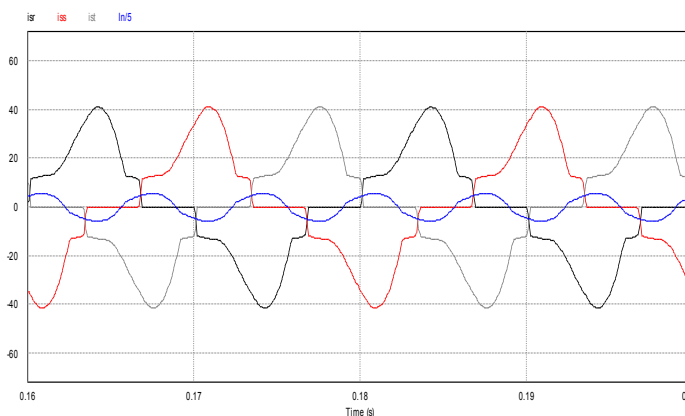
### 6.2.1 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES EM REGIME PERMANENTE

Os resultados de simulações apresentados a seguir foram realizados para diferentes intervalos de regime permanente, que contemplam variações topológicas do sistema de filtragem e da carga não linear. O objetivo central desta análise é investigar a distribuição sequencial das componentes harmônicas, bem como os índices de desequilíbrios antes e após a atuação dos dispositivos de filtragem e suas combinações. Os cálculos das componentes sequenciais e das respectivas *DFT's* (*Discrete Fourier Transformer* - Transformada Discreta de Fourier) foram realizados por meio de planilhas eletrônicas desenvolvidas no *Excel*<sup>®</sup>, conforme referência (RAVAGNANI, 2008). Para isso, foram extraídas dos resultados de simulação obtidos no *PSIM*<sup>®</sup>, 200 amostras por ciclo para cada período de interesse.

#### A. Cargas não lineares equilibradas e sem filtros

A figura 51 ilustra as formas de onda em regime permanente das correntes trifásicas no secundário do transformador. Na escala gráfica, a corrente de neutro é dividida cinco vezes. Este caso é tomado como referência para as análises subsequentes dos casos *B*, *C* e *D*.

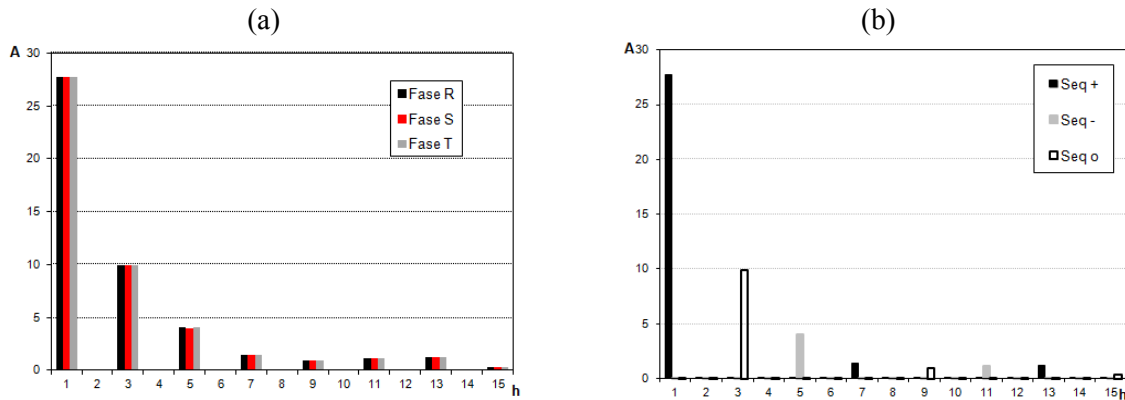
Figura 51 – Caso A – Correntes de carga (fases *R*, *S* e *T*, e neutro).



Fonte: Dados da autora.

O conjunto de cargas, composto por um retificador trifásico com filtro indutivo e cargas monofásicas idênticas constituídas de retificadores em ponte com filtro capacitivo, apresenta componentes harmônicas características segundo o espectro ilustrado na figura 52. Em todas as representações subsequentes desta seção, os diagramas de barras à esquerda mostram a distribuição espectral dos valores de pico das componentes de fase, figura 52(a). O mesmo critério é adotado para os diagramas de barra ilustrados no lado direito da figura, sendo que, neste caso, as barras representam os valores de pico das harmônicas e suas respectivas distribuições sequenciais, figura 52(b).

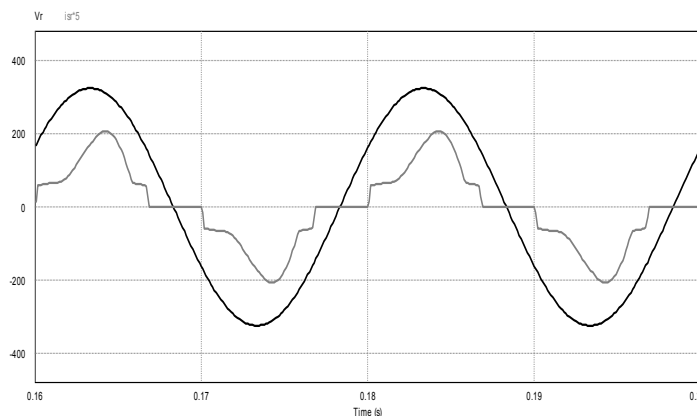
Figura 52 – Caso A – Espectros harmônicos, com valores de pico, das correntes de alimentação: (a) Componentes de fase. (b) Componentes simétricas.



Fonte: Dados da autora.

A figura 53 mostra, para uma mesma fase, a tensão e a respectiva corrente no terminal secundário do transformador de alimentação. Para facilitar a visualização dos resultados, na escala gráfica, a corrente de fase foi multiplicada cinco vezes. O fator de potência obtido neste caso é de 0,92 e deve-se, fundamentalmente, à distorção harmônica da corrente, já que a componente fundamental está praticamente em fase com a tensão.

Figura 53 – Caso A – Tensão e corrente na fase R.

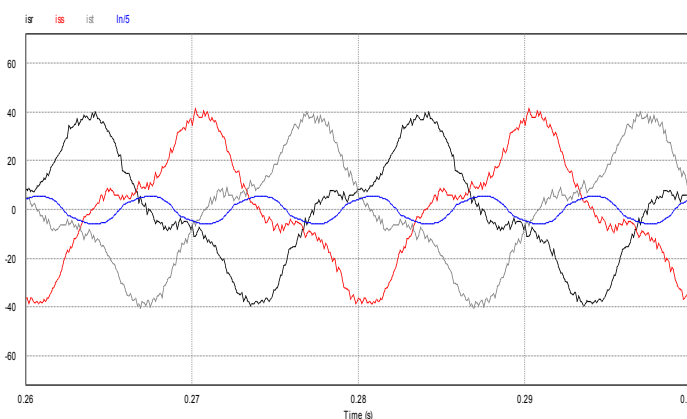


Fonte: Dados da autora.

### B. Cargas não lineares equilibradas com filtro ativo em operação

A figura 54 ilustra as formas de onda em regime permanente das correntes no secundário do transformador com filtro ativo de três braços conectado. Na escala gráfica, a corrente de neutro é dividida cinco vezes.

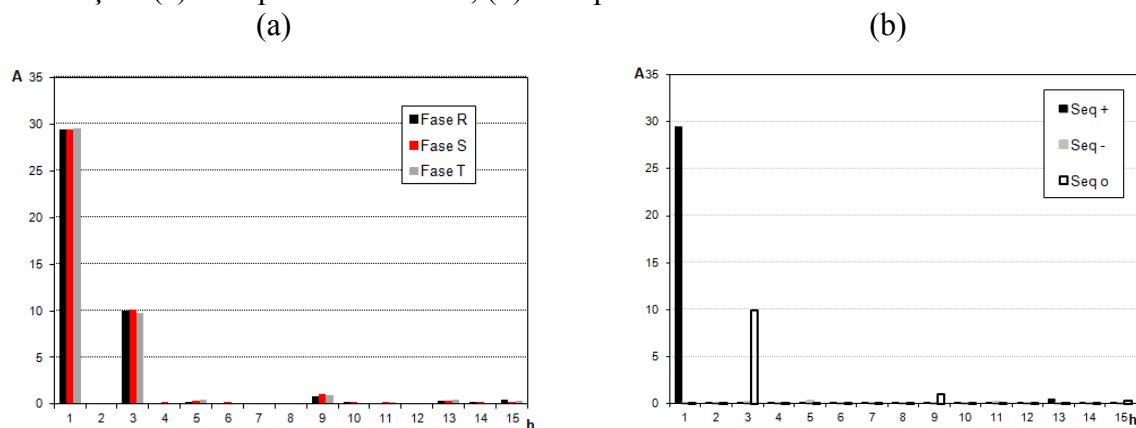
Figura 54 – Caso B – Correntes de alimentação (fases R, S e T, e neutro).



Fonte: Dados da autora.

Os resultados apresentados na figura 55 mostram claramente a atuação do filtro ativo, reduzindo substancialmente as componentes harmônicas de ordens 5 e 7, com distribuição sequencial predominante nas sequências de fase negativa e positiva, respectivamente. Observa-se, entretanto, a presença da harmônica de ordem 3, notadamente com forte concentração em sequência zero. Como esperado, na configuração adotada para o filtro ativo paralelo com apenas três braços, tal componente não pode ser compensada. Assim, a distorção harmônica residual se deve, portanto, praticamente à presença dessa componente com amplitude de 9,7A.

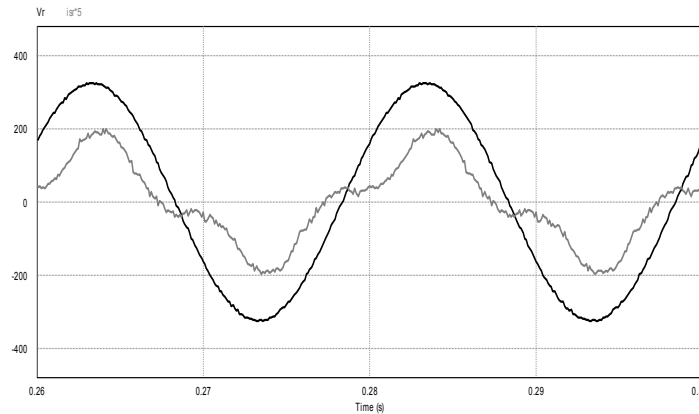
Figura 55 – Caso B – Espectros harmônicos, com valores de pico, das correntes de alimentação: (a) Componentes de fase; (b) Componentes simétricas.



Fonte: Dados da autora.

A figura 56 mostra, para uma mesma fase, a tensão e a respectiva corrente no terminal secundário do transformador de alimentação. Para facilitar a visualização dos resultados, na escala gráfica, a corrente de fase foi multiplicada cinco vezes. O fator de potência obtido neste caso é de 0,94. Essa sensível melhoria no fator de potência dá-se em função da redução das componentes harmônicas de ordem 5 e 7, compensadas pela ação do filtro ativo paralelo.

Figura 56 – Caso B – Tensão e corrente na fase R.

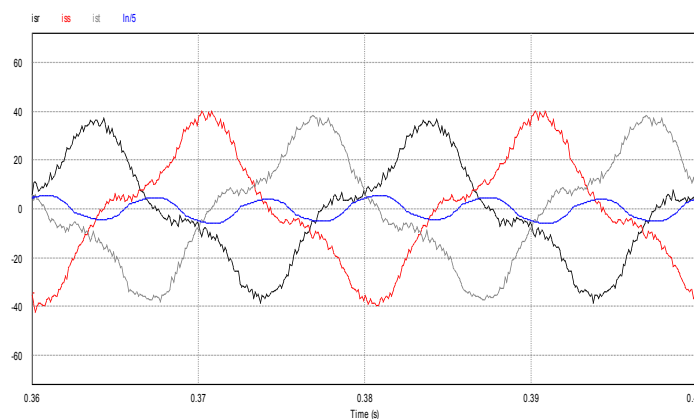


Fonte: Dados da autora.

### C. Cargas não lineares equilibradas com filtro ativo e filtro eletromagnético em operação

A figura 57 ilustra as formas de onda em regime permanente das correntes no secundário do transformador, com os filtros ativo e eletromagnético conectados. Na escala gráfica, a corrente de neutro é dividida cinco vezes.

Figura 57 – Caso C – Correntes de alimentação (fases R, S e T, e neutro).

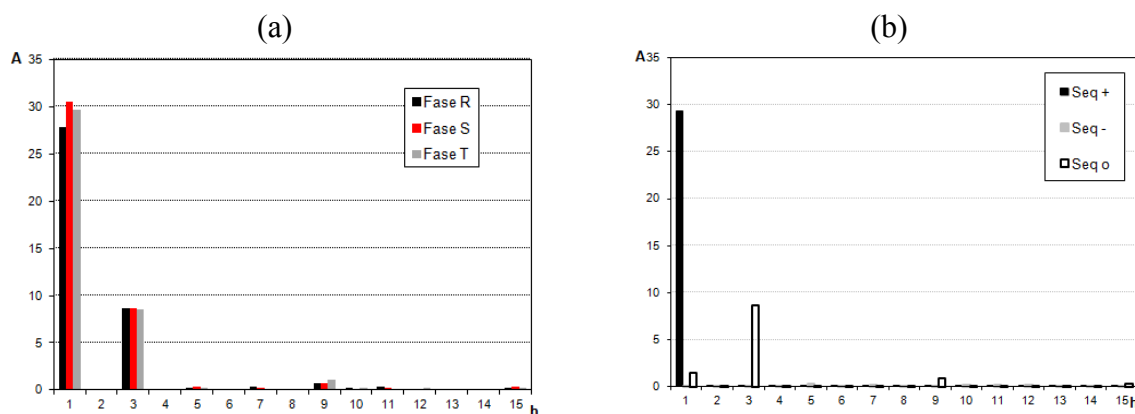


Fonte: Dados da autora.

Com a atuação conjunta do filtro eletromagnético, é possível constatar uma sensível melhoria no desempenho no sistema de compensação. Observando a figura 58(b), nota-se

uma pequena redução nas componentes de ordem 3. Tal fato deve-se ao confinamento de uma pequena parcela das componentes de sequência zero, ainda que de forma precária.

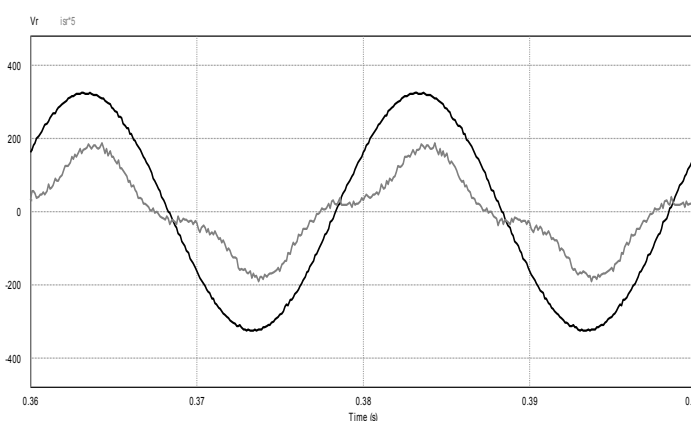
Figura 58 – Caso C – Espectros harmônicos, com valores de pico, das correntes de alimentação: (a) Componentes de fase; (b) Componentes simétricas.



Fonte: Dados da autora.

A figura 59 mostra, para uma mesma fase, a tensão e a respectiva corrente no terminal secundário do transformador de alimentação. Para facilitar a visualização dos resultados, na escala gráfica, a corrente de fase foi multiplicada cinco vezes. O reflexo da redução da distorção harmônica pode ser constatado mais uma vez com o pequeno aumento do fator de potência para 0,95.

Figura 59 – Caso C – Tensão e corrente na fase R.

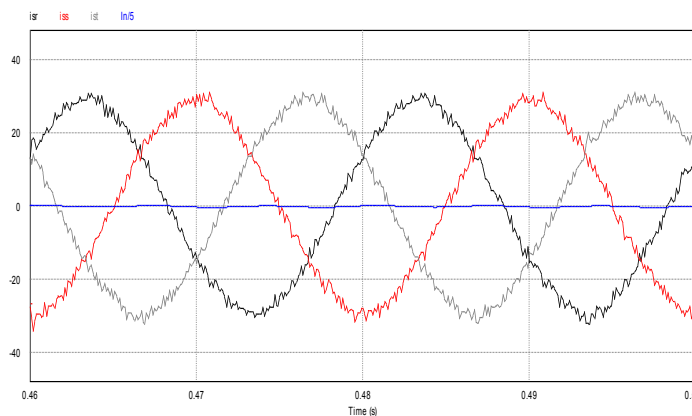


Fonte: Dados da autora.

#### D. Cargas não lineares equilibradas com filtro ativo e supressor eletromagnético em operação

A figura 60 ilustra as formas de onda em regime permanente das correntes no secundário do transformador, considerando-se agora o sistema híbrido de compensação completo. Na escala gráfica, a corrente de neutro é dividida cinco vezes.

Figura 60 – Caso D – Correntes de alimentação (fases *R*, *S* e *T*, e *neutro*).



Fonte: Dados da autora.

Como visto, o filtro eletromagnético atua como divisor de corrente. Nessas condições, para que sua atuação seja maximizada, a impedância de sequência zero apresentada deve possuir um valor substancialmente menor que a respectiva impedância do sistema a montante, em relação ao ponto de instalação do dispositivo.

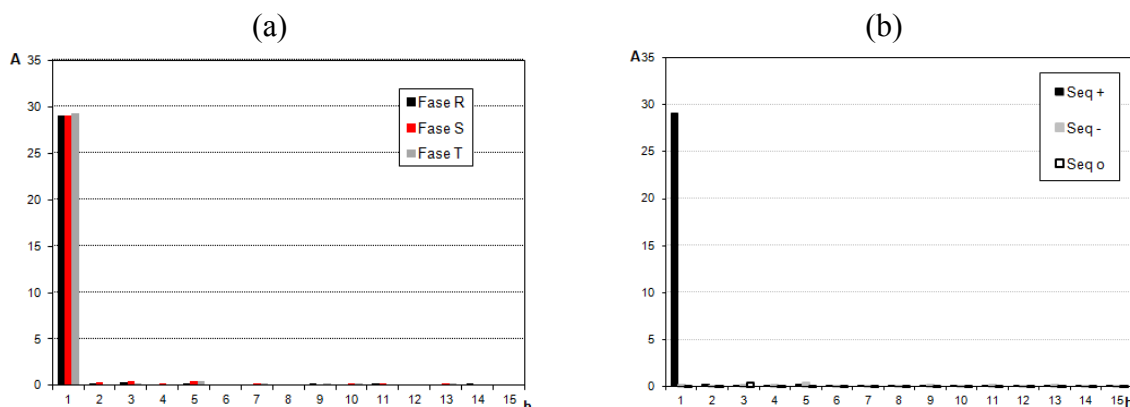
Dessa forma, em redes elétricas nas quais o ponto de instalação do filtro eletromagnético apresenta níveis de curto-circuito elevados (similar ao caso da simulação), é possível que haja alguma dificuldade na concepção desse dispositivo, sob o ponto de vista construtivo.

Nessas condições é recomendável a utilização de um dispositivo auxiliar, denominado bloqueador eletromagnético de sequência zero (FREITAS, 2011). Esse equipamento, como destacado anteriormente, em contrapartida ao filtro eletromagnético, é concebido de forma a apresentar uma alta impedância de sequência zero e baixa impedância de sequência positiva e negativa. Logo, na operação conjunta, o bloqueador eletromagnético (conectado em série ao sistema), pode funcionar como um adaptador de impedância e assim maximizar a funcionalidade do filtro eletromagnético (conectado em paralelo ao sistema).

A figura 61 apresenta os resultados para as componentes harmônicas sequenciais, para as condições operacionais descritas. Observa-se neste caso uma expressiva redução das componentes de sequência zero, favorecendo, assim, o melhor desempenho do sistema de compensação composto pelo filtro ativo e pelo supressor eletromagnético.



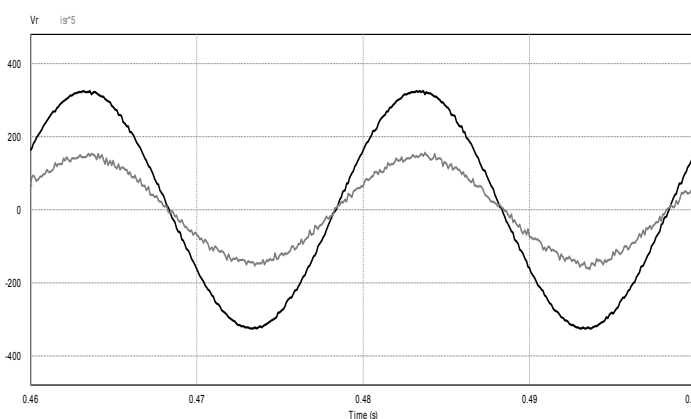
Figura 61 – Caso D – Espectros harmônicos, com valores de pico, das correntes de alimentação: (a) Componentes de fase; (b) Componentes simétricas.



Fonte: Dados da autora.

A figura 62 ilustra, para uma mesma fase, a tensão e a respectiva corrente no terminal secundário do transformador de alimentação. Para facilitar a visualização dos resultados, na escala gráfica, a corrente de fase foi multiplicada cinco vezes. O fator de potência obtido nesse caso é praticamente unitário, uma vez que a distorção harmônica da corrente foi substancialmente reduzida.

Figura 62 – Caso D – Tensão e corrente na fase R.



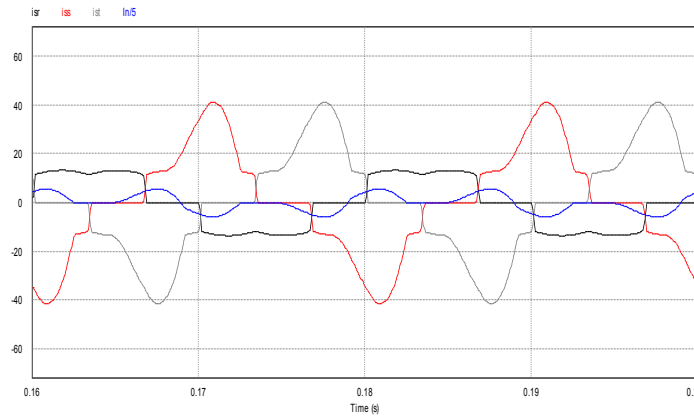
Fonte: Dados da autora.

### E. Cargas não lineares desequilibradas sem a ação dos filtros

Com o objetivo de investigar a capacidade do sistema híbrido de compensação em situações operacionais com grandes desequilíbrios de carga, apresentam-se a seguir alguns resultados ilustrativos. A configuração da carga não linear desequilibrada é definida a partir da saída de uma das unidades monofásicas, especificadamente um dos retificadores monofásicos com filtro capacitivo. A figura 63 ilustra as formas de onda em regime permanente das correntes no secundário do transformador de alimentação, sem a ação dos

filtros, que é tomada como referência para as análises subsequentes. Na escala gráfica, a corrente de neutro é dividida cinco vezes.

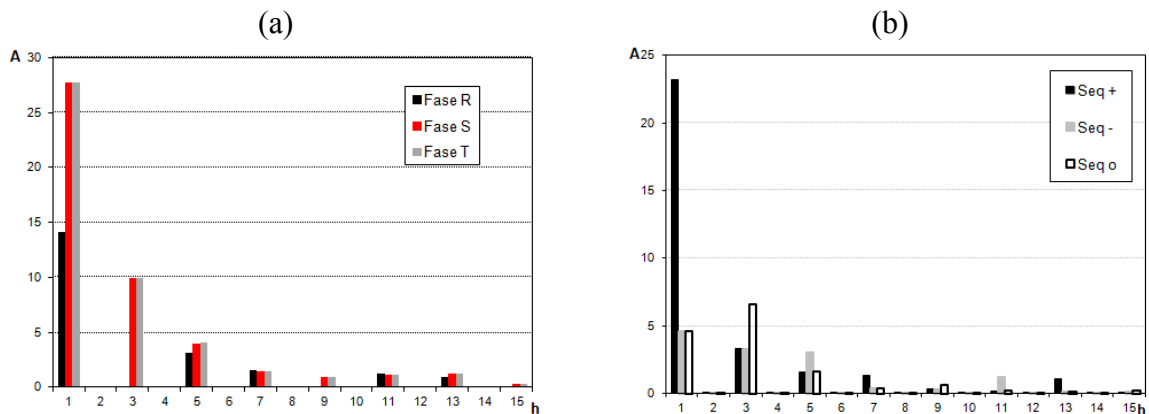
Figura 63 – Caso E – Correntes de alimentação (fases R, S e T, e neutro).



Fonte: Dados da autora.

Pela análise da figura 64 é possível constatar a característica desequilibrada da carga total resultante. Como esperado, a componente fundamental apresenta valores não nulos nas três sequências de fase. O mesmo pode ser observado para as demais componentes sequenciais, embora ainda se detecte a tendência de concentração nas respectivas sequências de fase típicas.

Figura 64 – Caso E – Espectros harmônicos, com valores de pico, das correntes de alimentação: (a) Componentes de fase; (b) Componentes simétricas.

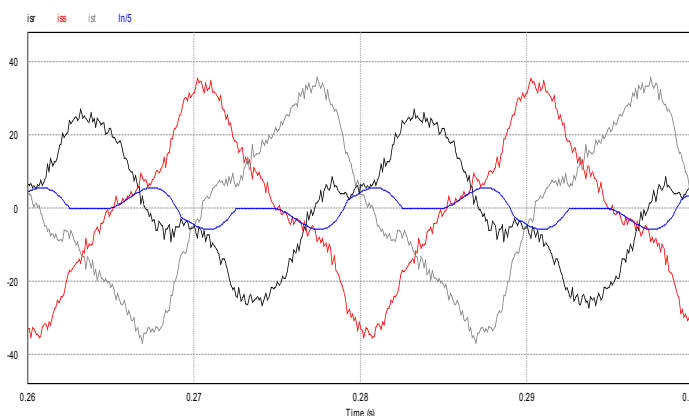


Fonte: Dados da autora.

#### F. Cargas não lineares desequilibradas apenas com filtro ativo em operação

A figura 65 ilustra as formas de onda em regime permanente das correntes no secundário do transformador, para um carregamento desequilibrado, sob a ação apenas do filtro ativo de três braços. Na escala gráfica, a corrente de neutro é dividida cinco vezes.

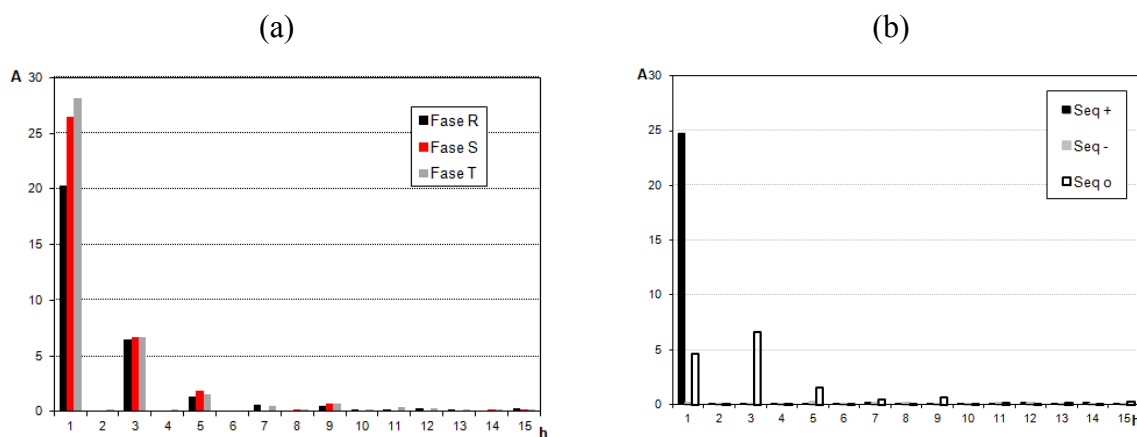
Figura 65 – Caso F – Correntes de alimentação (fases *R*, *S* e *T*, e *neutro*).



Fonte: Dados da autora.

Os resultados indicam a atuação esperada do filtro ativo, reduzindo, por exemplo, os níveis das componentes harmônicas de 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens concentradas em sequências negativa e positiva, respectivamente, figura 66. Destaca-se que, nesse caso, devido ao desequilíbrio imposto pela assimetria das cargas, todo o espectro harmônico concentrado em sequência zero permanece inalterado com relação ao caso anterior, inclusive para harmônicas de ordens 5 e 7. Naturalmente, tal comportamento é previsível uma vez que a topologia adotada para o filtro ativo não comporta a compensação das potências de sequência zero. Dessa forma, o desequilíbrio e as distorções residuais estão diretamente relacionados à presença de componentes homopolares nas diferentes frequências harmônicas, assim como na componente fundamental.

Figura 66 – Caso F – Espectros harmônicos, com valores de pico, das correntes de alimentação: (a) Componentes de fase; (b) Componentes simétricas.

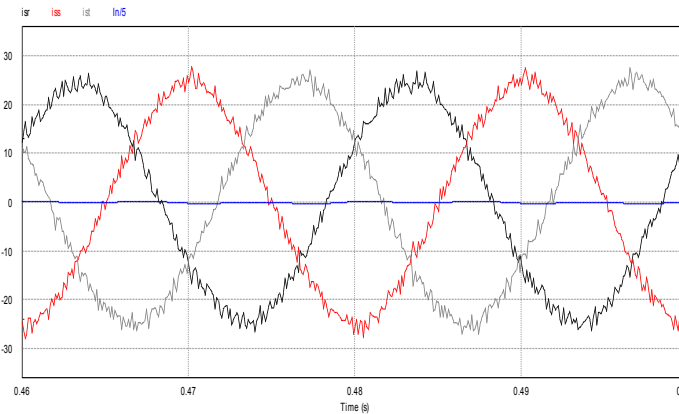


Fonte: Dados da autora.

G. Cargas não lineares desequilibradas com filtro ativo e supressor eletromagnético em operação

A figura 67 ilustra as formas de onda em regime permanente das correntes no secundário do transformador, considerando-se a atuação do arranjo híbrido de filtros completo. Na escala gráfica, a corrente de neutro é dividida cinco vezes.

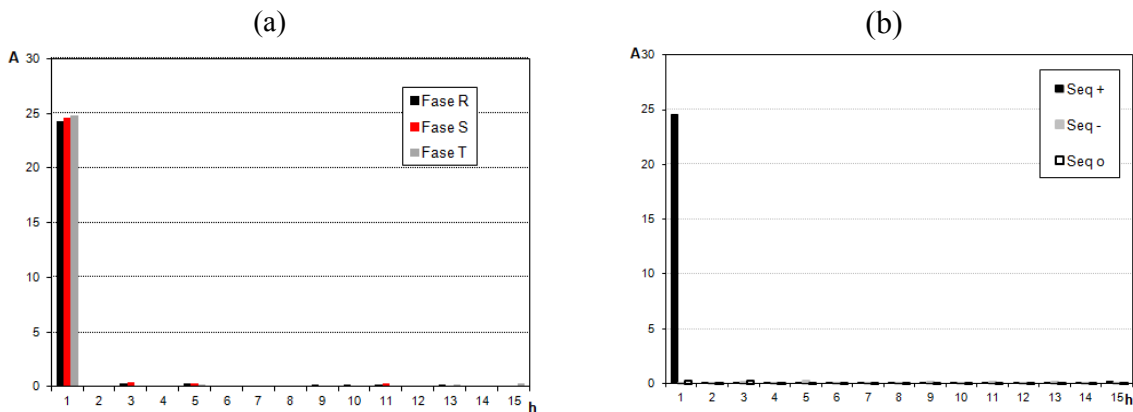
Figura 67 – Caso G – Correntes de alimentação (fases R, S e T, e neutro).



Fonte: Dados da autora.

O desempenho do sistema híbrido de compensação pode ser mais uma vez constatado de forma satisfatória. Os dispositivos eletromagnéticos combinados promoveram o confinamento das componentes de sequência zero apenas no trecho compreendido entre o ponto de instalação dos mesmos e as cargas, inibindo assim seu fluxo através dos demais trechos da rede, figura 68. Ocorre, nesse caso, uma significativa redução de todas as componentes de sequência zero nas correntes provenientes da fonte de alimentação, com benefício direto sobre os níveis residuais de desequilíbrios e distorções harmônicas.

Figura 68 – Caso G – Espectros harmônicos, com valores de pico, das correntes de alimentação: (a) Componentes de fase; (b) Componentes simétricas.



Fonte: Dados da autora.

### H. Comparativo dos Resultados

Os resultados globais apresentados na tabela 10 demonstram resumidamente algumas características das correntes no secundário do transformador de entrada, para diferentes arranjos do sistema de compensação e para as diferentes condições de carregamento supra-analisadas (carga equilibrada – CE – e carga desequilibrada – CD). São apresentados os valores eficazes das correntes nas três fases, os valores eficazes das componentes sequenciais, as distorções harmônicas totais de corrente (DTC) e os fatores de desequilíbrios residuais em sequência negativa (FD-) e zero (FD0). Para os fatores de desequilíbrios residuais, apresentam-se particularmente duas versões. A primeira refere-se ao fator de desequilíbrio conhecido classicamente como a relação entre os valores eficazes das correntes de sequências negativa e positiva. O segundo, menos usual, mas particularmente importante nesta avaliação, representa a relação entre os valores eficazes das componentes de sequência zero e positiva. Considerando-se, pois, um sistema a quatro fios, onde eventualmente as componentes de sequência zero podem estar presentes, a simetria perfeita entre as correntes nas linhas é garantida quando os dois fatores de desequilíbrio citados resultarem simultaneamente nulos.

Tabela 10 – Resultados para diferentes combinações do arranjo híbrido de filtros.

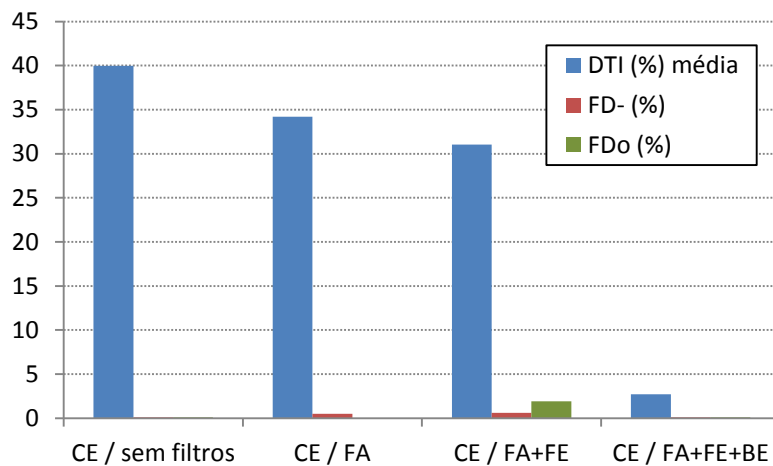
Arranjos	Correntes (A <sub>rms</sub> )			Sequências (rms)			DTC (%)			FD (%)	
	R	S	T	(+)	(-)	(0)	R	S	T	(+)	(0)
<b>CE/ sem filtros</b>	21,2	21,1	21,2	19,7	3,1	7,1	39,9	40	40	0,1	0,1
<b>CE/ FA</b>	21,9	21,9	22,0	20,1	0,5	7,1	34,4	34,6	33,6	0,5	0,0
<b>CE/ FA + FE</b>	21,6	22	21,6	20,8	0,4	6,4	31,7	30,4	31,0	0,6	1,9
<b>CE/ FA + FE + BE</b>	20,6	20,6	20,6	20,6	0,4	0,1	2,7	2,7	2,7	0,1	0,1
<b>CD/ sem filtros</b>	10,4	21,1	21,1	16,7	4,7	5,8	28,8	39,9	40,0	19,7	19,8
<b>CD/ FA</b>	15,0	19,4	20,4	17,5	0,5	5,8	33,8	26,1	25,1	0,5	18,6
<b>CD/ FA + FE + BE</b>	17,4	17,3	17,5	17,4	0,4	0,2	3,0	3,7	3,1	0,1	0,7

Fonte: Dados da autora.

Os resultados comparativos ilustrados na figura 69, gerados a partir dos dados apresentados na tabela 10, mostram claramente a importância dos dispositivos eletromagnéticos na redução das distorções harmônicas totais das correntes de alimentação (DTC). Nos primeiros casos investigados onde as cargas monofásicas operam de forma simétrica, as harmônicas múltiplas de 3, com forte concentração em sequência zero, não

podem ser compensadas pelo filtro ativo de três braços. Desta forma, com a atuação apenas do filtro ativo, as distorções harmônicas, embora tenham sido reduzidas de forma significativa, permanecem, em média, ainda com valores residuais da ordem de 86% da distorção original (de 40% para 34,2%). Com a entrada do filtro eletromagnético houve uma redução ineficaz nas distorções harmônicas residuais, de cerca de 8%. Entretanto, com a entrada do bloqueador, que compõe o denominado supressor eletromagnético de sequência zero, a redução da distorção harmônica nas correntes de alimentação foi superior a 90% em média.

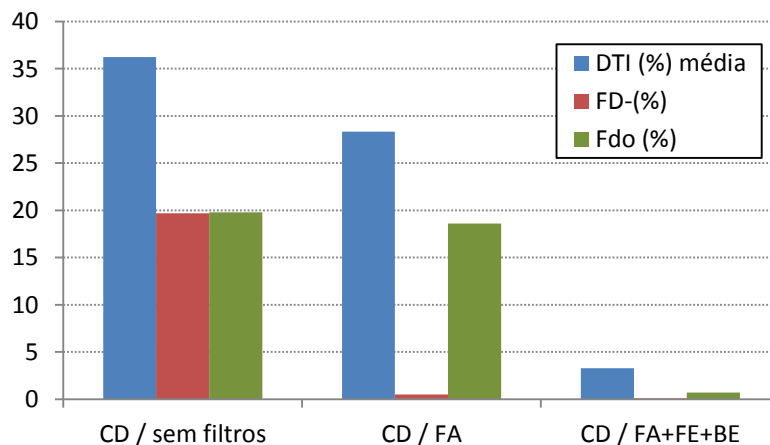
Figura 69 – Distorções harmônicas totais e fator de desequilíbrio de corrente com a variação do arranjo de filtros com carga equilibrada.



Fonte: Dados da autora.

Para condições de desequilíbrios da carga, os resultados obtidos são também animadores e mostram com clareza a eficiência dos dispositivos eletromagnéticos no confinamento das componentes de sequência zero, figura 70.

Figura 70 – Distorções harmônicas totais e fator de desequilíbrio de corrente com a variação do arranjo de filtros com carga desequilibrada.



Fonte: Dados da autora.

A atuação conjunta do filtro ativo e do supressor eletromagnético garantiram índices de desequilíbrios de sequência zero residuais menores que 0,7%, proporcionando, portanto, uma redução de aproximadamente 96% (de 19,8% para 0,7%), com relação ao valor obtido somente com atuação do filtro ativo. Além disso, a redução do desequilíbrio de sequência negativa proporcionada pelo filtro ativo é ainda mais efetiva quando o mesmo opera em conjunto com os dispositivos eletromagnéticos, sendo que nessas condições, verifica-se uma redução de cerca de 99,5% (de 19,7% para 0,1%).

### 6.2.2 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES EM REGIME TRANSITÓRIO

A segunda etapa dos estudos computacionais realizou-se no sentido de observar o comportamento do sistema em regime transitório mediante as diferentes configurações do sistema de filtros.

O intervalo total de simulação foi de 0,6 segundo, iniciando-se com a alimentação dos conjuntos de cargas a partir de um transformador e sem nenhum dispositivo de compensação. Esse caso é tomado como referência para análise comparativa do desempenho dos equipamentos de compensação.

Na sequência, admitiu-se, progressivamente, a entrada em operação dos diferentes componentes do sistema de compensação, notadamente o filtro ativo paralelo, o filtro eletromagnético e o bloqueador eletromagnético, com o objetivo de observar suas contribuições individuais no processo de atenuação harmônica e correção de desequilíbrios. O último intervalo foi reservado para observar o comportamento do sistema de compensação completo, frente a um desequilíbrio de carga, caracterizado pela alteração das características de uma das unidades monofásicas.

Apresenta-se na tabela 11 a sequência, as configurações do sistema e a duração dos diferentes intervalos simulados.

Tabela 11 – Condições de simulação.

<b>Intervalo (segundos)</b>	<b>Configurações do sistema de compensação</b>	<b>Carga</b>
$0 < t < 0,2$	Sem filtros	Equilibrada
$0,2 < t < 0,3$	Filtro ativo	Equilibrada
$0,3 < t < 0,4$	Filtro ativo e filtro eletromagnético	Equilibrada
$0,4 < t < 0,5$	Filtro ativo e supressor eletromagnético	Equilibrada
$0,5 < t < 0,6$	Filtro ativo e supressor eletromagnético	Desequilibrada

Fonte: Dados da autora.

Na figura 71, apresentam-se alguns resultados que ilustram o comportamento transitório do sistema nos diferentes períodos citados na tabela 11. Os valores das correntes, colocados em cada intervalo de tempo, correspondem a uma média dos valores medidos em cada uma das fases.

Na figura 71 (a), têm-se as correntes do sistema, que são as fornecidas pela rede de alimentação. Naturalmente, constata-se que no primeiro intervalo ( $0 < t < 0,2$  segundo) as correntes são idênticas àquelas absorvidas pela carga, pois até então nenhum equipamento de compensação encontra-se em operação. Na sequência ( $0,2 < t < 0,3$  segundos), verifica-se a entrada em operação do filtro ativo de três braços. Como esperado a ação compensadora é apenas parcial, uma vez que as componentes harmônicas de sequência zero não são compensadas nessa configuração. No intervalo seguinte ( $0,3 < t < 0,4$  segundo), encontra-se conectado além do filtro ativo também o eletromagnético. As correntes drenadas pelo filtro encontram-se na figura 71 (c). Nesse período, a ação do filtro eletromagnético não é eficaz. Tal fato, como já previsto, deve-se à relação desfavorável entre as impedâncias de sequência zero do filtro eletromagnético e do sistema de suprimento. Logo, ainda permanece uma forte concentração das componentes harmônicas múltiplas de três.

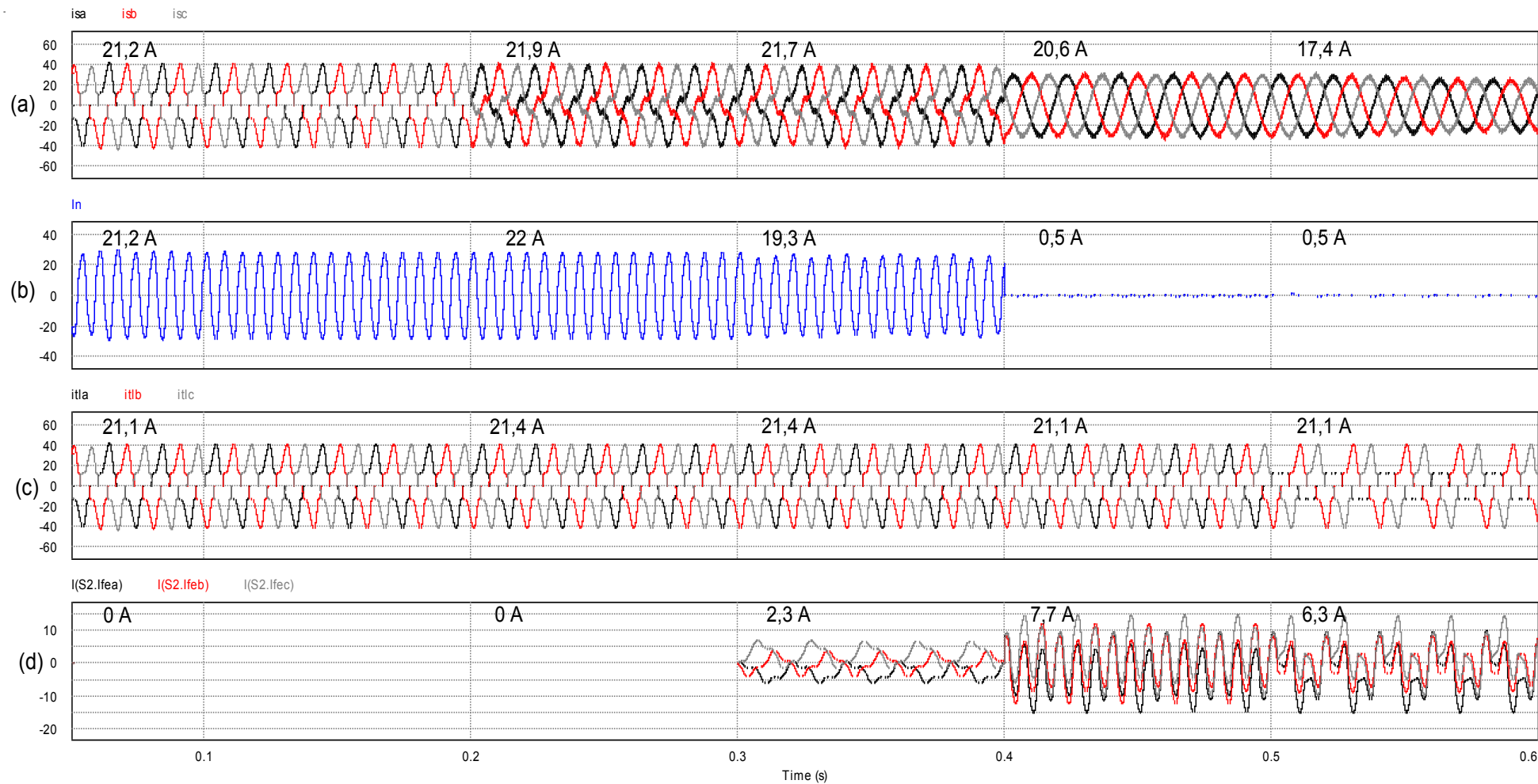
O início da operação do bloqueador em conjunto com os demais dispositivos, filtro ativo e filtro eletromagnético, se faz a partir de 0,4 segundo. Neste intervalo ( $0,4 < t < 0,5$  segundo), todos os dispositivos de compensação encontram-se conectados, construindo assim o arranjo híbrido completo proposto neste trabalho. Pelos resultados obtidos para as correntes do sistema, verifica-se que as expectativas propostas são satisfeitas. A ação combinada dos dispositivos eletromagnéticos e do filtro ativo paralelo reduzem substancialmente o fluxo das correntes no neutro do sistema, de 21,7 A para 0,5 A, figura 71(b), resultando numa redução expressiva das distorções harmônicas das correntes na fonte, figura 71(a).

Por fim, no último intervalo ( $0,5 < t < 0,6$  segundo), são analisados os resultados obtidos a partir da saída de operação de uma das unidades monofásicas que, provoca um desequilíbrio na distribuição trifásica das cargas. Para este caso, vale destacar que as correntes de sequência zero devem-se também ao desequilíbrio provocado pela saída de uma das cargas. Logo, esta condição requer uma atuação diferenciada nos dispositivos eletromagnéticos responsáveis pelo confinamento das correntes de ordem três. Mesmo sob estas condições severas de desequilíbrio a ação de confinamento das componentes de sequência zero pelo supressor eletromagnético é assegurada e o resultado observado na fonte é satisfatório, sendo que as correntes de alimentação permanecem praticamente inalteradas sob a ótica das distorções harmônicas residuais.



Finalmente, destaca-se que os resultados apresentados nesta seção buscam apenas ilustrar de forma qualitativa o comportamento transitório sob diferentes condições operacionais do sistema, bem como da composição do arranjo híbrido de compensação.

Figura 71 – Comportamento transitório em diferentes configurações do sistema simulado: (a) Corrente no secundário do transformador; (b) Corrente no neutro do sistema; (c) Corrente na carga; (d) Corrente no filtro eletromagnético.



Fonte: Dados da autora.

### 6.3 ARRANJO HÍBRIDO DE FILTROS *VERSUS* FILTRO ATIVO DE QUATRO BRAÇOS

Nesta seção, realizaram-se simulações que têm por objetivo proporcionar uma comparação de desempenho entre o filtro ativo paralelo de quatro braços e o arranjo composto pelo supressor eletromagnético e o filtro ativo paralelo de três braços.

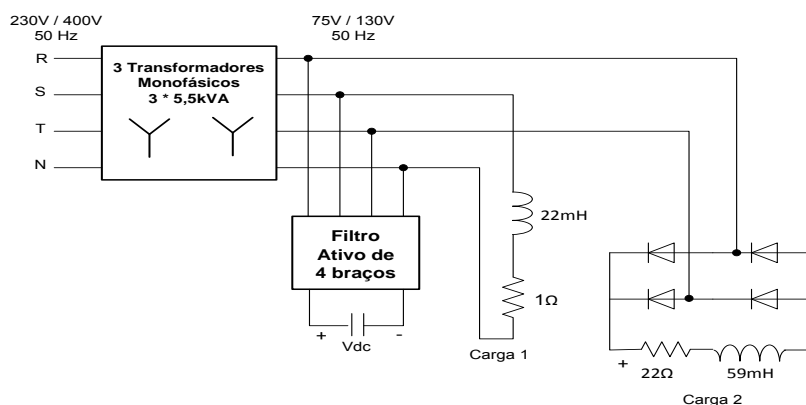
Para concretizar essa análise comparativa, os resultados para operação do filtro ativo paralelo de quatro braços foram extraídos da referência (PREGITZER, 2006) e os resultados do arranjo híbrido de filtros foram simulados no *software PSIM*<sup>®</sup>.

O modelo de simulação da referência (PREGITZER, 2006) foi desenvolvido pelo referido autor no *PSCAD 4.2*<sup>®</sup>. Esse artigo confirmou a validação da modelagem do FAP de quatro braços no ambiente digital por meio de um teste de aderência entre os resultados experimentais e simulados.

Os modelos de simulação foram avaliados em um sistema elétrico trifásico a quatro fios, com frequência de 50 Hz. Duas diferentes cargas foram conectadas ao sistema. Uma carga *RL* foi ligada entre a fase *S* e o fio neutro, o que provoca um desequilíbrio de 200%, de acordo com o padrão IEEE 519-1992, e um fator de potência de 0,12 (essa carga é predominantemente indutiva). A segunda carga, um retificador de quatro pontes de diodos com uma carga *RL*, foi ligada ao sistema entre as fases *R* e *T*. A distorção harmônica total das correntes foi de 30,2% nessas fases. O desequilíbrio atual do sistema elétrico teste é de 84% (PREGITZER, 2006).

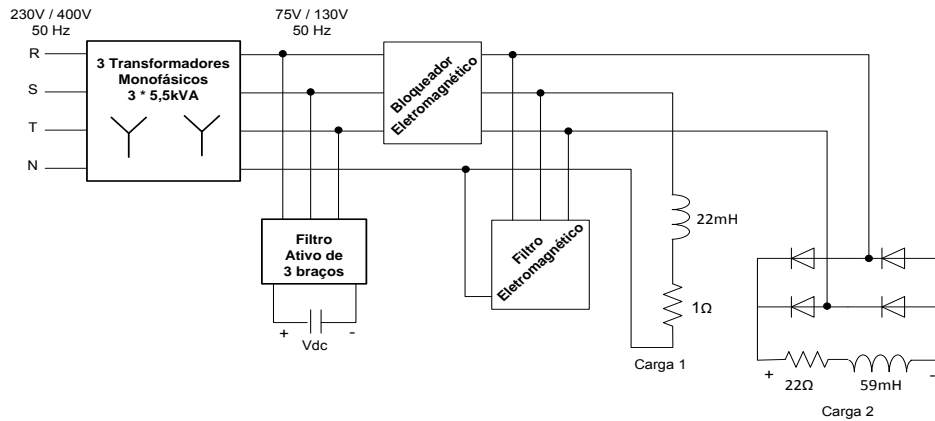
A figura 72 ilustra o sistema montado no *PSCAD 4.2*<sup>®</sup>. Com cargas idênticas, a figura 73 mostra o sistema montado no *PSIM*<sup>®</sup>, onde o sistema de filtragem é composto pelo arranjo híbrido de filtros.

Figura 72 – Sistema montado no ambiente de simulação *PSCAD 4.2*<sup>®</sup>.



Fonte: Adaptado de Pregitzer (2006).

Figura 73 – Sistema montado no ambiente de simulação *PSIM*<sup>®</sup>.



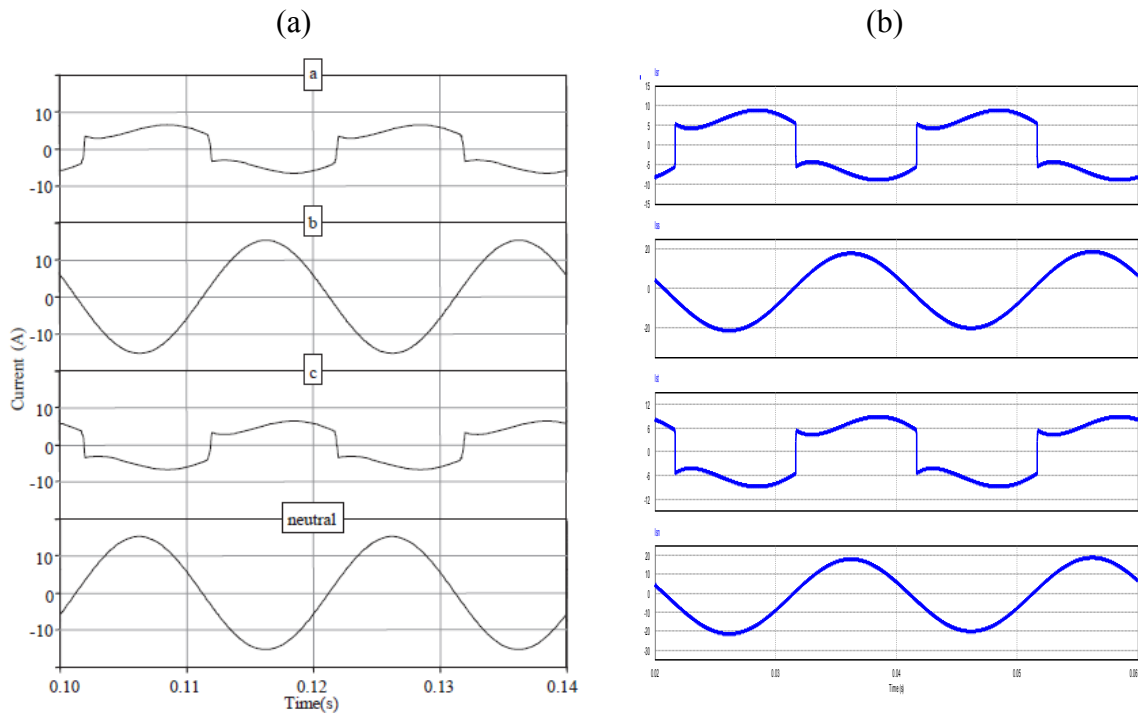
Fonte: Dados da autora.

Os resultados comparativos foram testados em duas diferentes situações.

O primeiro cenário mostra o sistema simulado sem nenhum dispositivo de filtragem em operação. A figura 74 ilustra as correntes do sistema sem nenhum dispositivo de filtragem harmônica conectado. Especificadamente, a figura 74(a) foi obtida a partir da referência (PREGITZER, 2006) e a figura 74(b) foi obtida por simulação no *PSIM*<sup>®</sup>.

Comparando as figuras 74(a) e 74(b) é possível confirmar que a carga construída no ambiente de simulação *PSIM*<sup>®</sup> foi modelada com precisão.

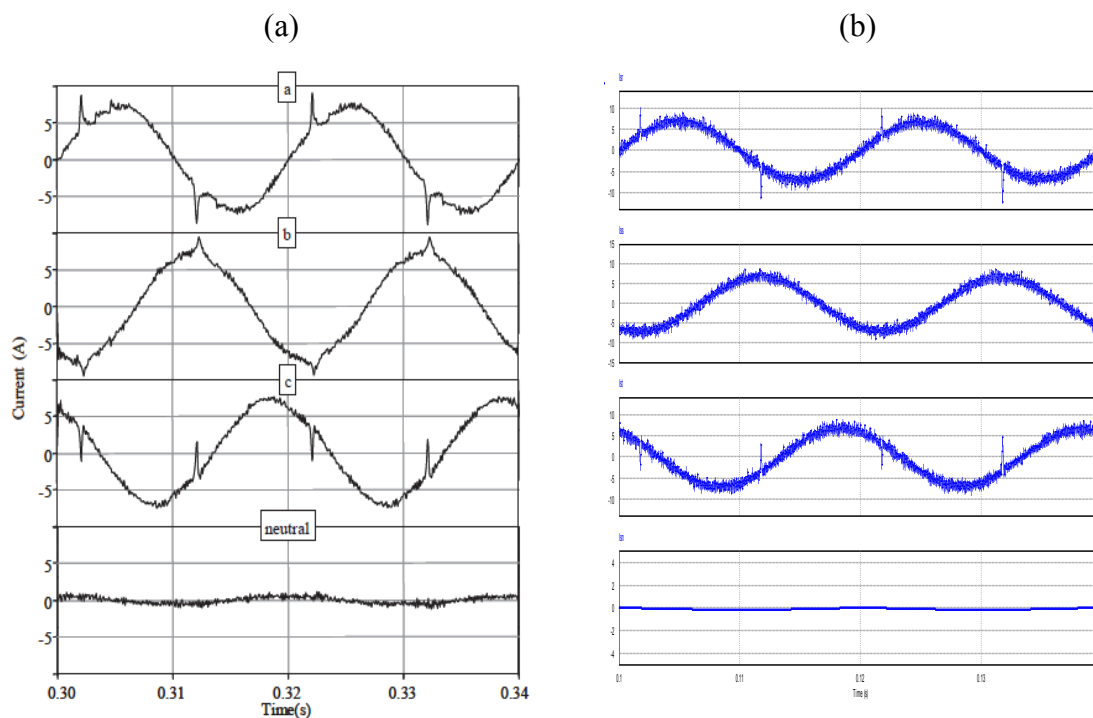
Figura 74 – Sistema simulado sem filtros: (a) *PSCAD 4.2*<sup>®</sup>; (b) *PSIM*<sup>®</sup>.



Fonte: (a) Pregitzer (2006); (b) Dados da autora.

A figura 75(a), obtida a partir da fonte (PREGITZER, 2006), ilustra o sistema simulado no *PSCAD 4.2*<sup>®</sup>, onde a filtragem harmônica fica a cargo do filtro ativo de quatro braços. A figura 75(b) ilustra a situação onde a filtragem harmônica é realizada pelo filtro ativo de três braços e pelo supressor eletromagnético, sendo que esse sistema foi simulado no *PSIM*<sup>®</sup>.

Figura 75 – Sistema simulado com filtragem harmônica: (a) *PSCAD 4.2*<sup>®</sup>; (b) *PSIM*<sup>®</sup>.



Fonte: (a) Pregitzer (2006); (b) Dados da autora.

Os resultados comparativos entre os diferentes sistemas de filtragem mostram sinais bastante semelhantes. Sob esta ótica, entende-se que o novo arranjo híbrido de filtros proposto nesta tese se apresenta como mais uma alternativa para sistemas a quatro fios, sendo que a operação conjunta do FAP de três braços e o supressor eletromagnético demonstra funcionalidades similares a um FAP de quatro braços.

#### 6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo o desempenho do sistema híbrido de filtragem foi investigado por meio de um *software* de simulação digital, o *PSIM*<sup>®</sup>, onde, para os protótipos em questão, fixaram-se valores iguais aos obtidos em laboratório. As investigações foram aqui direcionadas de duas maneiras, em regime permanente para observar o comportamento de cada arranjo de filtragem individualmente, e em regime transitório e no sentido de verificar a rede elétrica, considerando-se alterações na topologia do compensador híbrido, bem como das cargas não

lineares. Os resultados mostraram claramente a atuação dos diferentes dispositivos que compõem o arranjo híbrido de filtragem, sobretudo no que diz respeito às suas limitações operacionais individuais.

Na operação conjunta dos dispositivos, os resultados demonstraram um desempenho eficaz do supressor eletromagnético na filtragem de componentes harmônicas de sequência zero e do FAP na compensação das demais harmônicas.

Levando em consideração as simulações de comparação de desempenho entre dois diferentes sistemas de filtragem harmônica, simulados nos *softwares PSCAD 4.2<sup>®</sup>* e *PSIM<sup>®</sup>*, conclui-se que, num ambiente de simulação digital, o arranjo híbrido de filtros aqui proposto atende as funcionalidades de um filtro ativo paralelo de quatro braços.

Considerando, portanto, os resultados preliminares de simulação satisfatórios, o próximo capítulo será direcionado para análises experimentais do novo arranjo de filtragem harmônica.

## **7 ANÁLISE EXPERIMENTAL DA FUNCIONALIDADE DO ARRANJO HÍBRIDO DE FILTROS**

### **7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Neste capítulo são apresentados resultados experimentais do funcionamento do arranjo híbrido de filtros proposto nesta tese, que consiste nos filtros passivos (cujo conjunto se denomina por supressor eletromagnético, constituído pelo filtro de sequência zero e pelo bloqueador, ambos dispositivos eletromagnéticos, que têm os seus modelos matemáticos apresentados no capítulo 2), e no filtro ativo de potência paralelo (apresentado na seção 5.5). Inicialmente, apresenta-se uma breve explicação dos procedimentos experimentais, incluindo uma descrição sucinta dos materiais e equipamentos utilizados.

Na sequência, tendo em vista uma apresentação mais esclarecedora, são realizados alguns ensaios nos quais o enfoque é ilustrar o comportamento do sistema frente a diferentes condições operacionais. No que tange à apresentação dos resultados obtidos a partir dos experimentos, optou-se apenas por alguns casos específicos, sendo estes os mais representativos para cumprir o objetivo central desta tese, que é apresentar um arranjo híbrido de filtros que apresente as mesmas funcionalidades de um filtro ativo paralelo (FAP) de quatro braços.

### **7.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS**

Com o objetivo de analisar a eficácia da proposta de filtragem apresentada nesta tese, foram montados como plataforma para o desenvolvimento das análises experimentais dois sistemas de filtragem, ilustrados nas figuras 76 e 77.

O sistema da figura 76 é composto por uma carga não linear, um supressor eletromagnético (filtro e bloqueador), um FAP de três braços e três variadores de tensão. Já o sistema da figura 77 é constituído por um FAP de quatro braços, pela mesma carga não linear ilustrada na figura 76 e por três variadores de tensão.

O novo arranjo híbrido de filtros foi avaliado por meio de uma comparação entre o seu desempenho e o desempenho do FAP de quatro braços.

Figura 76 – Diagrama esquemático para estudos experimentais do novo arranjo híbrido de filtros proposto nesta tese.

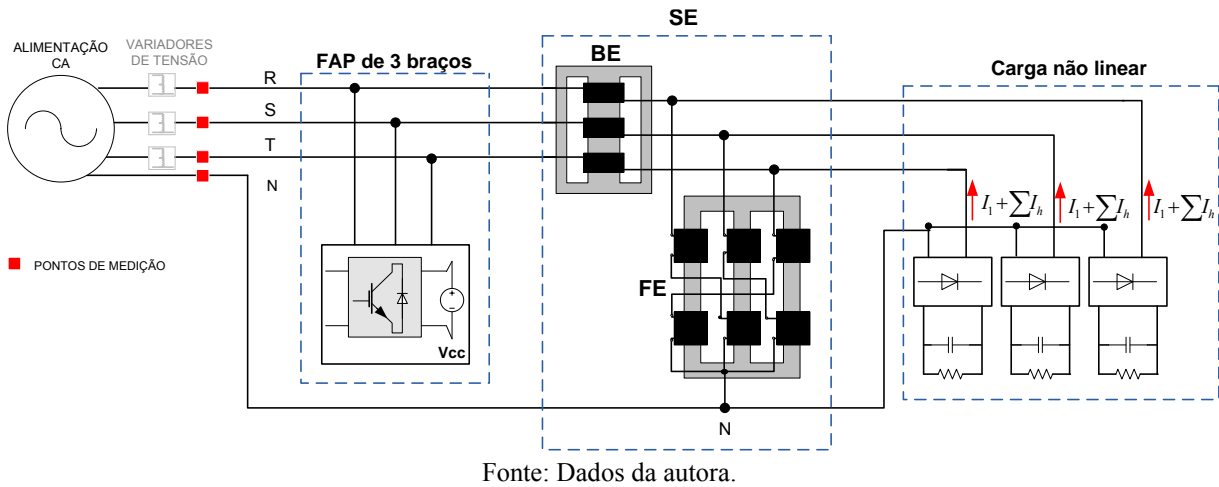
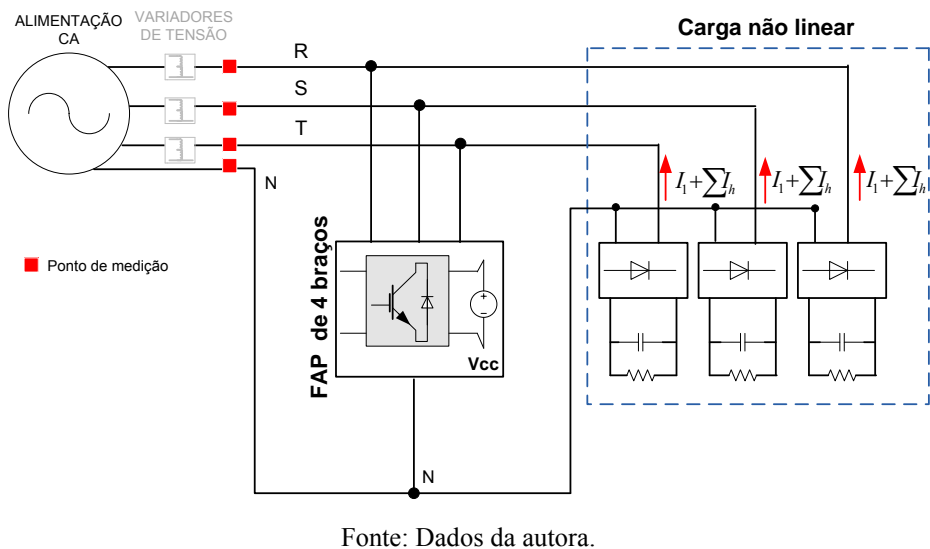


Figura 77 – Diagrama esquemático para estudos experimentais do FAP de quatro braços.

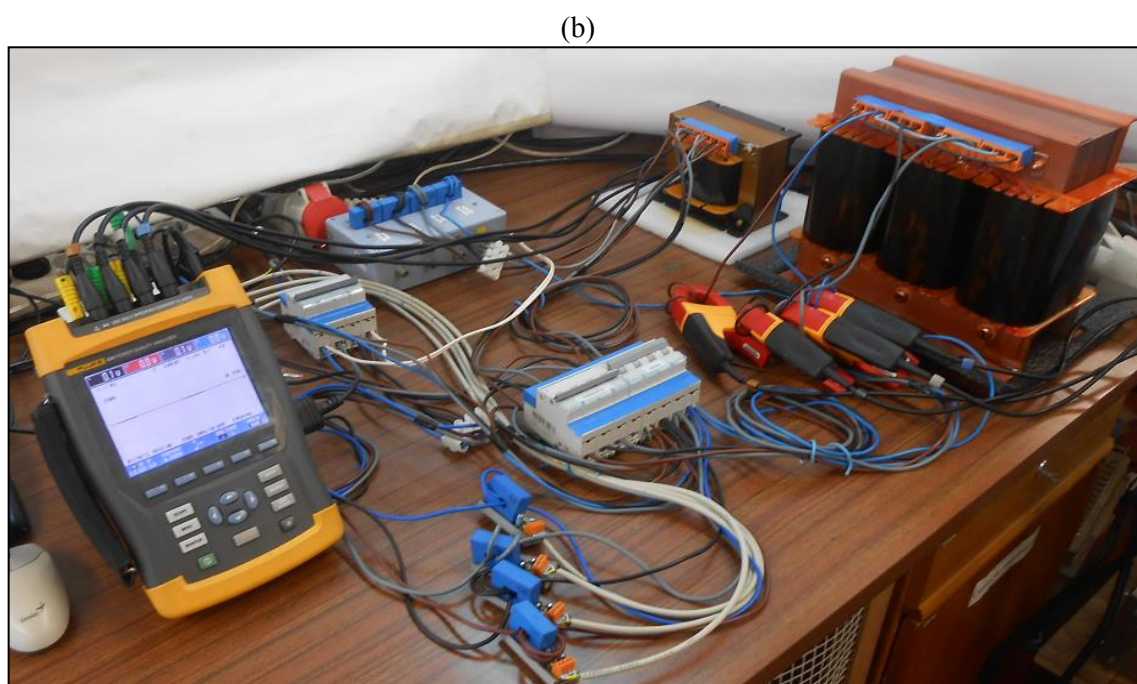
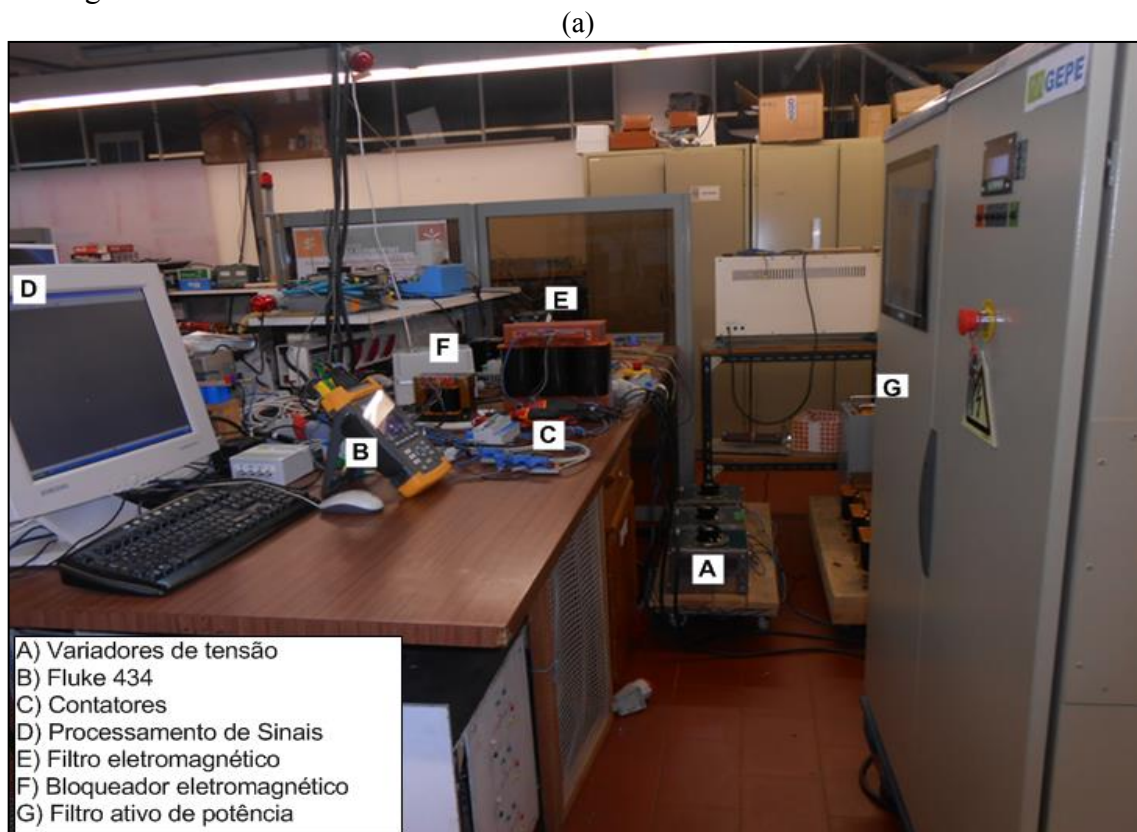


Os procedimentos experimentais que possibilitaram a realização dos ensaios foram proporcionados a partir de materiais e equipamentos disponíveis no laboratório do GEPE (Grupo de Eletrônica de Potência e Energia) na Universidade do Minho. A frequência e os defasamentos entre as tensões dos ensaios foram determinados pela rede de alimentação de Guimarães, Portugal, uma vez que os dispositivos de filtragem e as cargas foram ligados diretamente à rede elétrica. Apenas para as situações em que foram impostos desequilíbrios nas tensões de alimentação do sistema, utilizaram-se três variadores de tensão monofásicos a partir dos quais foi possível definir as amplitudes para cada uma das tensões fase-neutro. O controle da aquisição de dados e o processamento dos sinais captados foram realizados por meio do *Fluke 434 Power Quality Analyzer*<sup>®</sup> e do *FlukeView*<sup>®</sup> *Power Quality Analyser* Versão 3.34, respectivamente.



A figura 78(a) ilustra a vista geral da bancada montada para as análises experimentais, com todos os componentes do arranjo híbrido de filtragem. A figura 78(b) dá ênfase à montagem da bancada com os dispositivos eletromagnéticos.

Figura 78 – Bancada de análises experimentais: (a) Vista geral; (b) Bancada com dispositivos eletromagnéticos.



Fonte: Dados da autora.

### 7.2.1 VARIADOR DE TENSÃO

Três variadores de tensão monofásicos, figura 79, foram utilizados visando controlar a tensão aplicada sobre o sistema nos ensaios que investigam a atuação dos arranjos de filtragem quando operando com desequilíbrios nas tensões de alimentação. Os variadores de tensão, também chamados de *variacs*, funcionam basicamente como transformadores dotados de secundário variável. Quando o primário desse transformador é ligado diretamente à rede elétrica, é possível ajustar o cursor que seleciona o nível de tensão almejado, sendo que, portanto, esse equipamento é muito útil para testes de dispositivos e sistemas em desenvolvimento.

Pelo fato de os *variacs* serem conectados diretamente à rede elétrica, conclui-se que, para os ensaios em que foram utilizados, a carga não linear instalada não é a única fonte geradora de harmônicos do sistema, uma vez que, mesmo com um valor baixo, há um certo nível de distorção harmônica proveniente da própria rede elétrica. Por outro lado, como ponto forte, o uso desse equipamento permite uma análise em um sistema real.

Figura 79 – Três variadores de tensão CA (*variacs*) utilizados nos ensaios.



Fonte: Dados da autora.

### 7.2.2 MEDIÇÃO E PROCESSAMENTO DE SINAIS

Para coleta das medições utilizou-se o analisador *Fluke 434 Power Quality Analyzer*<sup>®</sup>, figura 80. O *Fluke 434* é uma ferramenta completa de monitoração de problemas em sistemas elétricos trifásicos, que mede praticamente todos os parâmetros de energia do sistema, como: tensão, corrente, frequência, potência, consumo de energia, fator de potência, desequilíbrio, harmônicas e inter-harmônicas (FLUKE, 2008). Além disso, é um medidor próprio para estudos de consumo, análises de carga e de qualidade de energia elétrica. A tabela 12 mostra as principais especificações técnicas do equipamento.

Figura 80 – Analisador de sinais *Fluke 434*.

Fonte: Dados da autora.

Tabela 12 – Especificações técnicas do *Fluke 434*.

<b>Saídas</b>	4 de tensão/ 4 de corrente (3 fases + neutro) Velocidade máxima de amostragem: 200kS/s simultaneamente em cada canal.
<b>Tensão</b>	Vrms (AC + DC) Faixa de medição: 1 ... 1000Volts Precisão: 0,1% da tensão nominal
<b>Corrente</b>	Arms (AC + DC) Faixa de medição: 0 ... 20kAmperes Precisão: $\pm 0,5\%$ da corrente nominal
<b>Frequência</b>	50 Hz nominal Faixa de medição: 40 a 70 Hz Precisão: $\pm 0,01$ Hz

Fonte: Adaptado de Fluke (2008).

Os instrumentos conectados às saídas de tensão e corrente do *Fluke 434* são ilustrados na figura 81. A figura 81(a) ilustra a pinça de corrente alternada *Fluke i400s* que opera nas faixas de 0 a 40 A e de 0 a 400 A. As medições de tensão, figura 81(b), foram obtidas diretamente a partir dos sensores LEM 100-P.

Figura 81 – Medidores. (a) Pinças Fluke i400s; (b) Sensores LEM 100-P.

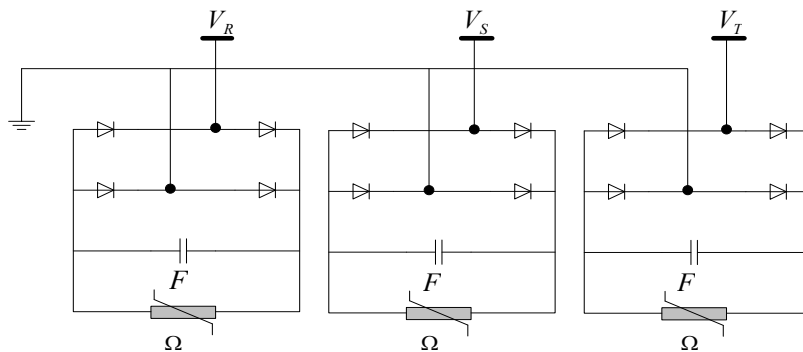


Fonte: (a) Fluke (2004); (b) Dados da autora.

### 7.2.3 CARGA NÃO LINEAR

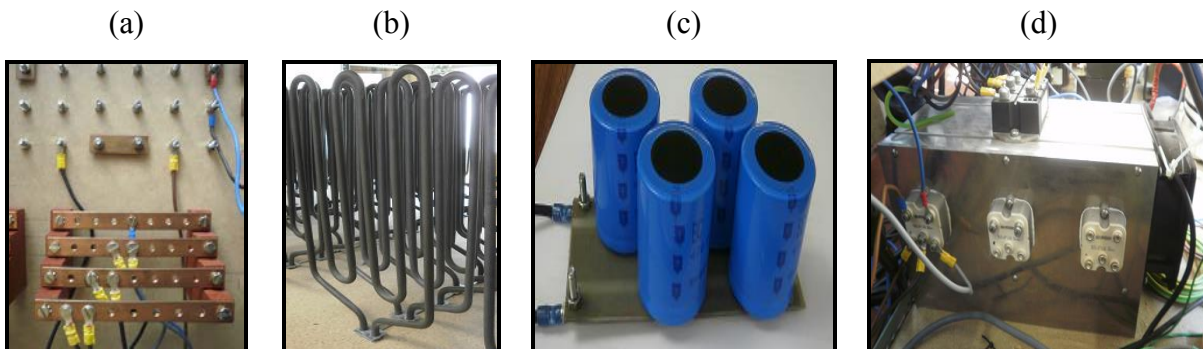
Para composição de uma carga não linear trifásica existem inúmeras possibilidades. Nesse sentido, optou-se por um arranjo de cargas não lineares com expressiva concentração de harmônicas de sequência zero, mas que também gera parcelas de correntes harmônicas de sequência positiva e negativa. Para tanto, adotou-se uma carga trifásica não linear composta a partir de três retificadores monofásicos construídos na topologia em ponte, alimentando cargas resistivas variáveis, com filtragem capacitiva. As figuras 82 e 83 ilustram o arranjo utilizado e as fotografias dos componentes dos retificadores, respectivamente.

Figura 82 – Carga não linear trifásica e detalhe dos retificadores.



Fonte: Dados da autora.

Figura 83 – Componentes da carga não linear: (a) Associador de resistências; (b) Resistências; (c) Capacitores; (d) Módulo retificador.



Fonte: Dados da autora.

A tabela 13 apresenta os dados nominais da carga não linear.

Tabela 13 – Dados nominais da carga não linear.

Capacitores de filtragem no lado CC	2820 $\mu$ F
Valor fixado para os resistores de carga	26 $\Omega$

Fonte: Dados da autora.

#### 7.2.4 FILTRO ELETROMAGNÉTICO

Para os ensaios experimentais utilizou-se o protótipo do filtro, projetado segundo os critérios estabelecidos no capítulo 5, seção 5.2.1. Na tabela 14 constam os dados nominais obtidos a partir de medições realizadas no protótipo construído.

Tabela 14 – Dados nominais do filtro eletromagnético.

Potencia nominal de projeto	6,7 kVA
Tensão nominal de projeto	230 V
Indutância própria das bobinas	300 mH
Fator de acoplamento entre bobinas de uma mesma coluna	0,99

Fonte: Dados da autora.

#### 7.2.5 BLOQUEADOR ELETROMAGNÉTICO

Para os ensaios experimentais utilizou-se o protótipo do bloqueador, projetado segundo os critérios estabelecidos no capítulo 5, seção 5.2.2. Na tabela 15 constam os dados nominais obtidos a partir de medições realizadas no protótipo construído.

Tabela 15 – Dados nominais do bloqueador eletromagnético.

Potencia nominal de projeto	1,1 kVA
Queda de tensão máxima considerada no projeto	15 V
Indutância própria das bobinas	5 mH
Fator de acoplamento entre bobinas de uma mesma coluna	0,99

Fonte: Dados da autora.

#### 7.2.6 FILTRO ATIVO PARALELO

O filtro ativo paralelo utilizado nos ensaios experimentais deste trabalho é o mesmo apresentado na seção 5.5, capítulo 5. A tabela 16 apresenta alguns dos principais parâmetros da configuração do FAP.

Tabela 16 – Parâmetros do filtro ativo paralelo.

Frequência de amostragem	32 kHz
Capacitor do lado CC	740 uF
Indutância de saída	5 mH
Frequência máxima de chaveamento	16 kHz

Fonte: Pregitzer (2006).



### 7.3 ANÁLISES EXPERIMENTAIS DAS FUNCIONALIDADES DO ARRANJO HÍBRIDO DE FILTROS

As análises aqui contempladas foram realizadas para diferentes arranjos do sistema em regime permanente, tendo como objetivo central a investigação da funcionalidade do sistema híbrido de filtragem, verificando, por meio de uma comparação de desempenho com o FAP de quatro braços, se o arranjo de filtros proposto nesta tese apresenta todas as funcionalidades de um FAP de quatro braços.

Diversos resultados foram obtidos durante os processos de ajuste do modelo do sistema de filtragem harmônica. Buscando uma apresentação sintética e clara, são apresentados a seguir alguns dos principais resultados dos casos ensaiados, nos quais o foco é ilustrar o comportamento e o desempenho do arranjo de filtragem. As condições operacionais impostas para os ensaios experimentais são apresentadas na tabela 17. Para facilitar as descrições em figuras e tabelas, serão utilizadas siglas para referência do filtros ativo de três braços (FAP\_3) e do filtro ativo de quatro braços (FAP\_4).

Tabela 17 – Ensaios experimentais selecionados.

<b>Caso</b>	<b>Cargas</b>	<b>Tensões</b>	<b>SE</b>	<b>FAP_3</b>	<b>FAP_4</b>
<b>1</b>	Equilibradas	Equilibradas	Desligado	Desligado	Desligado
<b>2</b>	Equilibradas	Equilibradas	Ligado	Ligado	Desligado
<b>3</b>	Equilibradas	Equilibradas	Desligado	Desligado	Ligado
<b>4</b>	Desequilibradas	Equilibradas	Desligado	Desligado	Desligado
<b>5</b>	Desequilibradas	Equilibradas	Ligado	Ligado	Desligado
<b>6</b>	Desequilibradas	Equilibradas	Desligado	Desligado	Ligado
<b>7</b>	Equilibradas	Desequilibradas	Desligado	Desligado	Desligado
<b>8</b>	Equilibradas	Desequilibradas	Ligado	Ligado	Desligado
<b>9</b>	Equilibradas	Desequilibradas	Desligado	Desligado	Ligado

Fonte: Dados da autora.

Os resultados ilustrados a seguir são apresentados por meio das formas de onda de tensões e correntes, incluindo seus respectivos espectros harmônicos de componentes de fase e componentes sequenciais. Adicionalmente, para compor esses resultados são disponibilizadas, no Apêndice B, as tabelas com os valores correspondentes aos espectros das componentes de fase e sequenciais para cada um dos casos abordados. Assim como para os casos simulados na seção 6.2.1, os cálculos das componentes sequenciais e das respectivas

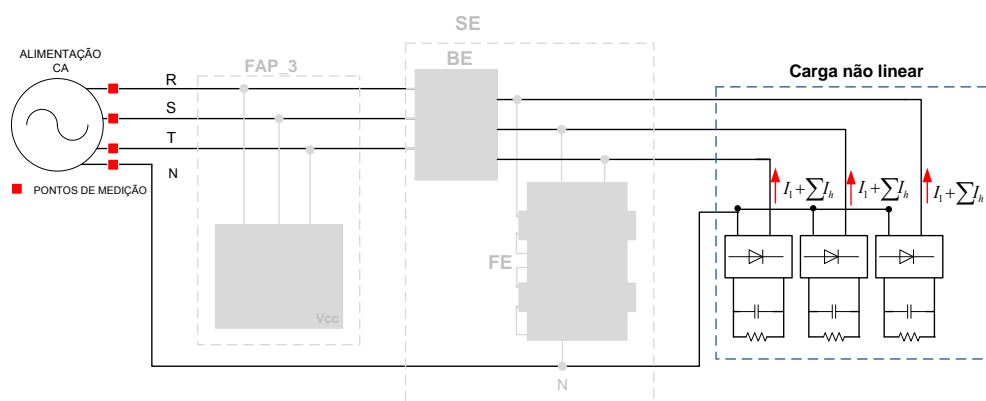
*DFTs (Discrete Fourier Transforms - Transformadas Discretas de Fourier)* foram realizados utilizando uma planilha eletrônica desenvolvidas no *Excel*<sup>®</sup>. Para isso, foram extraídos dos resultados obtidos no *FlukeView*<sup>®</sup> *Power Quality Analyser* 150 amostras por ciclo para cada período de interesse. São apresentados também dados de potência na fonte e carga.

Adicionalmente, visando ainda realizar um teste de aderência entre o arranjo híbrido ensaiado e os modelos dos filtros simulados no *software PSIM*<sup>®</sup>, foram selecionados dois casos, 1 e 2, sendo que o caso 2 oferece subsídios para a ilustração das principais características operacionais da filtragem harmônica proposta neste trabalho. A validação do modelo foi realizada a partir da comparação entre as formas de onda das tensões e correntes de alimentação. Vale destacar que os modelos do supressor eletromagnético e do FAP de quatro braços já foram validados em simuladores no domínio do tempo (FREITAS, 2011) e (PREGITZER, 2006).

### I. Caso 1 – Sem filtros com tensões de alimentação e cargas equilibradas

O objetivo deste caso é observar as harmônicas injetadas pelo conjunto de cargas no sistema, sem nenhum dispositivo de filtragem conectado, figura 84.

Figura 84 – Diagrama esquemático de ensaio do caso 1, sem filtros.

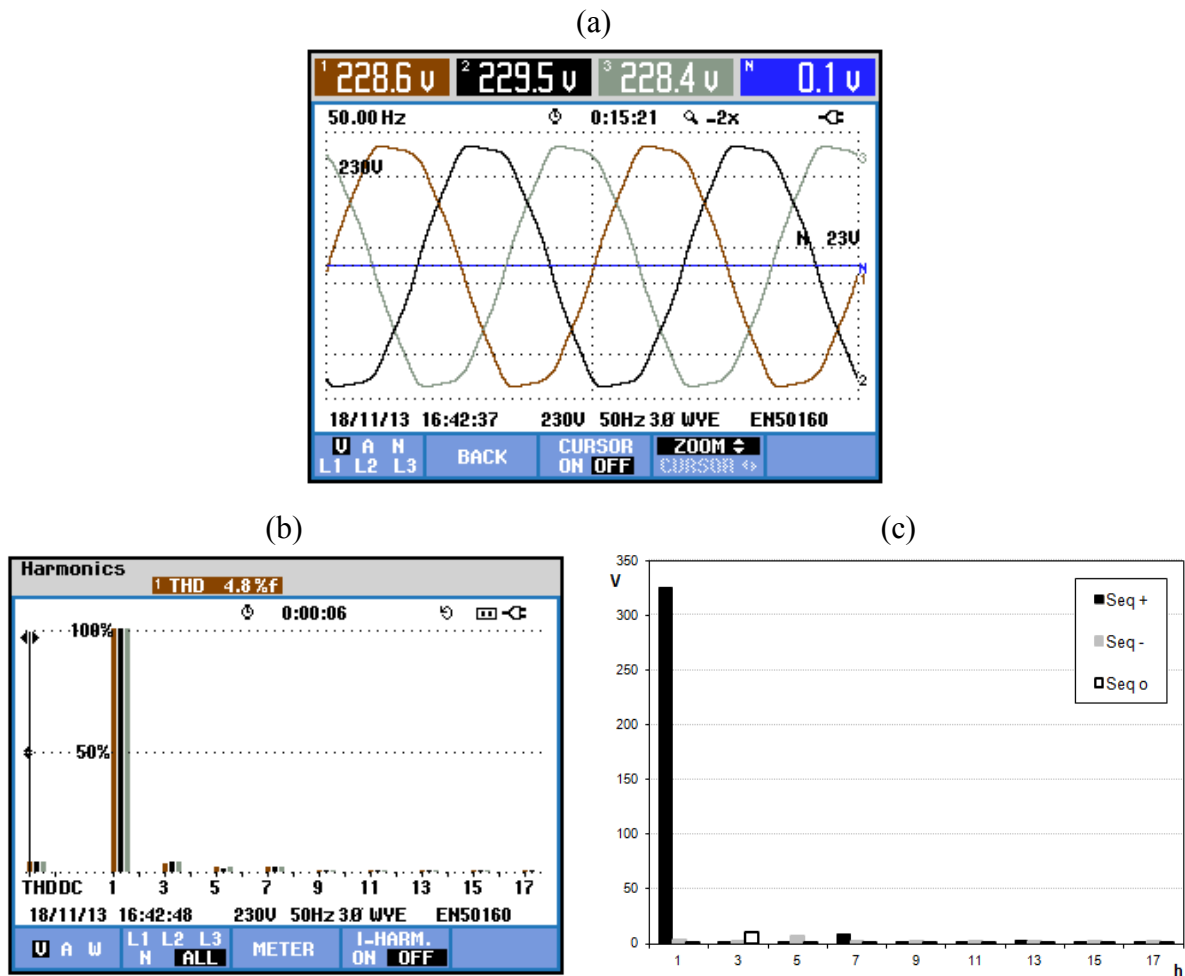


Fonte: Dados da autora.

Esta topologia remete à operação do sistema sem nenhum dispositivo de filtragem. Para compor a carga, adotaram-se três retificadores monofásicos construídos na topologia em ponte, alimentando cargas resistivas variáveis, com filtragem capacitiva (seção 7.2.3). A alimentação da carga foi feita diretamente da rede elétrica. Estes resultados são tomados como referência para efeito comparativo da atuação dos sistemas de filtragem apresentados nos casos 2 e 3, destacando-se as formas de onda e o espectro harmônico das correntes e tensões trifásicas.

As figuras 85 e 86 ilustram as formas de onda e os níveis de distorção harmônica de tensões e correntes do sistema trifásico.

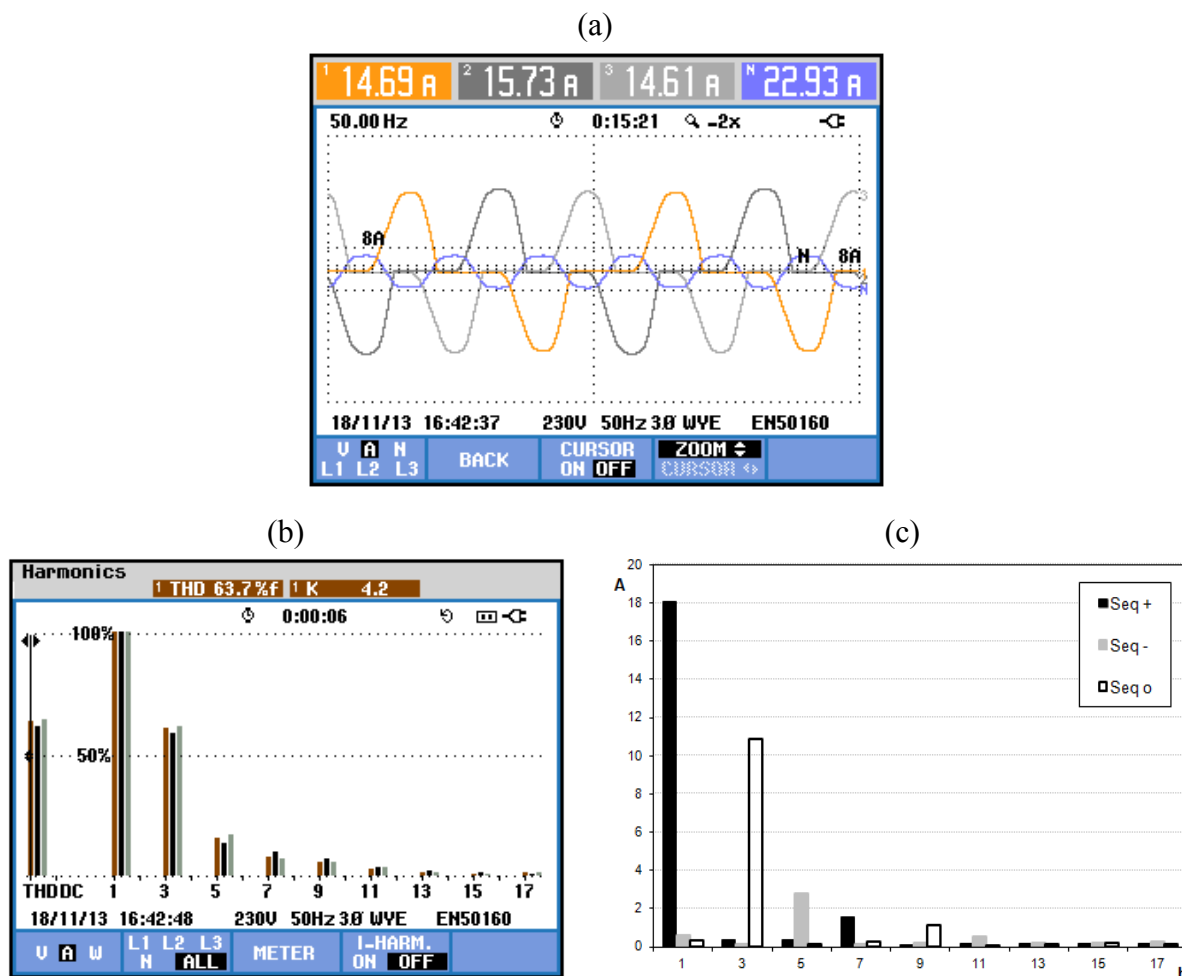
Figura 85 – Caso 1 – Sistema sem filtros: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).



Fonte: Dados da autora.



Figura 86 – Caso 1 – Sistema sem filtros: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).



Fonte: Dados da autora.

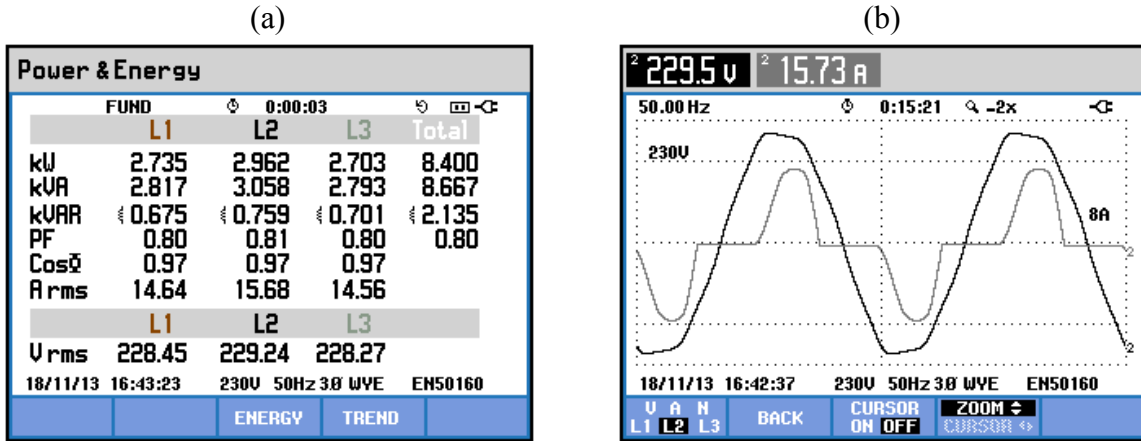
Os resultados obtidos no experimento indicam uma distorção harmônica total da tensão (DTT), feita pela média das distorções em cada uma das fases, de 4,2%, figuras 85(b) e (c).

A distorção total de corrente (DTC) é de 63,1% (média das distorções em cada uma das fases), figuras 86(b) e (c). Como esperado, a 3ª harmônica, com forte concentração em sequência zero, apresenta a amplitude mais relevante. No entanto, as harmônicas de 5ª, 7ª e 9ª ordem têm contribuição na composição da distorção total. Destaca-se que o valor da corrente no condutor neutro, 22,93A, supera o valor das correntes de fase.

Como neste caso não há nenhum dispositivo de filtragem conectado entre a fonte e a carga, as potências ativa, reativa e capacitiva, bem como o fator de potência são idênticos, qualquer que seja o ponto de medição. Os valores das potências ativa, reativa e capacitiva na carga, bem como o fator de potência, são apresentados na figura 87. O fator de potência

obtido neste caso é de 0,80 e deve-se, fundamentalmente, à distorção harmônica gerada pela carga.

Figura 87 – Caso 1 – Sistemas sem filtros: (a) Potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase *S*.

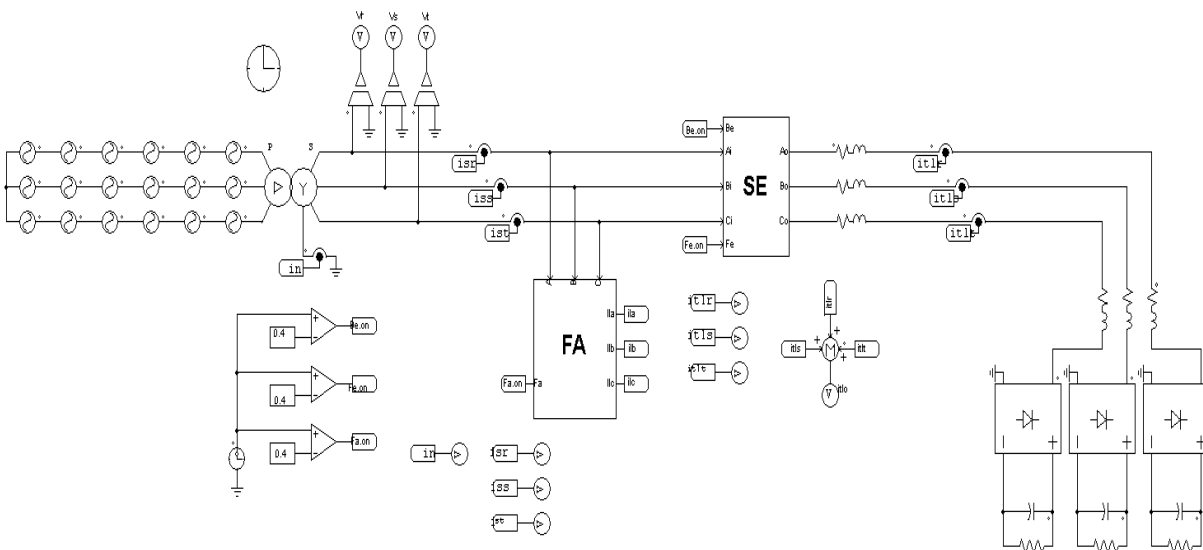


Fonte: Dados da autora.

#### a. Teste de aderência – Caso 1

A figura 88 ilustra o diagrama simulado no *PSIM*<sup>®</sup>. Esse diagrama de simulação foi utilizado para os testes de aderência apresentados nesta alínea e na alínea b do caso 2. As fontes de tensão, em série, foram colocadas a fim de simularem as distorções da tensão de alimentação. O transformador de acoplamento foi inserido como representação da impedância série total da rede elétrica. A modelagem da carga não linear e dos filtros é semelhante às características apresentadas na seção 6.2 do capítulo anterior.

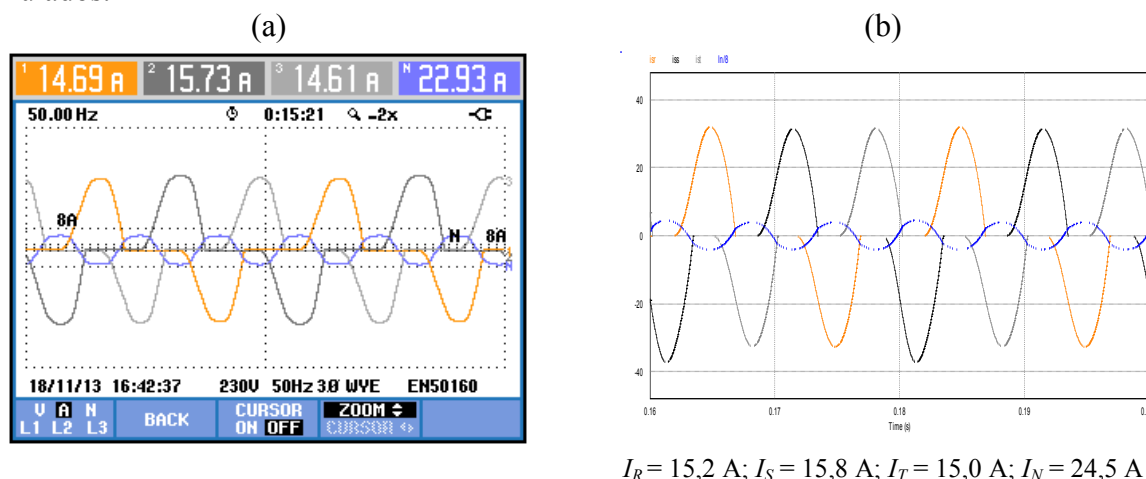
Figura 88 – *Layout* do sistema simulado em *PSIM*<sup>®</sup>.



Fonte: Dados da autora.

A figura 89 apresenta os resultados ensaiados (a) e simulados (b), respectivamente, que correspondem às correntes nas fases  $R$ ,  $S$  e  $T$ , medidas na fonte de alimentação, sem a atuação de nenhum dispositivo de filtragem conectado ao sistema. Para facilitar a comparação visual entre as figuras, a corrente no condutor neutro do resultado de simulação é dividida oito vezes, figura 89(b).

Figura 89 – Teste de aderência – Caso 1: (a) Resultados experimentais; (b) Resultados simulados.



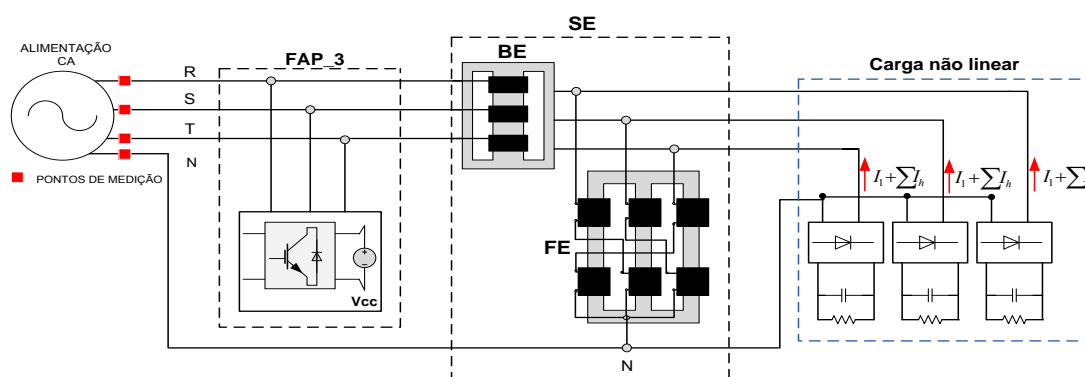
Fonte: Dados da autora.

Analisando a figura 89, que mostra os resultados do sistema sem a atuação dos dispositivos de filtragem, observa-se uma boa aderência entre o modelo teórico da carga simulado e o sistema experimental.

## II. Caso 2 – SE e FAP de três braços em operação com tensões de alimentação e cargas equilibradas

Neste caso, o arranjo híbrido de filtro ativo e filtros passivos é conectado ao sistema. O diagrama esquemático para análise do caso 2 é ilustrado na figura 90.

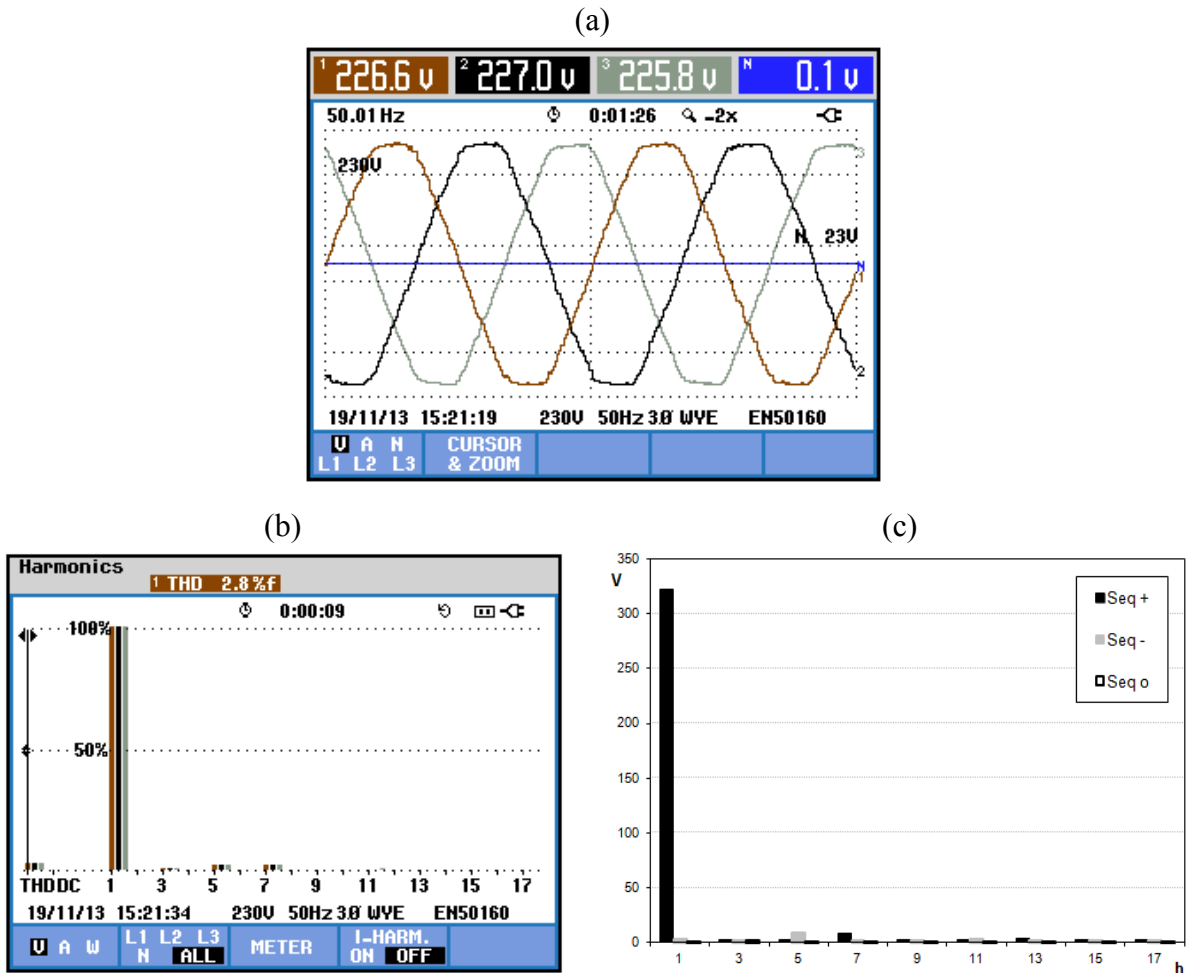
Figura 90 – Diagrama esquemático de ensaio do caso 2, com arranjo híbrido de filtros.



Fonte: Dados da autora.

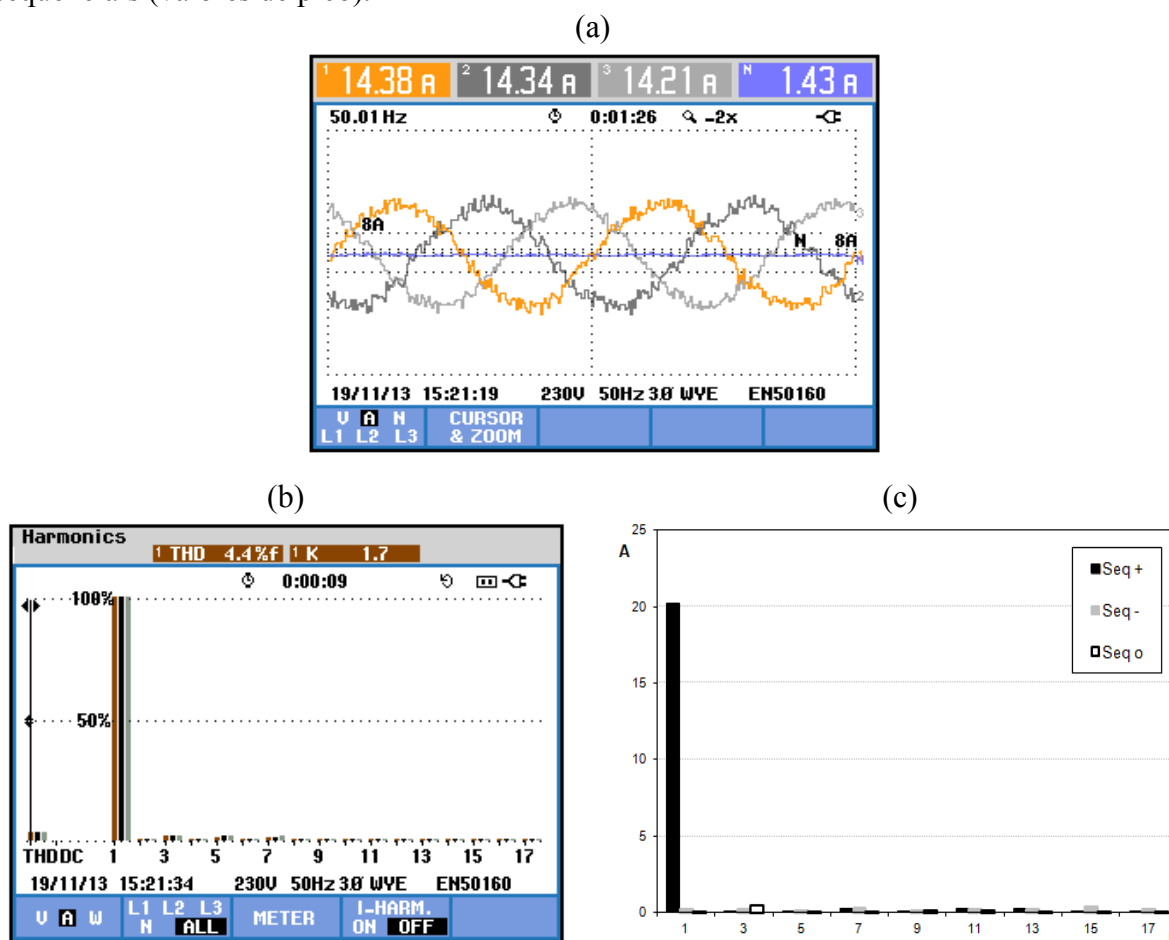
Os resultados experimentais obtidos para a tensão e corrente de alimentação com o supressor eletromagnético e o filtro ativo de três braços ligados são ilustrados nas figuras 91 e 92.

Figura 91 – Caso 2 – SE e FAP de três braços em operação com tensões e cargas equilibradas: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).



Fonte: Dados da autora.

Figura 92 – Caso 2 – SE e FAP de três braços em operação com tensões e cargas equilibradas: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).



Fonte: Dados da autora.

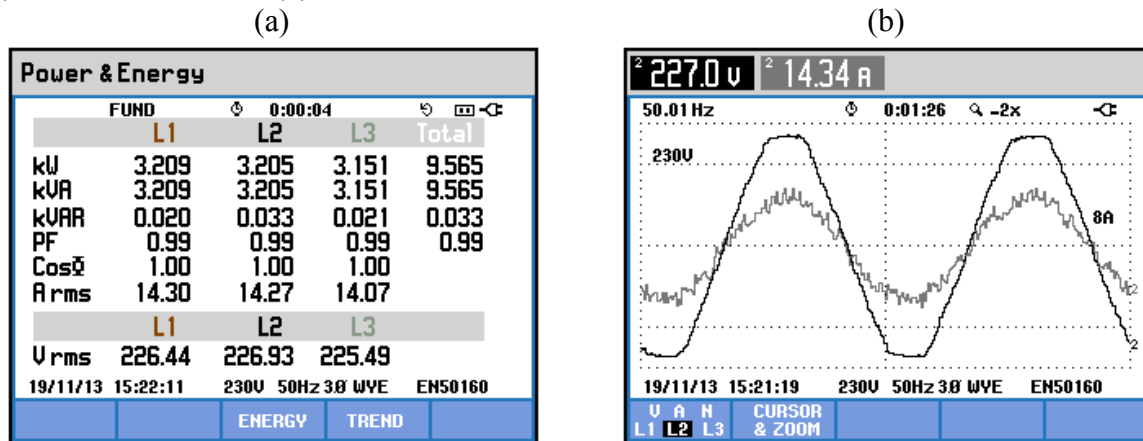
Os resultados apresentados na figura 92 mostram uma drástica redução das componentes de 3ª ordem de corrente, especialmente a 3ª harmônica. Tal fato se dá devido à boa relação entre a impedância de sequência zero do sistema no PAC e a impedância do filtro eletromagnético, favorecendo o desvio da corrente de sequência-zero que flui através do filtro. Como esperado, este comportamento é proporcionado pela presença do bloqueador eletromagnético de sequência zero em série com a rede elétrica.

Outro fator de destaque na operação conjunta dos dispositivos eletromagnéticos é a redução expressiva da corrente do condutor neutro, passando de 22,93 A (caso base) para 1,43 A.

De um modo geral, a atuação do arranjo híbrido de filtragem foi eficaz e satisfatória, uma vez que a operação do supressor eletromagnético junto ao FAP de três braços concretizou as funcionalidades de um FAP de quatro braços, que filtra todas as ordens harmônicas.

O fator de potência obtido neste caso é de 0,99, figura 93(a). Esta melhoria deve-se ao sistema de filtragem em questão, que deixa a tensão e a corrente praticamente em fase, como visto na figura 93(b).

Figura 93 – Caso 2 – SE e FAP de três braços em operação com tensões e cargas equilibradas: (a) Potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase S.



Fonte: Dados da autora.

Para facilitar as análises comparativas, a tabela 18 apresenta os resultados obtidos nos ensaios dos casos 1 e 2. Os valores correspondentes às distorções harmônicas nas três fases do sistema são obtidos pela média das medidas.

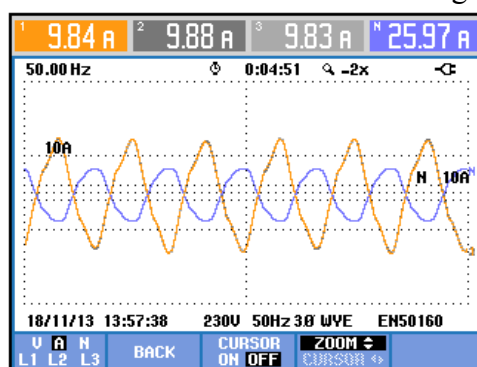
Tabela 18 – Comparativo entre os casos 1 e 2.

	Caso 1: Sem filtros	Caso 2: Com SE e FAP_3
<b>DTT(%)</b>	4,2	3,0
<b>DTC(%)</b>	63,1	3,6
<b>I<sub>neutro</sub> (A)</b>	22,93	1,43
<b>FP</b>	0,8	0,99

Fonte: Dados da autora.

A figura 94 ilustra as formas de onda das correntes que passam pelo filtro eletromagnético, onde se constata sua característica homopolar, e com frequência predominante em 3<sup>a</sup> harmônica.

Figura 94 – Correntes no filtro eletromagnético.



Fonte: Dados da autora.

Como previsto, o filtro eletromagnético proporciona um caminho de baixa impedância para circulação das harmônicas de sequência zero. Assim, sob o ponto de vista da mitigação de harmônicas, isso significa dizer que, em condições operacionais equilibradas, todas as harmônicas múltiplas de três são filtradas por esse dispositivo. Por outro lado, é prevista na concepção deste dispositivo uma alta impedância de sequência positiva, o que também impõe alguma componente residual de sequência positiva e/ou negativa pelo dispositivo. As tabelas 19, 20 e a figura 95 ilustram os resultados obtidos nesse caso.

Tabela 19 – Distribuição sequencial das harmônicas pelo filtro eletromagnético (valores de pico).

<b>h</b>	<b>F+</b>	<b><math>\Phi^{\circ+}</math></b>	<b>F-</b>	<b><math>\Phi^{\circ-}</math></b>	<b>F<sub>0</sub></b>	<b><math>\Phi^{\circ_0}</math></b>
1	0.13	-50.7	0.01	125.2	0.24	-64.7
2	0.04	-26.1	0.01	-172.0	0.26	-112.4
3	0.04	26.3	0.02	149.1	13.97	-60.0
4	0.00	178.2	0.01	30.4	0.14	-69.2
5	0.00	-166.2	0.00	81.4	0.34	-117.1
6	0.00	6.0	0.00	-170.4	0.28	-51.4
7	0.00	23.0	0.00	-137.5	0.13	-34.8
8	0.00	51.1	0.00	-137.4	0.22	-89.5
9	0.00	-16.7	0.00	139.0	1.76	-69.4
10	0.00	66.0	0.00	-141.2	0.17	-98.2
11	0.00	-10.4	0.00	178.7	0.26	-97.6
12	0.00	-35.7	0.00	-161.7	0.17	-87.3
13	0.00	11.5	0.00	171.2	0.16	-69.7
14	0.00	14.0	0.00	-151.0	0.17	-86.9
15	0.00	-19.0	0.00	145.2	0.38	-30.9

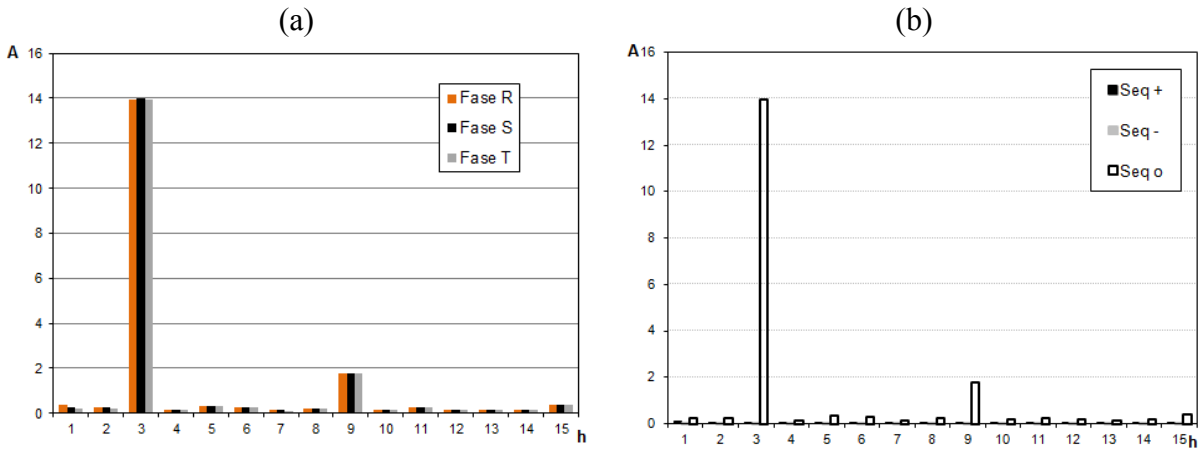
Fonte: Dados da autora.

Tabela 20 – Valores RMS por fase das correntes no filtro eletromagnético.

<b>Fases</b>			<b>Sequenciais</b>		
<b>R</b>	<b>S</b>	<b>T</b>	<b>(+)</b>	<b>(-)</b>	<b>(0)</b>
9,8 A	9,9 A	9,8 A	0,1 A	0,0 A	9,8 A

Fonte: Dados da autora.

Figura 95 – Espectros harmônicos das correntes no filtro eletromagnético: (a) Espectro de fase; (b) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).

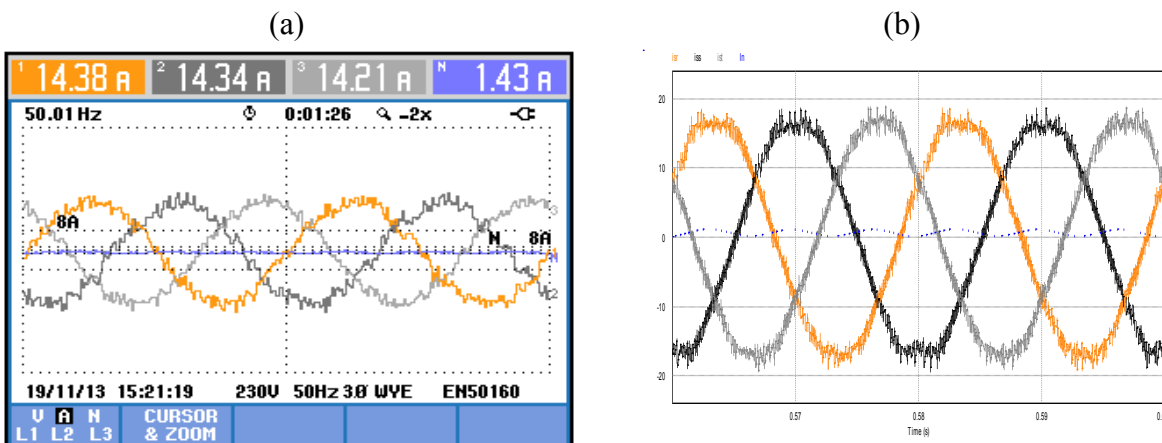


Fonte: Dados da autora.

b. *Teste de aderência – Caso 2*

Para validação dos modelos dos filtros que compõe o arranjo híbrido de filtragem, foi simulado um sistema com características semelhantes às estabelecidas na plataforma experimental. O diagrama de simulação é o mesmo apresentado na figura 88. Neste momento, tendo em conta a atuação do sistema de filtragem completo, as chaves temporizadas contidas no diagrama de simulações são acionadas. Objetivando uma comparação entre os resultados ensaiados e simulados, apresentam-se na figura 96 as correntes nas fases R, S e T, medidas na fonte de alimentação.

Figura 96 – Teste de aderência – Caso 2: (a) Resultados experimentais; (b) Resultados simulados.



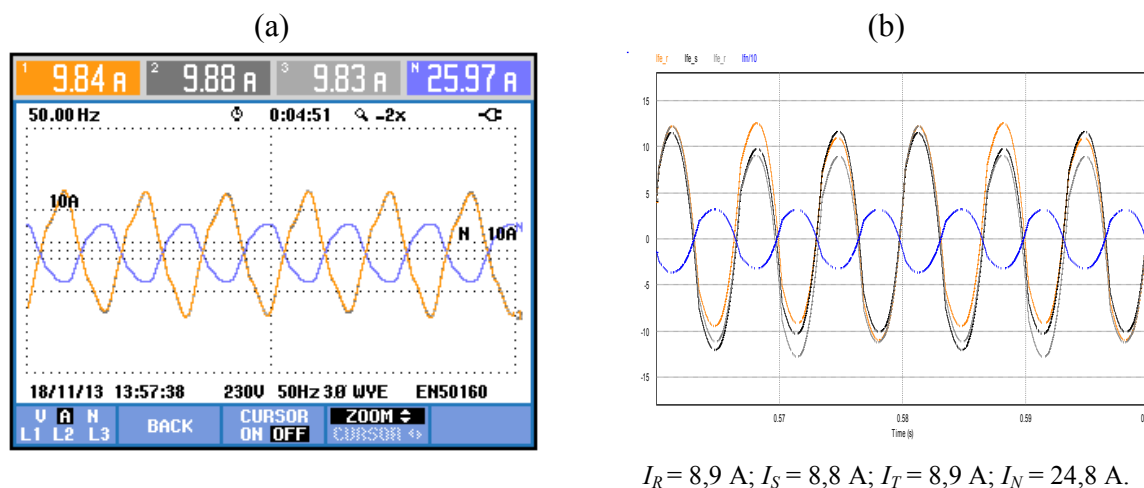
$$I_R = 12,6 \text{ A}; I_S = 12,7 \text{ A}; I_T = 12,5 \text{ A}; I_N = 0,9 \text{ A}$$

Fonte: Dados da autora.



A figura 97 ilustra as correntes drenadas pelo filtro eletromagnético. Para facilitar a comparação visual entre as figuras, a corrente no condutor neutro do resultado de simulação é dividida dez vezes, figura 97(b).

Figura 97 – Teste de aderência – Caso 2. (a) Resultados experimentais – correntes pelo filtro eletromagnético; (b) Resultados simulados – correntes pelo filtro eletromagnético.



Fonte: Dados da autora.

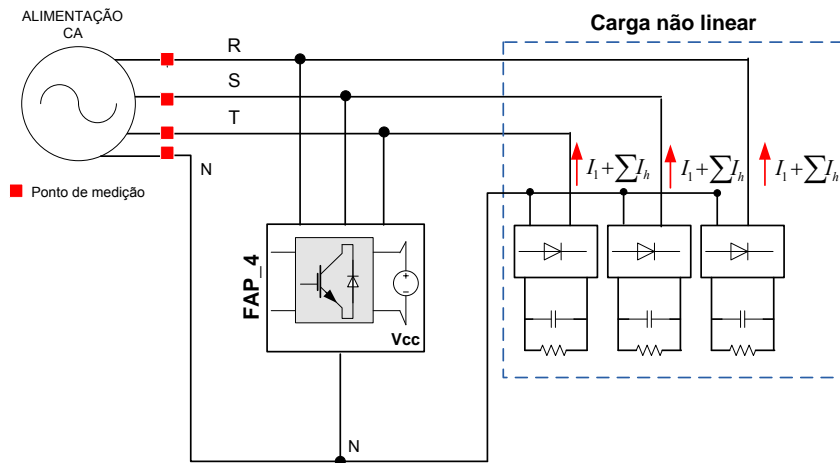
Particularmente, na ótica e objetivo deste trabalho verificou-se que, para os casos 1 e 2, houve uma aderência satisfatória entre os resultados ensaiados e simulados, confirmando-se, assim, a modelagem proposta para análise do desempenho do arranjo híbrido de filtragem contendo um filtro ativo paralelo de três braços, um bloqueador e um filtro eletromagnéticos de sequência zero.

Destaca-se que as pequenas discrepâncias vistas se devem basicamente a: erros de medição associados aos sensores de corrente, a aproximações adotadas nos modelos teóricos, e a definição dos parâmetros elétricos da rede e magnéticos dos dispositivos eletromagnéticos. É importante considerar ainda a limitação da representação real das tensões harmônicas da fonte no sistema simulado, pois nos resultados práticos o sistema de filtragem e a carga foram ligados diretamente à rede elétrica.

### III. Caso 3 – FAP de quatro braços em operação com tensões de alimentação e cargas equilibradas

Visando realizar uma análise comparativa entre os desempenhos do arranjo híbrido de filtragem e um FAP de quatro braços, foi montado o sistema da figura 98. Neste caso, a filtragem harmônica fica a cargo unicamente do filtro ativo paralelo de quatro braços.

Figura 98 – Diagrama esquemático de ensaio do caso 3, com FAP de quatro braços.

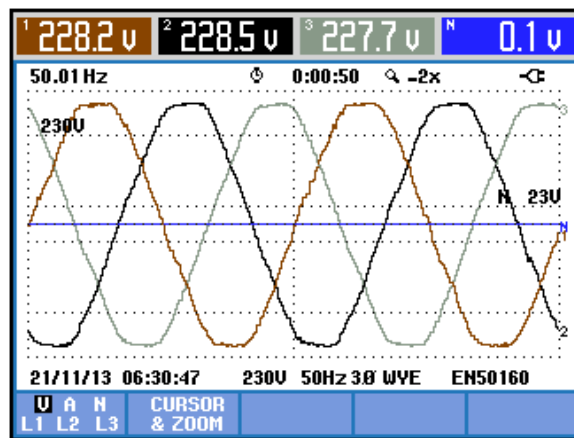


Fonte: Dados da autora.

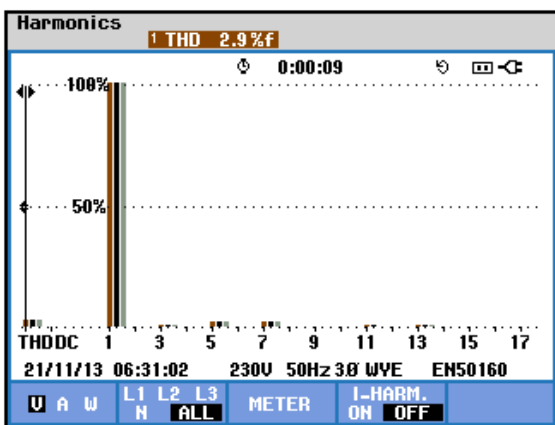
As figuras 99 e 100 ilustram os resultados de tensões e correntes trifásicas.

Figura 99 – Caso 3 – FAP de quatro braços em operação com tensões e cargas equilibradas: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).

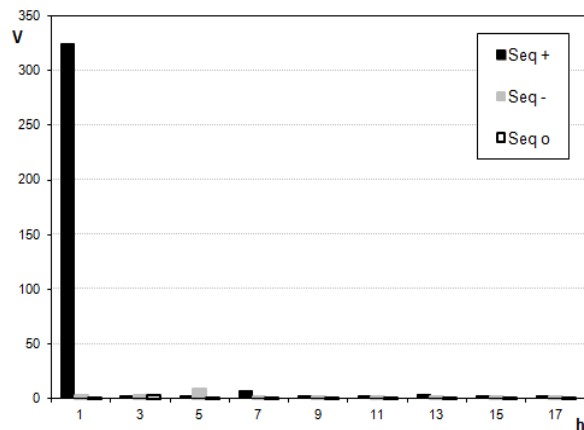
(a)



(b)

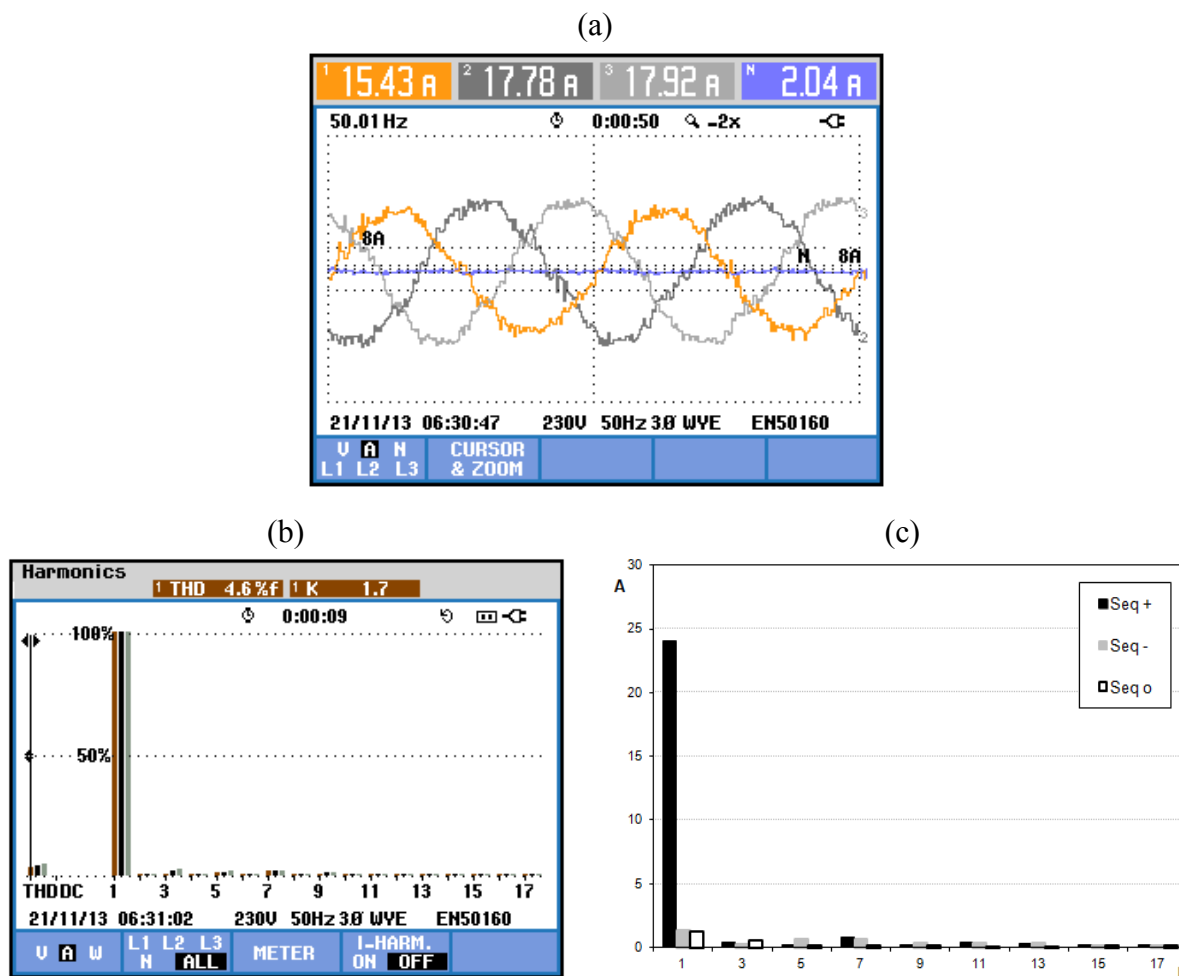


(c)



Fonte: Dados da autora.

Figura 100 – Caso 3 – FAP de quatro braços em operação com tensões e cargas equilibradas: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).



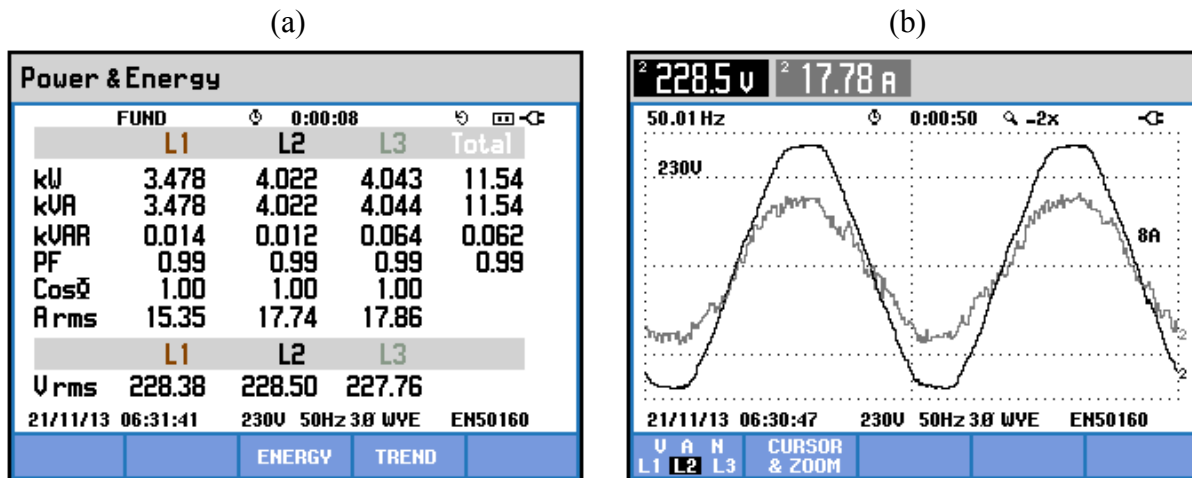
Fonte: Dados da autora.

Observando as figuras 99(b) e 99(c), nota-se uma diminuição na distorção de tensão, que era de 4,2% no caso base e, após a compensação harmônica passa a ser de 2,9%.

Como já esperado, a atuação do FAP de quatro braços mostra uma substancial redução da distorção harmônica total de corrente no sistema, atuando na compensação de todas as ordens harmônicas observadas anteriormente, no caso 1. Outro importante ponto de análise onde nota-se a eficácia do FAP de quatro braços é no valor da corrente no condutor neutro, que é minimizada de 22,93 A (caso base) para 2,04 A.

Os dados de potência na fonte do caso 3 são apresentados na figura 101.

Figura 101 – Caso 3 – FAP de quatro braços em operação, tensões e cargas equilibradas: (a) Potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase S.



Fonte: Dados da autora.

O fator de potência obtido neste caso é também de 0,99. Pode ser observado que, em situações de tensões e cargas equilibradas, há uma atuação bastante semelhante do arranjo híbrido de filtros proposto nesta tese comparado ao FAP de quatro braços. Este fato revela que, nas condições ensaiadas, o supressor eletromagnético operando em conjunto com o FAP de três braços apresenta as mesmas funcionalidades de um FAP de quatro braços.

A tabela 21 apresenta uma síntese dos resultados apresentados nos casos 1, 2 e 3.

Tabela 21 – Comparativo entre os casos 1, 2 e 3.

	Caso 1: Sem filtros	Caso 2: Com SE + FAP_3	Caso 3: Com FAP_4
DTT(%)	4,2	3,0	2,9
DTC(%)	63,1	3,6	4,2
$I_{\text{neutro}}$ (A)	22,93	1,43	2,04
FP	0,8	0,99	0,99

Fonte: Dados da autora.

#### IV. Caso 4 – Sem filtros com tensões de alimentação equilibradas e cargas desequilibradas

O objetivo deste caso é investigar o desempenho e a capacidade do sistema híbrido de compensação em uma situação de desequilíbrio de carga. O diagrama esquemático deste caso é similar ao ilustrado na figura 84. Para este caso, a configuração da carga não linear desequilibrada é definida a partir da alteração nos parâmetros de umas das unidades monofásicas, ou seja, um dos retificadores monofásicos. A nova configuração da carga é apresentada na tabela 22.

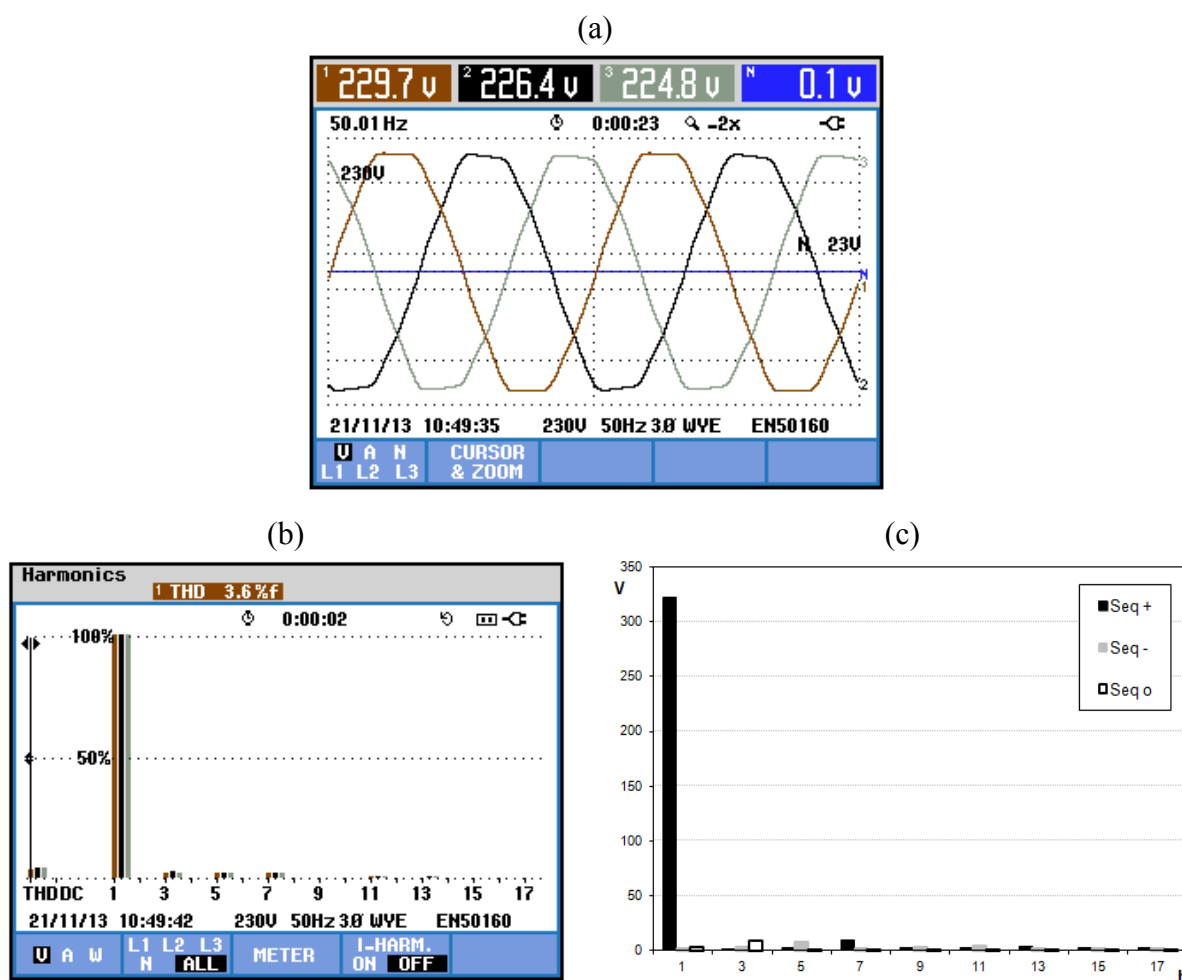
Tabela 22 – Dados da carga não linear.

Retificador – Fase $R$	$R_R = 52 \Omega$ ; $C_R = 2820 \mu\text{F}$
Retificador – Fase $S$	$R_S = 26 \Omega$ ; $C_S = 2820 \mu\text{F}$
Retificador – Fase $T$	$R_T = 26 \Omega$ ; $C_T = 2820 \mu\text{F}$

Fonte: Dados da autora.

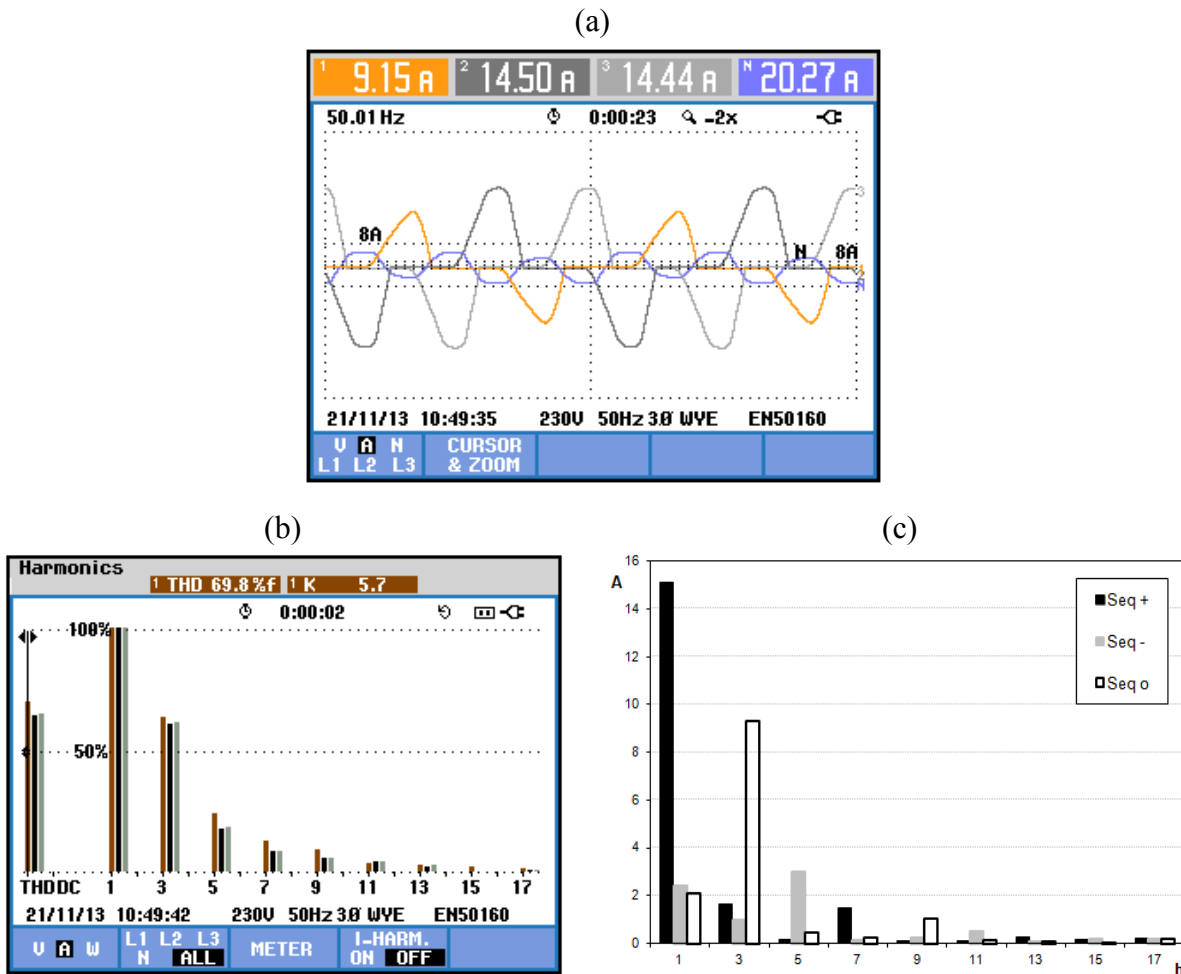
As figuras 102 e 103 ilustram as formas de onda das tensões e correntes trifásicas de alimentação sem a ação dos filtros. Este caso é tomado como referência para as análises dos casos 5 e 6.

Figura 102 – Caso 4 – Sem filtros com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).



Fonte: Dados da autora.

Figura 103 – Caso 4 – Sem filtros com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).



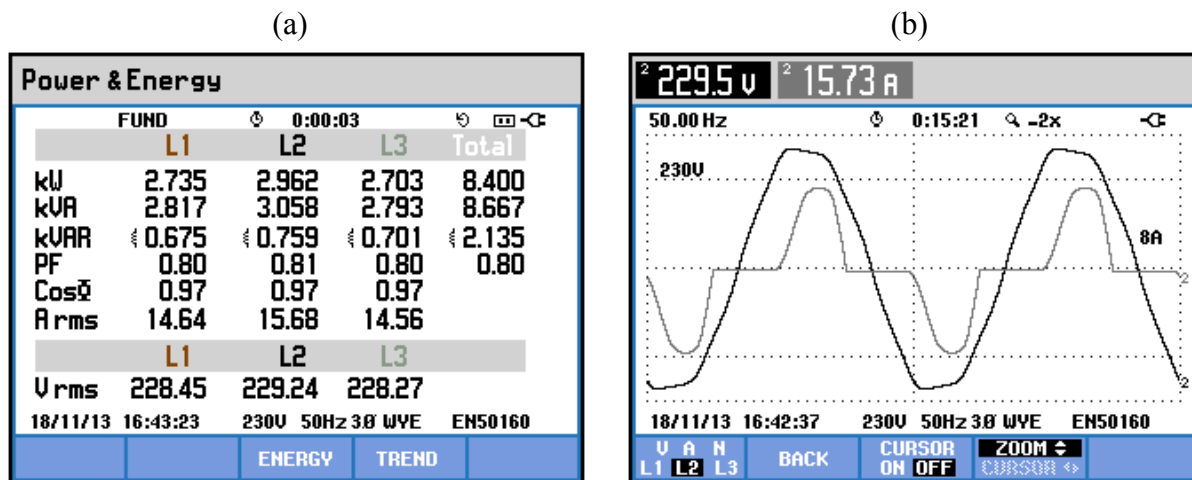
Fonte: Dados da autora.

Analisando as tensões no sistema de alimentação, figura 102, sem a atuação dos filtros, percebe-se um desequilíbrio nas tensões, ocasionado pelo desequilíbrio imposto na carga. A média da distorção total de tensão é de 4,1%.

Pela análise das corrente trifásicas, ilustradas na figura 103(a), é possível constatar a característica desequilibrada da carga. O mesmo pode ser observado nos espectros de fase e sequenciais das correntes harmônicas, que também não se distribuem de forma ideal, figuras 103(b) e 103(c).

Os valores do fator de potência e das potências ativa, reativa e capacitiva na carga são apresentados na figura 104. Neste caso, o fator de potência é de 0,80 e deve-se principalmente à distorção harmônica provocada pela carga. A figura 104(b) ilustra a tensão e a corrente na fase *S*.

Figura 104 – Caso 4 – Sem filtros com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase S.

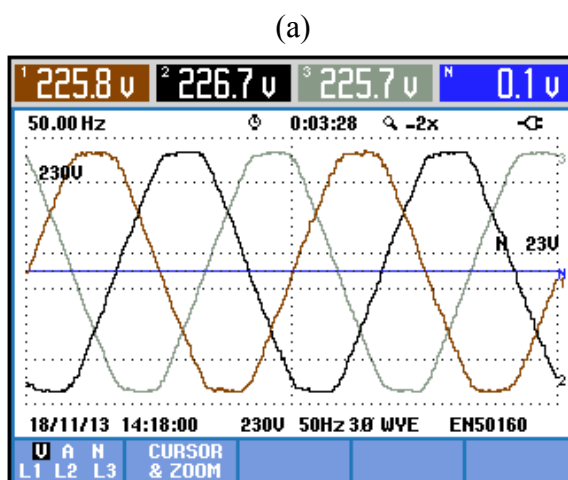


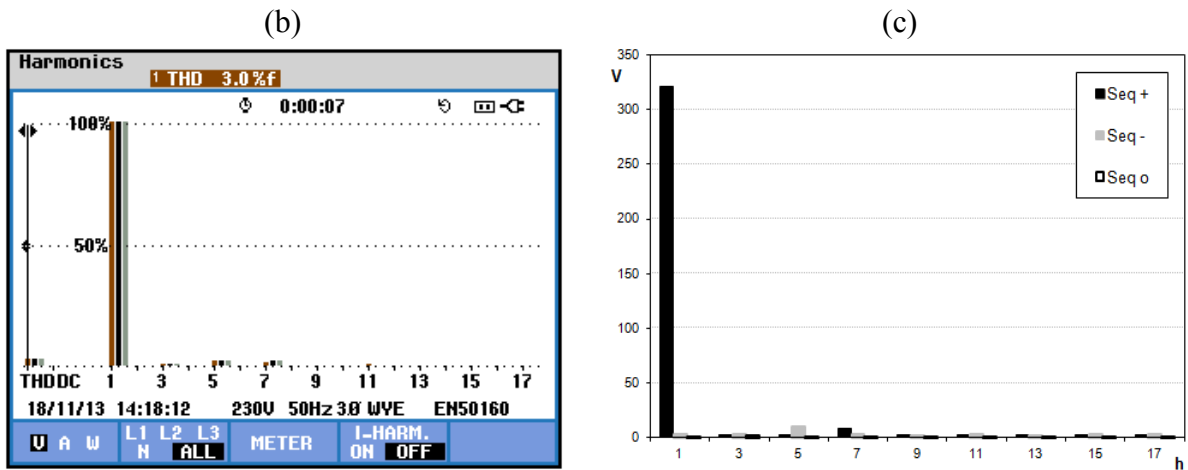
Fonte: Dados da autora.

#### V. Caso 5 – SE e FAP de três braços em operação com tensões de alimentação equilibradas e cargas desequilibradas

Este caso propõe a análise do sistema com cargas não lineares desequilibradas sob a ação do supressor eletromagnético operando em conjunto com o FAP de três braços. O diagrama experimental é semelhante ao ilustrado na figura 90, no qual todos os componentes do sistema foram ligados diretamente à rede elétrica. Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 105 e 106.

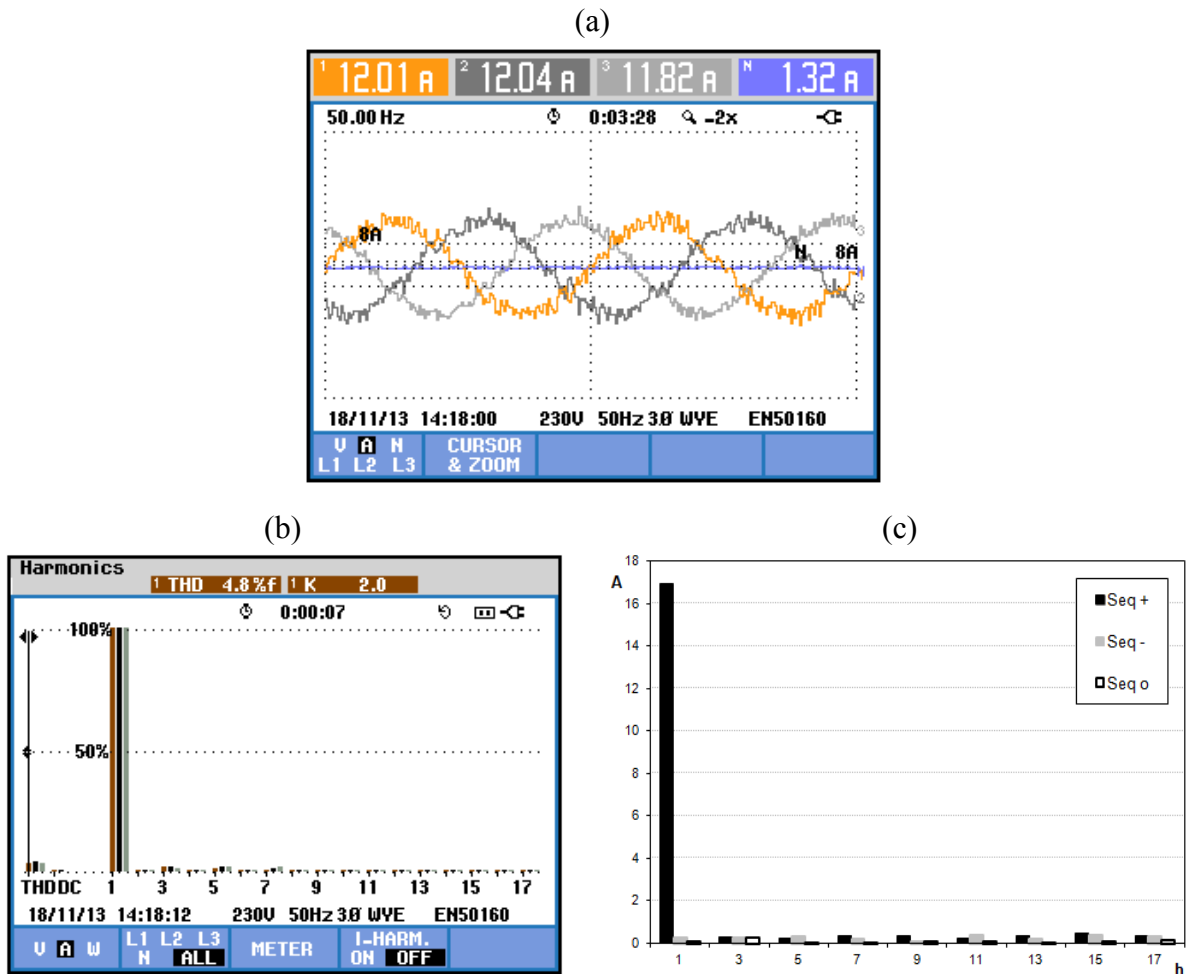
Figura 105 – Caso 5 – SE e FAP de três braços em operação com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).





Fonte: Dados da autora.

Figura 106 – Caso 5 – SE e FAP de três braços em operação com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).



Fonte: Dados da autora.



O sistema híbrido de filtros apresentou novamente um desempenho considerado satisfatório. Observando a figura 105(a) vê-se que os desequilíbrios anteriormente notados nas tensões do sistema foram reduzidos. As figuras 105(b) e (c) mostram uma minimização da distorção total na tensão.

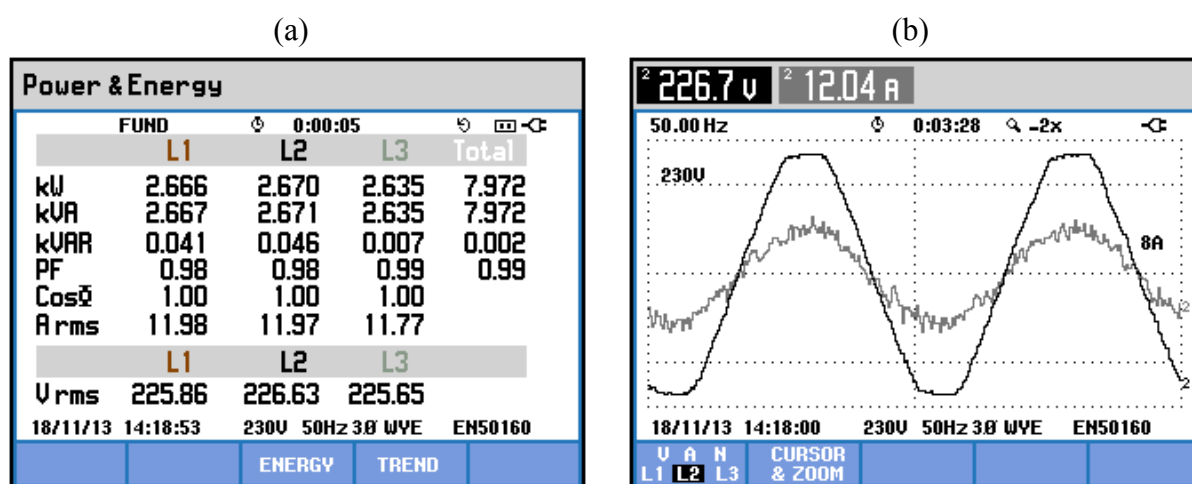
O FAP de três braços agiu diretamente sobre a compensação das correntes harmônicas de sequências positiva e negativa e os dispositivos eletromagnéticos combinados que compõem o supressor eletromagnético promoveram o confinamento considerável das harmônicas de sequência zero entre o ponto de instalação dos mesmos e a carga não linear. Ocorreu, portanto, uma redução relevante da 3ª e 9ª harmônicas, figura 106, com benefício direto sobre os níveis residuais de desequilíbrios e distorções harmônicas totais.

Outro importante fator a se observar é que sob a ação dos dispositivos de filtragem, os desequilíbrios de corrente vistos na carga foram praticamente eliminados nas medições efetuadas na fonte.

Os valores das potências ativa, reativa e capacitiva na carga, bem como o fator de potência na fonte são mostrados na figura 107(a).

A tensão e corrente na fase *S* são apresentadas na figura 107(b). Nesta situação, o fator de potência obtido é de 0,98. A melhoria apresentada no fator de potência é devido à atuação do arranjo de filtragem harmônica. Assim como observado no caso 2, a tensão e a corrente estão praticamente em fase.

Figura 107 – Caso 5 – SE e FAP de três braços em operação com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase *S*.



Fonte: Dados da autora.

A tabela 23 apresenta uma síntese dos resultados para os casos 4 e 5.

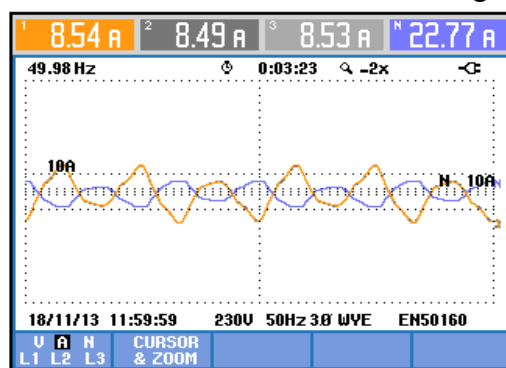
Tabela 23 – Comparativo entre os casos 4 e 5.

	<b>Caso 4: Sem filtros</b>	<b>Caso 5: Com SE + FAP_3</b>
<b>DTT(%)</b>	4,1	2,9
<b>DTC(%)</b>	66,3	3,7
<b>I<sub>neutro</sub> (A)</b>	20,27	1,32
<b>FP</b>	0,8	0,98

Fonte: Dados da autora.

As formas de onda das correntes pelo filtro eletromagnético são apresentadas na figura 108, onde se constata mais uma vez sua característica típica e homopolar.

Figura 108 – Correntes no filtro eletromagnético.



Fonte: Dados da autora.

Neste caso, verifica-se que os valores eficazes são sensivelmente menores que aqueles obtidos anteriormente (caso 2 – 9,8A). As tabelas 24, 25 e a figura 109 ilustram os resultados obtidos neste caso.

Tabela 24 – Distribuição sequencial das harmônicas pelo filtro eletromagnético (valores de pico).

<b>h</b>	<b>F+</b>	<b>Φ°+</b>	<b>F-</b>	<b>Φ°-</b>	<b>F<sub>0</sub></b>	<b>Φ°<sub>0</sub></b>
1	0.13	-47.2	0.01	168.7	3.16	-21.0
2	0.03	-47.5	0.00	-167.4	0.18	-124.5
3	0.01	-44.3	0.02	50.1	11.57	-63.9
4	0.00	-172.8	0.01	56.9	0.14	-117.2
5	0.00	-142.9	0.01	63.8	1.73	-120.2
6	0.00	33.4	0.00	-151.3	0.16	-108.3
7	0.00	29.4	0.00	169.3	0.70	-15.2
8	0.00	-79.9	0.00	-135.6	0.17	-100.0
9	0.00	-122.1	0.00	32.9	1.67	-89.2
10	0.00	-43.3	0.00	-143.5	0.18	-95.3
11	0.00	-61.7	0.00	169.8	0.57	-88.9
12	0.00	-22.5	0.00	-151.5	0.19	-93.2
13	0.00	-44.4	0.00	86.1	0.19	-27.3
14	0.00	-32.7	0.00	-121.8	0.19	-90.5
15	0.00	-39.1	0.00	-175.3	0.29	-45.6

Fonte: Dados da autora.

Tabela 25 – Valores RMS por fase das correntes no filtro eletromagnético.

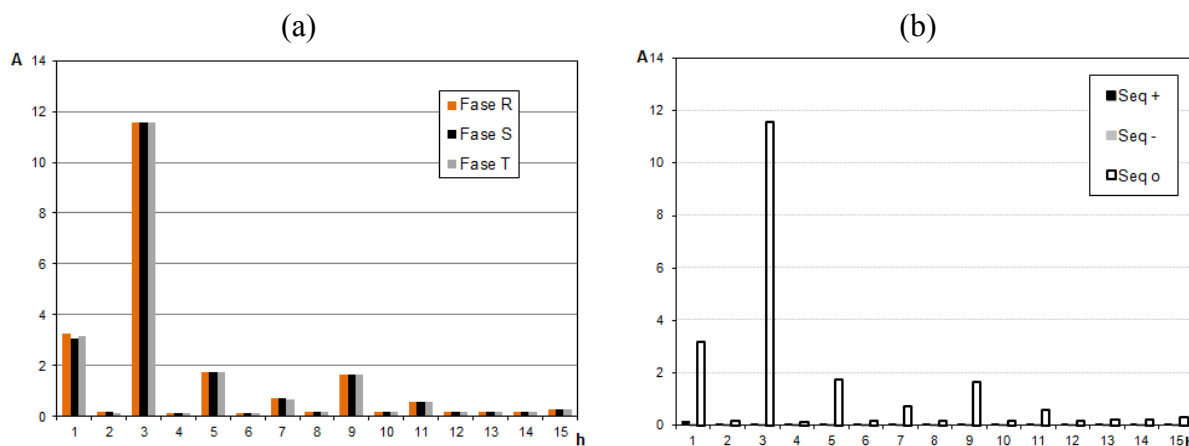
Fases			Sequenciais		
<i>R</i>	<i>S</i>	<i>T</i>	(+)	(-)	(0)
8,5 A	8,5 A	8,5 A	0,1 A	0,0 A	8,5 A

Fonte: Dados da autora.

Os espectros da figura 109 reafirmam os desequilíbrios de correntes impostos neste caso, onde se vê que há componentes de sequência zero não apenas em harmônicas múltiplas de três, mas também na fundamental, 5ª e 7ª ordens. Este fato relembra que no processo de dimensionamento dos dispositivos eletromagnéticos deve ser considerada uma possível sobrecarga sobre os mesmos devido à componente fundamental e às demais harmônicas com componentes homopolares.

Vale ressaltar, portanto, que o supressor eletromagnético funciona como filtro e bloqueador de sequência zero e, portanto, independentemente da ordem harmônica considerada, a maior parte do fluxo de sequência zero será conduzida pelo filtro.

Figura 109 – Espectros harmônicos das correntes no filtro eletromagnético: (a) Espectro de fase; (b) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).



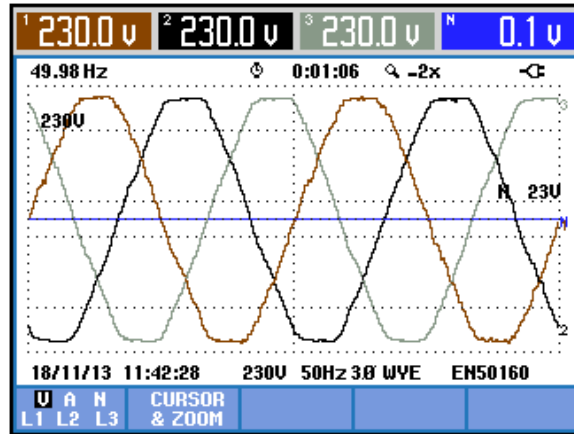
Fonte: Dados da autora.

#### VI. Caso 6 – FAP de quatro braços em operação com tensões de alimentação equilibradas e cargas desequilibradas

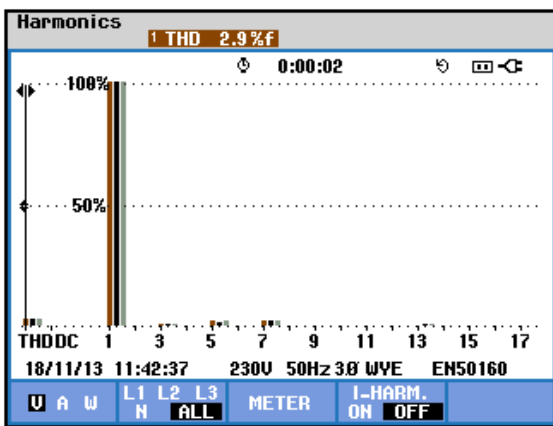
Com o objetivo de realizar uma análise comparativa entre os desempenhos do arranjo de filtragem composto pelo supressor e o FAP de três braços *versus* o FAP de quatro braços, foi montado um sistema semelhante ao da figura 97. No entanto, agora numa situação de desequilíbrio de carga, já detalhado na tabela 22. As figuras 110 e 111 mostram os resultados para as tensões e correntes trifásicas medidas na fonte.

Figura 110 – Caso 6 – FAP de quatro braços em operação com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).

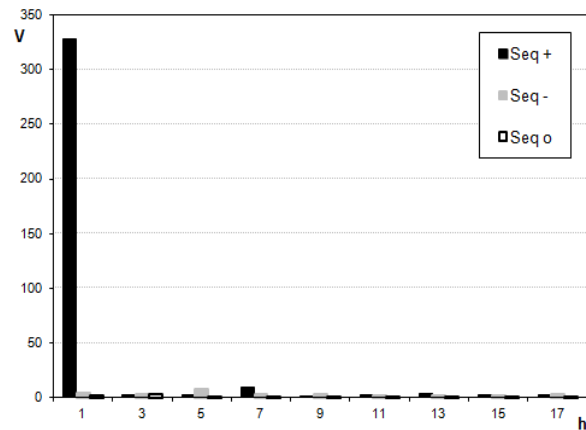
(a)



(b)



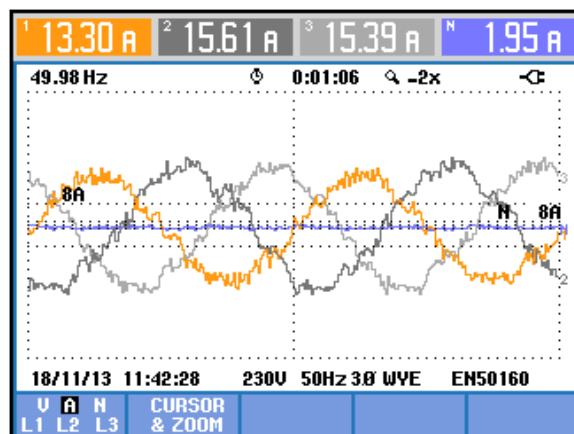
(c)

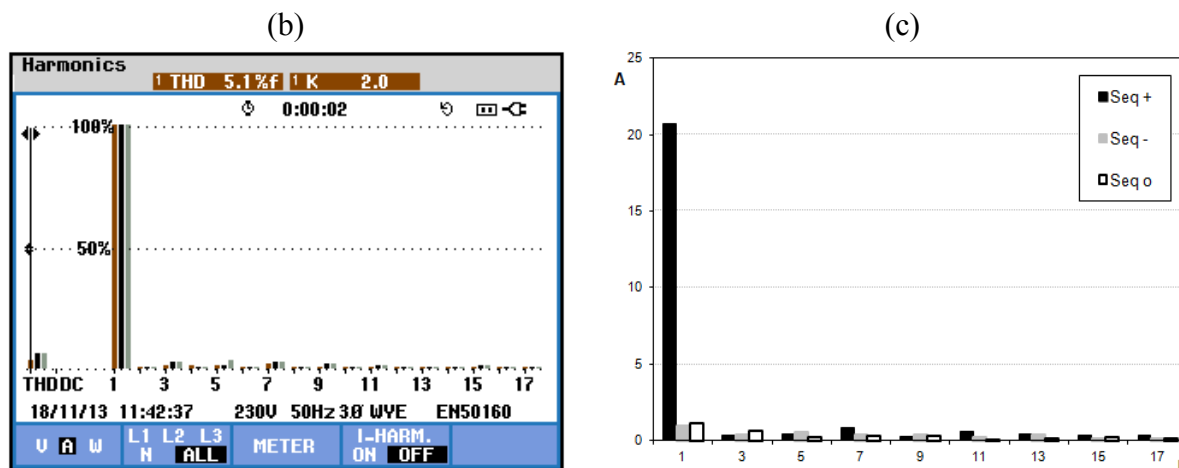


Fonte: Dados da autora.

Figura 111 – Caso 6 – FAP de quatro braços em operação com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).

(a)

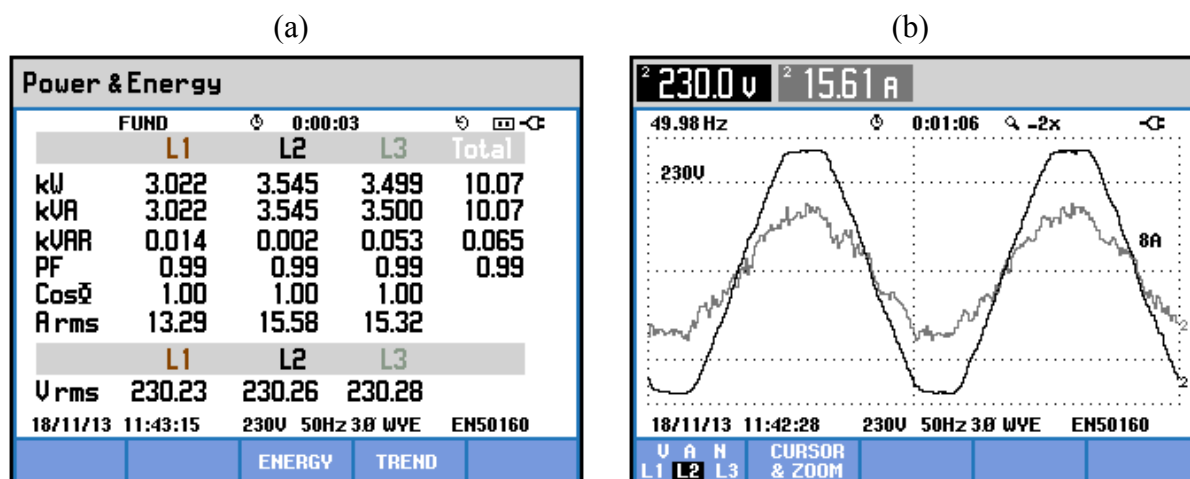




Fonte: Dados da autora.

Com a atuação do FAP de quatro braços as tensões trifásicas na fonte ficam totalmente equilibradas, figura 110 (a). Há também uma redução nos níveis das harmônicas de tensão, sendo que a distorção total média agora é de 2,9%. A figura 111 mostra que após a atuação do FAP de quatro braços a distorção harmônica total de corrente no sistema é expressivamente reduzida, passando de 66,3% (caso base) para 5,4%. Outro ponto favorável na atuação deste dispositivo está na redução da corrente que circula pelo neutro, que é minimizada de 20,93 A (caso base) para 1,95 A. Os dados de potência na fonte, bem como a tensão e a corrente na fase *S* são apresentados na figura 112.

Figura 112 – Caso 6 – FAP de quatro braços em operação com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase *S*.



Fonte: Dados da autora.

O fator de potência medido nesse caso é unitário. Nessa situação, de tensões equilibradas e cargas desequilibradas, há uma atuação muito similar no que diz respeito ao arranjo híbrido de filtros proposto nesta tese comparado ao FAP de quatro braços. Esse fato

revela que na situação de desequilíbrio de carga, o supressor eletromagnético, operando em conjunto com o FAP de três braços, apresenta praticamente as mesmas funcionalidades de um FAP de quatro braços. A tabela 26 apresenta uma síntese dos resultados apresentados casos 4, 5 e 6.

Tabela 26 – Comparativo entre os casos 4, 5 e 6.

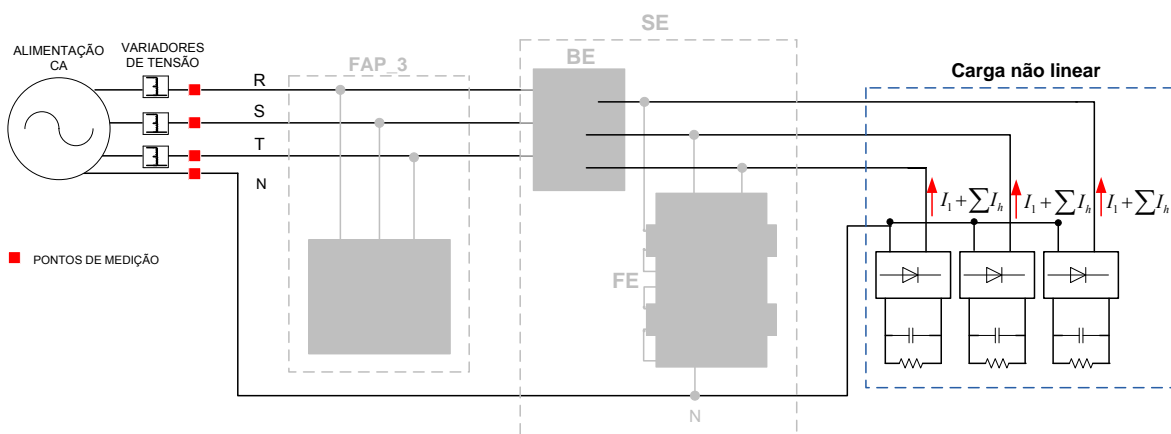
	Caso 4: Sem filtros	Caso 5: Com SE + FAP_3	Caso 6: Com FAP_4
<b>DTT(%)</b>	4,1	2,9	3,0
<b>DTC(%)</b>	66,3	3,7	5,4
<b>I<sub>neutro</sub> (A)</b>	20,27	1,32	1,95
<b>FP</b>	0,8	0,98	1

Fonte: Dados da autora.

#### VII. Caso 7 – Sem filtros com tensões de alimentação desequilibradas e cargas equilibradas

O objetivo deste caso é investigar o desempenho e a capacidade do arranjo híbrido de filtragem em uma situação de desequilíbrio nas tensões de alimentação, da ordem de 5%. Para estabelecer os desequilíbrios nas tensões, foram utilizados três variadores de tensão monofásicos. Nesse caso, a configuração da carga não linear volta a ser equilibrada, com parâmetros idênticos aos definidos na tabela 14. O diagrama esquemático montado nos ensaios desta situação é ilustrado na figura 113.

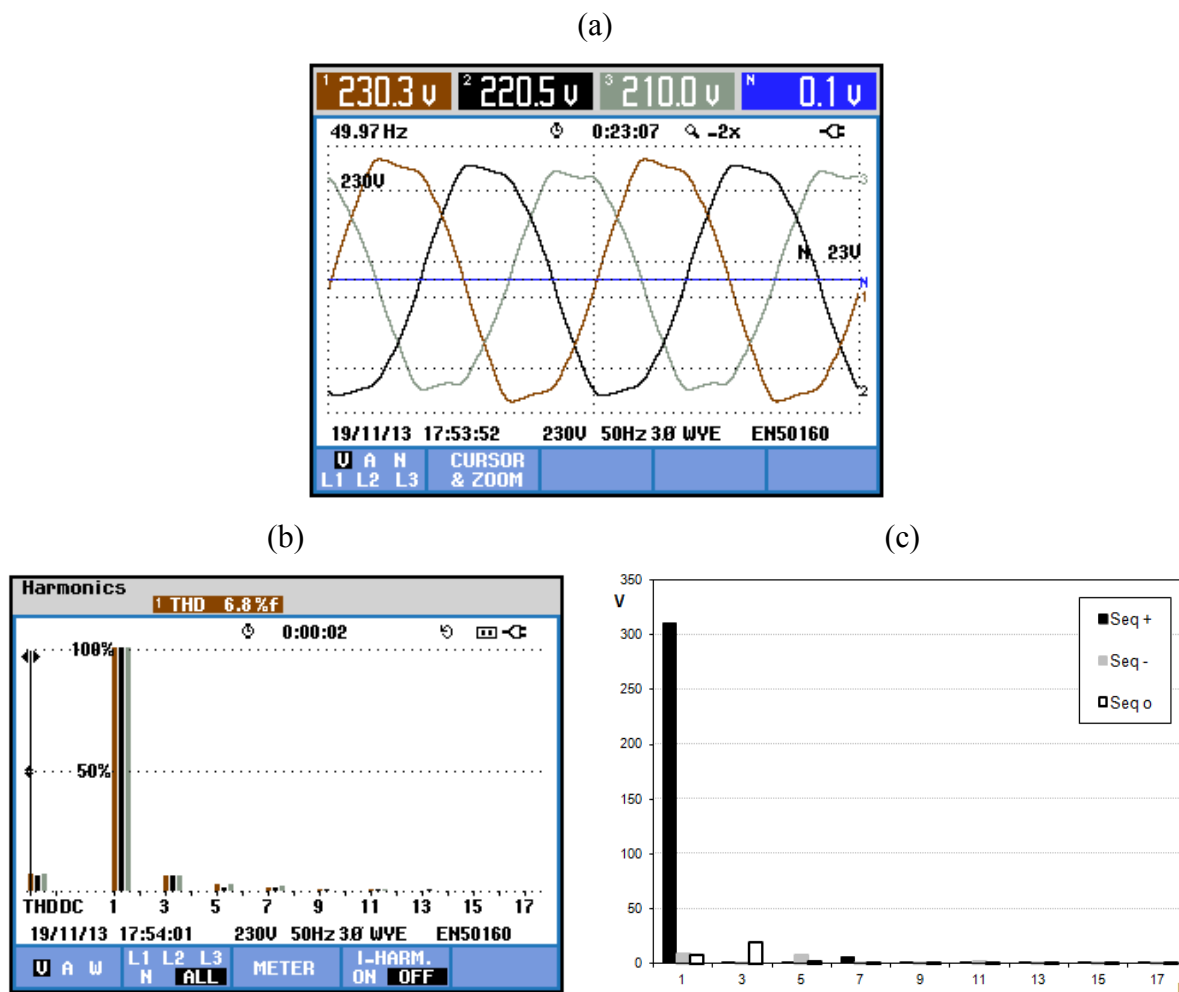
Figura 113 – Diagrama esquemático de ensaio do caso 7, sem filtros.



Fonte: Dados da autora.

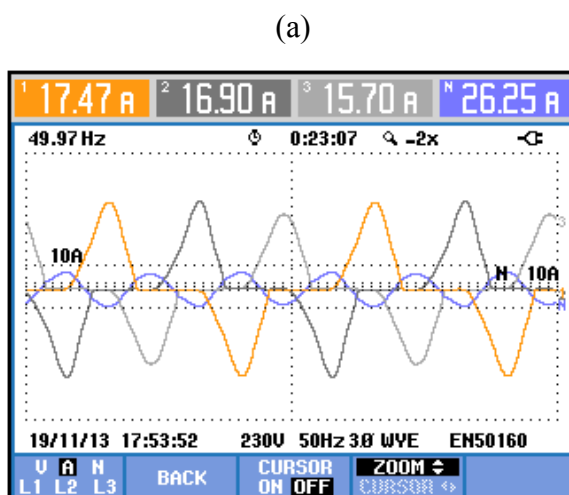
As figuras 114 e 115 ilustram as formas de onda das tensões e correntes trifásicas de alimentação sem a ação dos filtros. Esse caso é tomado como base para as análises seguintes.

Figura 114 – Caso 7 – Sem filtros com tensões desequilibradas e cargas equilibradas: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).

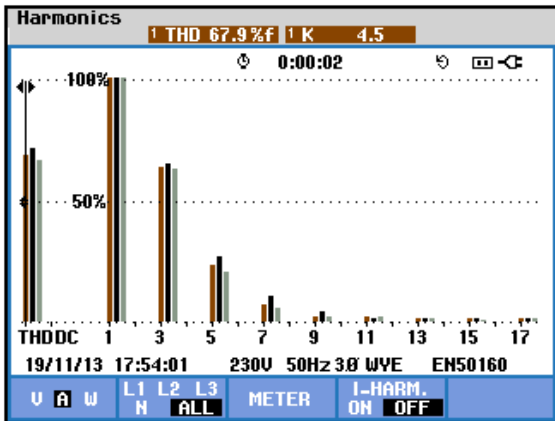


Fonte: Dados da autora.

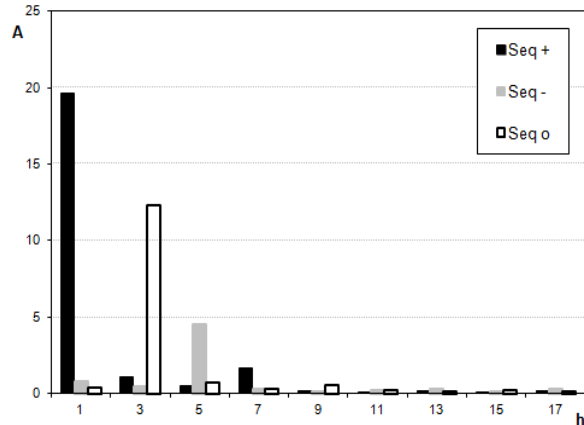
Figura 115 – Caso 7 – Sem filtros com tensões desequilibradas e cargas equilibradas: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).



(b)



(c)



Fonte: Dados da autora.

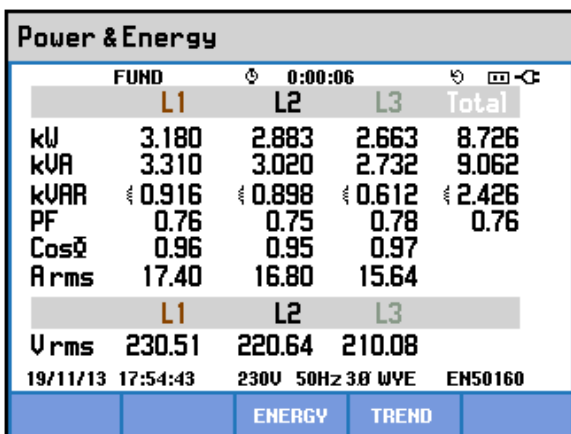
O caso 7 considera a mesma topologia do sistema descrito no caso 1. Porém, retrata uma condição de operação onde há desequilíbrios acentuados na tensão de alimentação. O propósito dessa condição operacional é realizar, nos casos seguintes, uma avaliação dos impactos de uma tensão de alimentação desequilibrada sobre o desempenho do arranjo híbrido de filtros.

Pela análise das tensões e correntes trifásicas, ilustradas nas figuras 114 e 115, é possível constatar a característica desequilibrada das tensões de alimentação e o modo como esse desequilíbrio se reflete sobre as correntes de carga. O mesmo pode ser observado nos espectros das tensões e correntes de fases e sequenciais, que também não se distribuem de forma ideal.

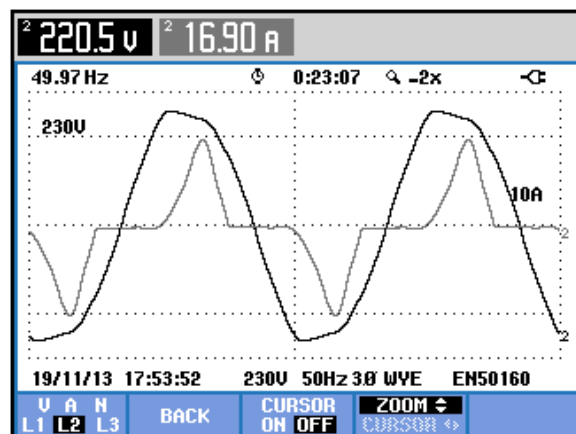
A figura 116 ilustra os dados de potência na fonte e as formas de onda da tensão e corrente na fase *S*. Nessa situação, o fator de potência medido é de 0,76.

Figura 116 – Caso 7 – Sem filtros com tensões desequilibradas e cargas equilibradas: (a) Potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase *S*.

(a)



(b)



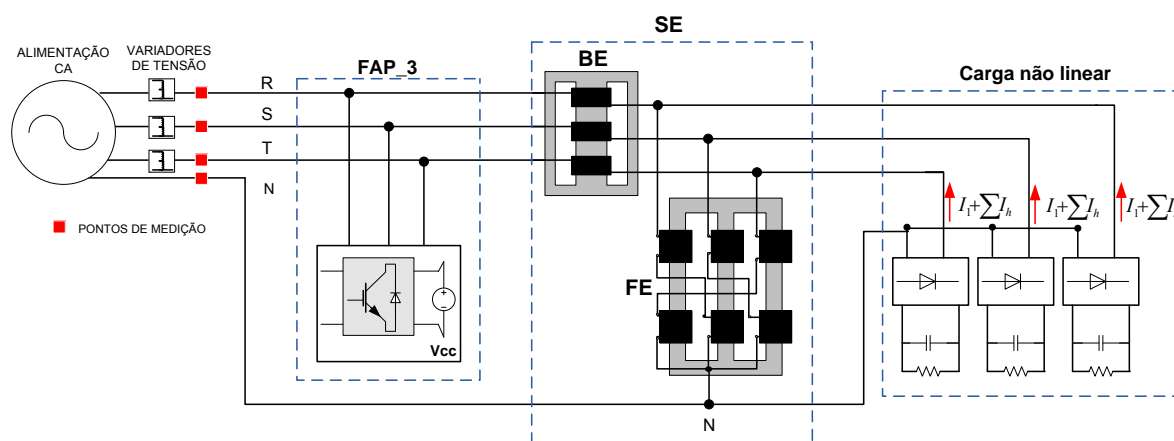
Fonte: Dados da autora.



VIII. Caso 8 – SE e FAP de três braços em operação com tensões de alimentação desequilibradas e cargas equilibradas

O objetivo central deste caso é analisar o desempenho do sistema de filtragem, composto pelo supressor eletromagnético sequência zero e pelo FAP de três braços, em um sistema elétrico com desequilíbrios na tensão de alimentação na ordem de 5%. A figura 117 ilustra o diagrama do sistema montado na plataforma experimental.

Figura 117 – Diagrama esquemático de ensaio do caso 8, com arranjo híbrido de filtros.

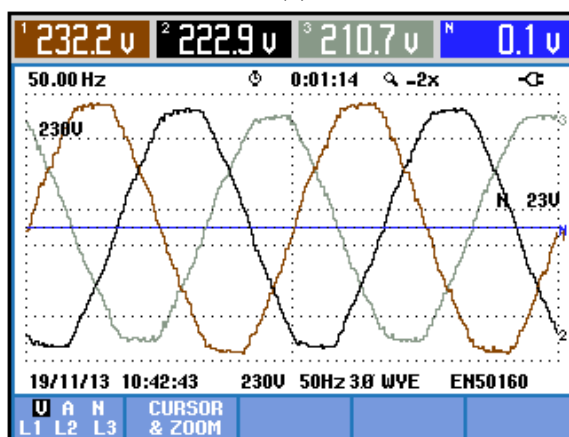


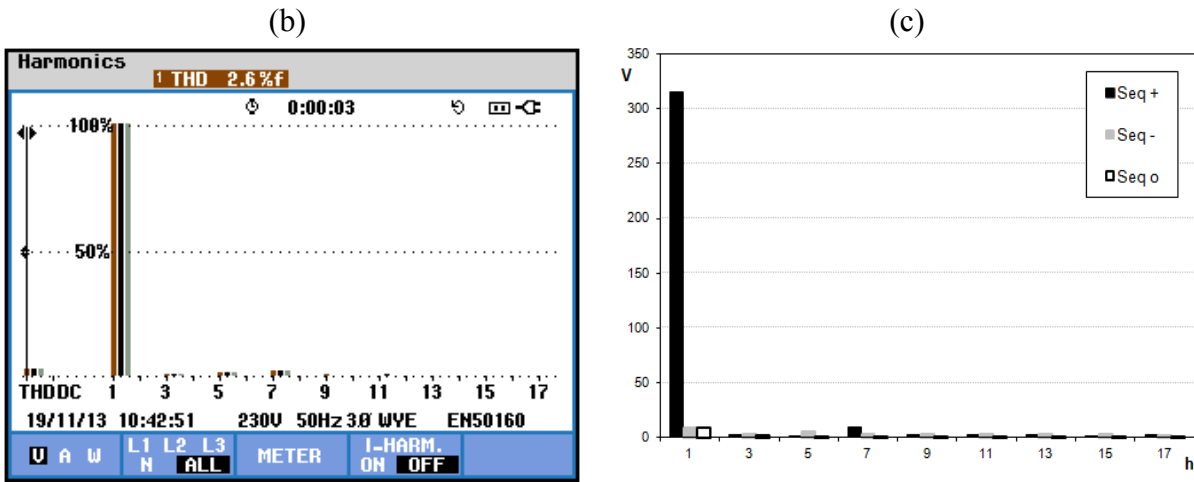
Fonte: Dados da autora.

As figuras 118 e 119 ilustram as formas de onda das tensões e correntes trifásicas, respectivamente.

Figura 118 – Caso 8 – SE e FAP de três braços em operação com tensões desequilibradas e cargas equilibradas: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).

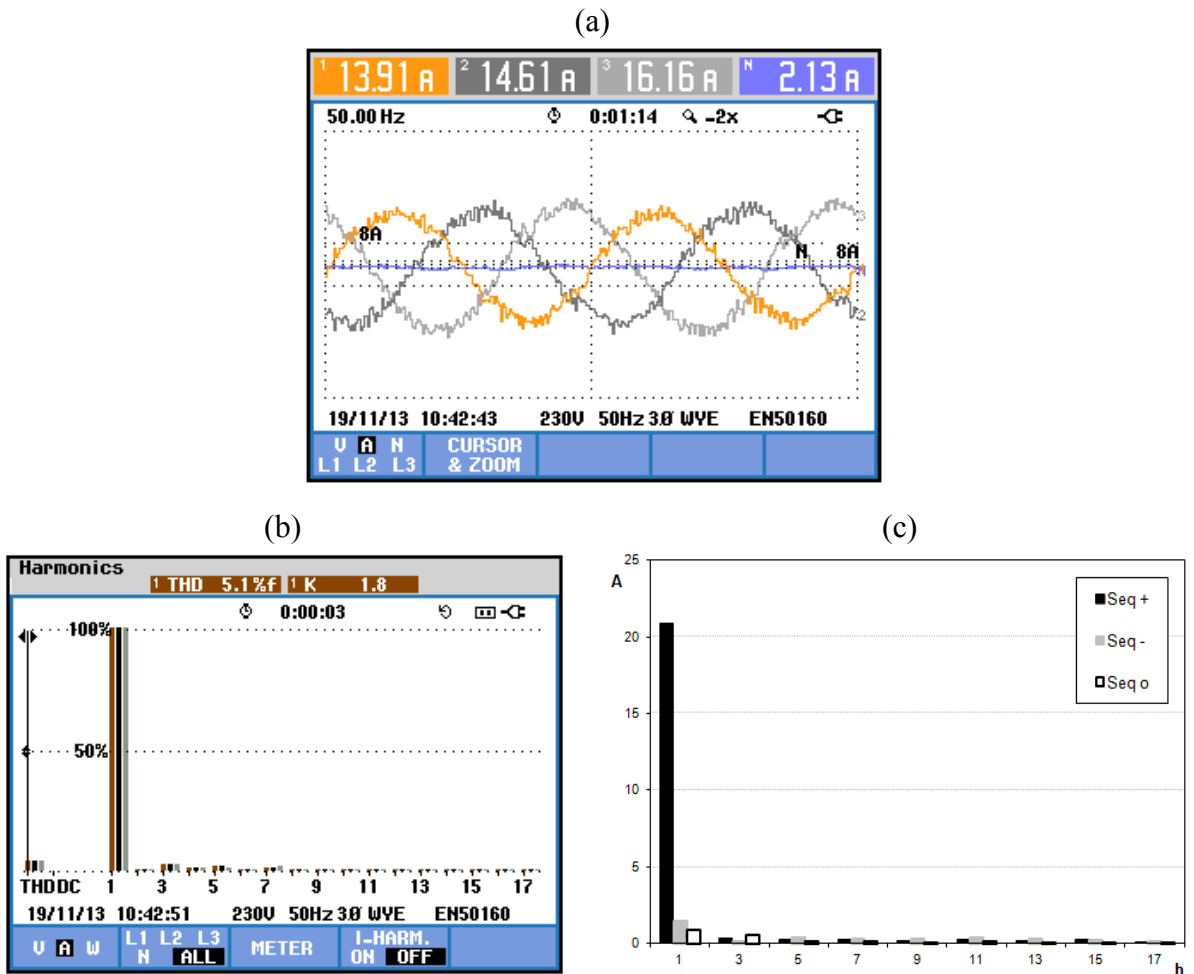
(a)





Fonte: Dados da autora.

Figura 119 – Caso 8 – SE e FAP de três braços em operação com tensões desequilibradas e cargas equilibradas: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).



Fonte: Dados da autora.

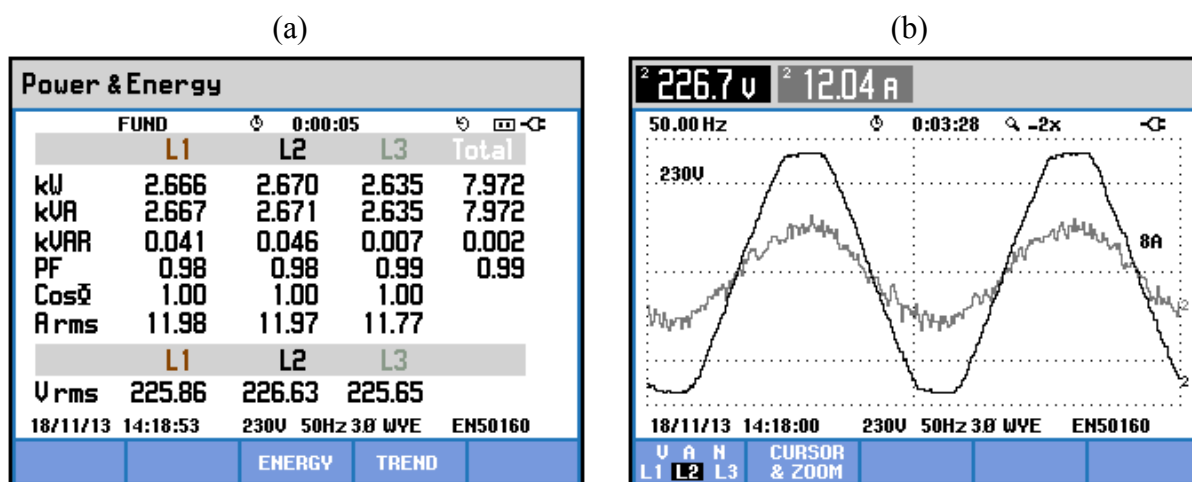
Embora tenham sido impostos desequilíbrios na tensão de alimentação, este efeito foi substancialmente reduzido pela operação combinada dos filtros ativo e passivos.

O FAP de três braços, responsável pela compensação das harmônicas de sequências negativa e positiva, atuou como almejado. O supressor eletromagnético, composto pelo filtro e bloqueador de sequência zero, produziu um confinamento considerável das harmônicas múltiplas de três entre o ponto de instalação dos mesmos e a carga não linear.

Analisando-se os espectros harmônicos de corrente, figuras 119(b) e (c), constata-se uma redução relevante das distorções harmônicas individuais, com benefício direto sobre os níveis residuais de desequilíbrios e distorções harmônicas totais. Na operação conjunta dos dispositivos eletromagnéticos, destaca-se ainda a redução expressiva da corrente do condutor neutro, passando de 26,25 A (caso 7) para 2,13 A.

Os valores das potências ativa, reativa e capacitiva na carga e o fator de potência na fonte são apresentados na figura 120(a). A tensão e corrente na fase *S* são ilustradas na figura 120(b). O fator de potência medido nessa situação é de 0,98. Nesse contexto, constata-se que mesmo sob uma ação de desequilíbrios na tensão de alimentação do sistema, há ainda uma notável melhoria no fator de potência, acarretada pela filtragem harmônica proporcionada pelo arranjo híbrido de filtros. E assim, como nos casos 2 e 5, a tensão e a corrente estão praticamente em fase, figura 120(b).

Figura 120 – Caso 8 – SE e FAP de três braços em operação com tensões equilibradas e cargas desequilibradas: (a) Potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase *S*.



A tabela 27 apresenta um resumo dos resultados para os casos 7 e 8.

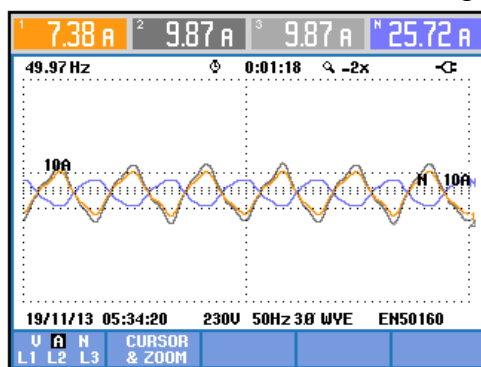
Tabela 27 – Comparativo entre os casos 7 e 8.

	<b>Caso 7: Sem filtros</b>	<b>Caso 8: Com SE + FAP_3</b>
<b>DTT(%)</b>	6,7	2,6
<b>DTC(%)</b>	68,4	4,2
<b>I<sub>neutro</sub> (A)</b>	26,25	2,13
<b>FP</b>	0,76	0.98

Fonte: Dados da autora.

Para o caso específico de desequilíbrios nas tensões de alimentação, apresenta-se na figura 121 as correntes que fluem pelo filtro eletromagnético, onde se observa novamente sua característica homopolar.

Figura 121 – Correntes no filtro eletromagnético.



Fonte: Dados da autora.

Nessa situação, as correntes que fluem pelo filtro eletromagnético se apresentam naturalmente desequilibradas devido aos desequilíbrios impostos na tensão de alimentação.

As tabelas 28, 29 e a figura 122 ilustram os resultados obtidos nesse caso.

Tabela 28 – Distribuição sequencial das harmônicas pelo filtro eletromagnético (valores de pico).

h	F+	Φ°+	F-	Φ°-	F <sub>0</sub>	Φ° <sub>0</sub>
1	0.08	-25.8	0.05	97.3	0.57	-95.4
2	0.02	-1.0	0.02	76.4	0.21	-113.7
3	1.15	112.7	1.20	112.8	12.77	-66.8
4	0.01	71.9	0.01	53.4	0.09	-125.0
5	0.05	-55.4	0.05	-50.9	0.59	126.2
6	0.02	104.1	0.02	111.8	0.24	-72.1
7	0.03	126.2	0.03	132.1	0.31	-50.9
8	0.02	78.1	0.02	75.5	0.22	-101.0
9	0.18	96.8	0.19	96.7	2.00	-83.4
10	0.01	79.4	0.01	97.0	0.13	-96.8
11	0.02	17.5	0.02	12.7	0.23	-163.4
12	0.01	97.0	0.02	103.1	0.18	-78.8
13	0.02	134.3	0.02	136.4	0.19	-45.5
14	0.02	90.3	0.02	93.1	0.18	-88.8
15	0.04	123.6	0.05	126.9	0.48	-55.0

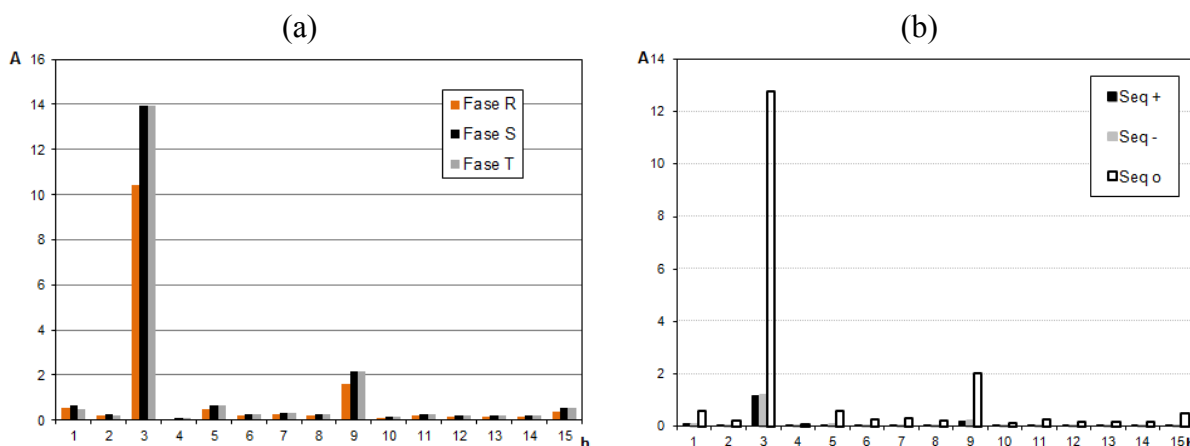
Fonte: Dados da autora.

Tabela 29 – Valores RMS por fase das correntes no filtro eletromagnético.

Fases			Sequenciais		
<i>R</i>	<i>S</i>	<i>T</i>	(+)	(-)	(0)
7,4 A	9,9 A	9,9 A	0,8 A	0,9 A	9,2 A

Fonte: Dados da autora.

Figura 122 – Espectros harmônicos das correntes no filtro eletromagnético: (a) Espectro de fase; (b) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).



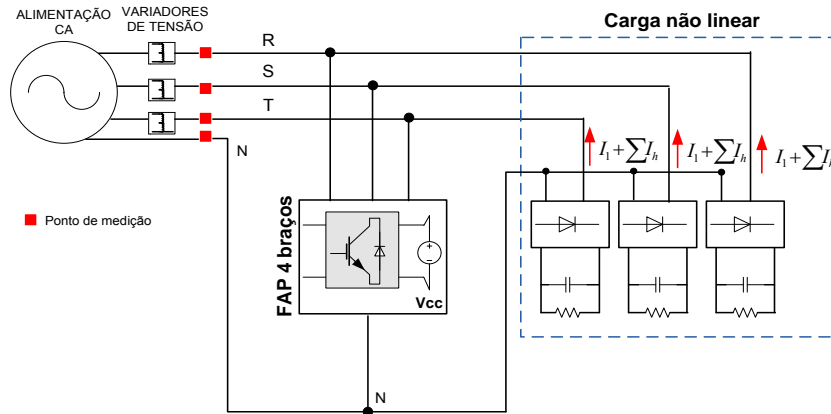
Fonte: Dados da autora.

Neste caso, de uma alimentação com tensões desequilibradas, a componente fundamental, bem como as demais ordens harmônicas não múltiplas de 3, apresentam pequenas parcelas de componentes de sequência zero que, naturalmente, como visto na figura 121, são absorvidas pelo filtro eletromagnético.

#### IX. Caso 9 – FAP de quatro braços em operação com tensões de alimentação desequilibradas e cargas equilibradas

Este caso tem por finalidade mostrar o desempenho do FAP de quatro braços em uma situação de desequilíbrio de tensão (5%), para possibilitar a comparação entre o desempenho deste dispositivo e o arranjo híbrido de filtragem harmônica proposto. O diagrama esquemático deste caso é ilustrado na figura 123.

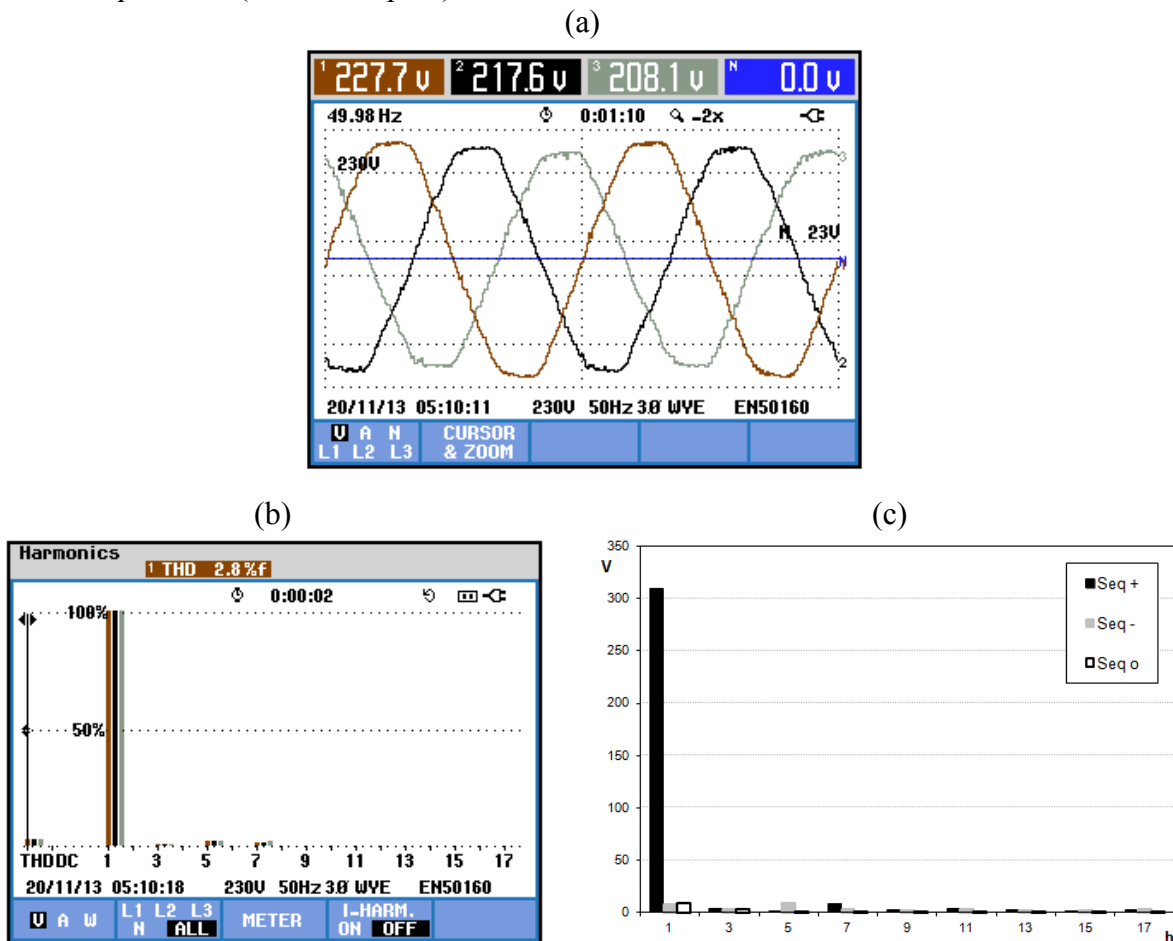
Figura 123 – Diagrama esquemático de ensaio do caso 9, com FAP de quatro braços.



Fonte: Dados da autora.

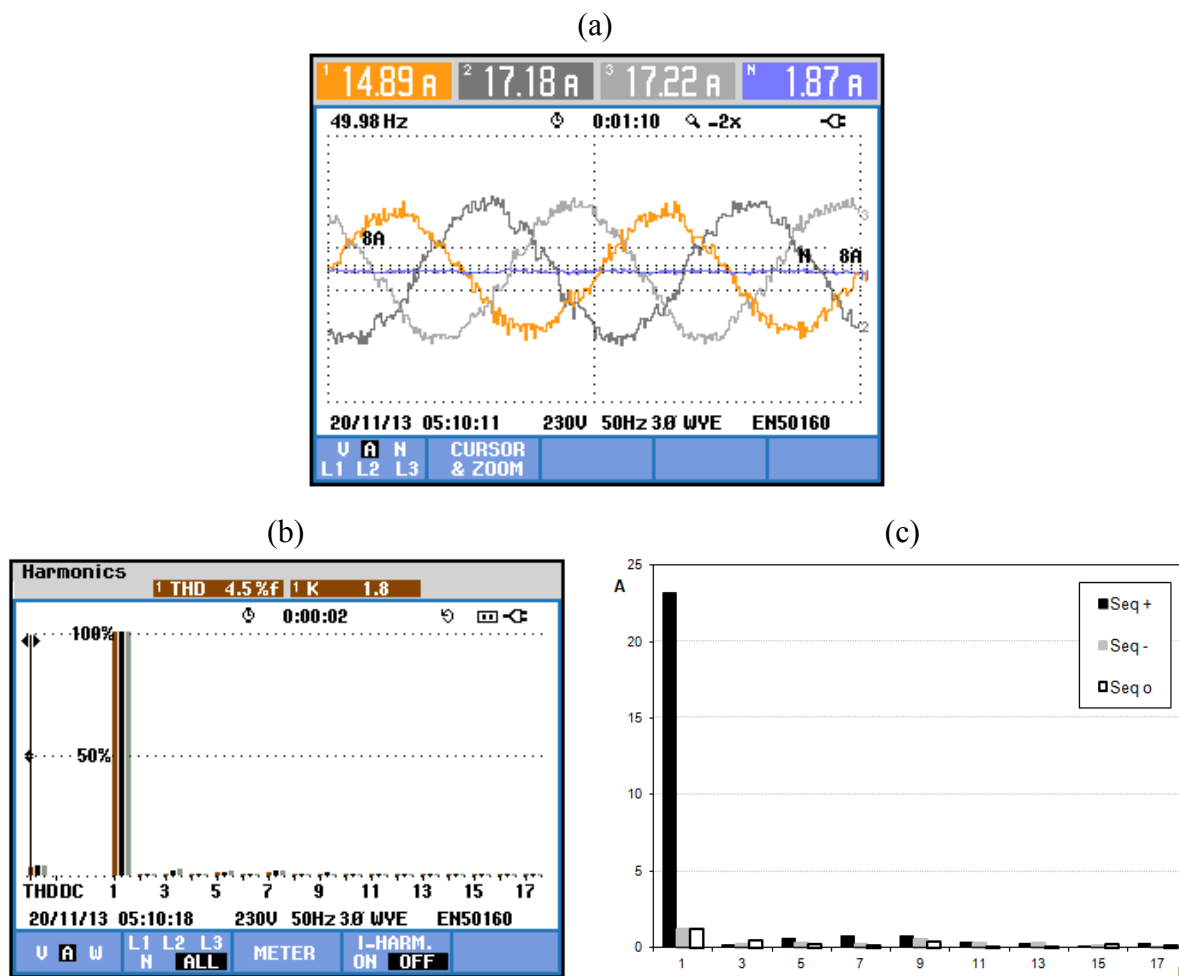
As figuras 124 e 125 mostram os resultados para as tensões e correntes trifásicas medidas na fonte, com o FAP de quatro braços compensando as harmônicas apresentadas no caso 7.

Figura 124 – Caso 9 – FAP de quatro braços em operação com tensões desequilibradas e cargas equilibradas: (a) Tensões trifásicas; (b) Espectro de fase das tensões; (c) Espectro das tensões sequenciais (valores de pico).



Fonte: Dados da autora.

Figura 125 – Caso 9 – FAP de quatro braços em operação com tensões desequilibradas e cargas equilibradas: (a) Correntes trifásicas; (b) Espectro de fase das correntes; (c) Espectro das correntes sequenciais (valores de pico).

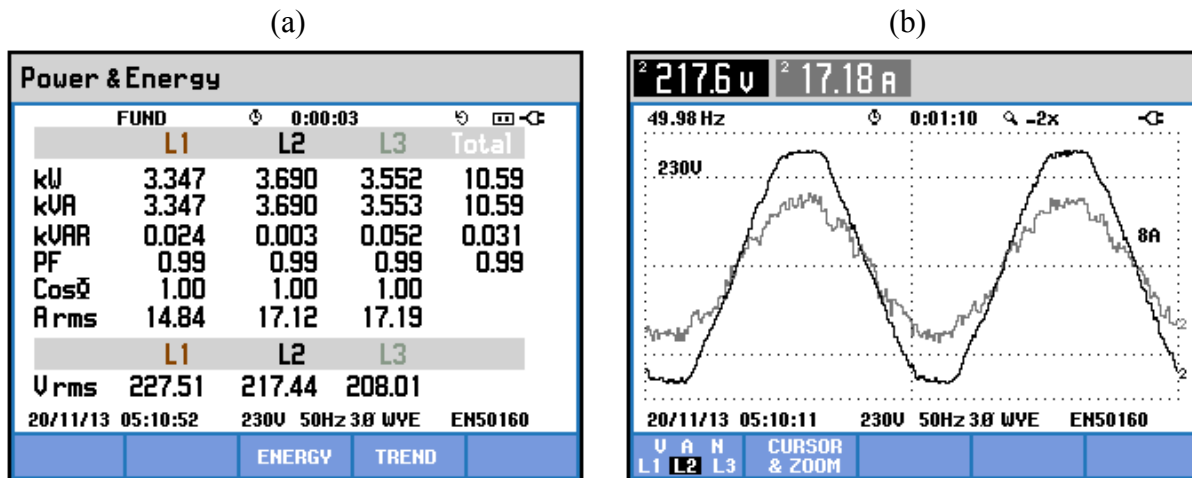


Fonte: Dados da autora.

No caso em questão, as distorções nas tensões trifásicas da fonte são minimizadas pela ação do FAP de quatro braços, figura 124. A figura 125 mostra que a atuação do FAP de quatro braços reduz fortemente a distorção total de corrente no sistema, compensando harmônicas de sequências positiva, negativa e zero. Como esperado, a atuação deste dispositivo também age na redução da corrente que circula pelo neutro, que é minimizada de 26,25 A (caso base) para 1,87 A.

Os dados de potência na fonte, bem como a tensão e a corrente na fase  $S$  são apresentados na figura 126.

Figura 126 – Caso 9 – FAP de quatro braços em operação com tensões desequilibradas e cargas equilibradas: (a) Potências na fonte; (b) Tensão e corrente na fase S.



Fonte: Dados da autora.

O fator de potência medido neste caso é 0,99. Nesta situação, de tensões de alimentação desequilibradas e cargas equilibradas, há novamente uma atuação bastante semelhante do arranjo híbrido de filtros proposto nesta tese comparado ao FAP de quatro braços. Este fato revela que, em uma situação de desequilíbrios nas tensões do sistema, o supressor eletromagnético operando em conjunto com o FAP de três braços apresenta praticamente as mesmas funcionalidades de um FAP de quatro braços. Esta afirmação pode ser constatada na tabela 30, que apresenta os resultados para os casos 7, 8 e 9.

Tabela 30 – Comparativo entre os casos 7, 8 e 9.

	Caso 7: Sem filtros	Caso 8: Com SE + FAP_3	Caso 9: Com FAP_4
<b>DTT(%)</b>	6,7	2,6	2,9
<b>DTC(%)</b>	68,4	4,2	4,1
<b>I<sub>neutro</sub> (A)</b>	26,25	2,13	1,87
<b>FP</b>	0,76	0,98	0,99

Fonte: Dados da autora.

#### 7.4 COMPARAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA ENTRE O ARRANJO HÍBRIDO DE FILTROS E UM FILTRO ATIVO DE QUATRO BRAÇOS

O objetivo desta seção é apresentar uma comparação de desempenho técnico e de custos entre o arranjo híbrido de filtros proposto nesta tese e um FAP de quatro braços. A avaliação de custos é baseada em valores de mercado cotados com fabricantes dos dispositivos de filtragem em Portugal. A moeda em questão é o Euro. Para realizar a avaliação



de custos foi necessário levantar o preço de dois filtros ativos, de três e quatro braços, e do supressor eletromagnético. A diferença entre o custo de FAPs de três e quatro fios é de difícil estimativa, pois a tecnologia do *Projecto SINUS* (seção 5.4) não desenvolveu FAPs de três braços, logo não é possível fazer comparações diretas. Deste modo, optou-se por uma ponderação que considera um mesmo valor de corrente nominal por braço (22 A) a ser processado pelos FAPs de três e quatro braços, e que leva a diferentes valores totais de correntes de compensação, tabela 31.

Tabela 31 – Valor total das correntes de compensação de FAPs de três e quatro braços.

FAP	Valor total de correntes de compensação
3 braços	$3 \times 22 \text{ A} = 66 \text{ A}$
4 braços	$4 \times 22 \text{ A} = 88 \text{ A}$

Fonte: Dados da autora.

Com base nos preços dos FAPs industrializados a partir da tecnologia do *Projecto SINUS*, foi feita uma extrapolação dos valores dos filtros que dispõe de uma corrente total compensação de 200 A, 400 A e 600 A. A partir da extrapolação foi obtido, então, um valor de 65,59 €/A para um FAP de quatro braços com uma corrente total de compensação igual a 88 A. Logo, o custo final desse filtro é de aproximadamente €5771,92. Para um FAP de três braços, considerando uma corrente de compensação igual a 66 A, foi obtido um valor de 68,54 €/A. O valor final desse filtro será de €4523,64. O custo orçado do supressor, composto pelo filtro e bloqueador eletromagnéticos, sem quadro elétrico e disjuntores, é de €540,00. A partir dos valores obtidos, chega-se a um preço total aproximado do arranjo híbrido de filtros igual a €5063,64.

A tabela 32 mostra um quadro comparativo do desempenho técnico e dos preços em p.u. do FAP de quatro braços e do arranjo híbrido de filtros estudados nesta tese. Para as comparações relacionadas ao desempenho da filtragem harmônica foram selecionados os casos 1, 2 e 3, que mostram os resultados dos ensaios com tensões e cargas equilibradas. O valor base, referente ao preço, escolhido para essa análise é o do filtro ativo de quatro braços.

Tabela 32 – Quadro comparativo de desempenho e custo.

Descrição	DTT (%)	DTC (%)	$I_{\text{neutro}}$ (A)	FP	Preço (p.u.)
Caso 1 – Sem filtros	4,2	63,1	22,93	0,8	---
Caso 2 – Com Arranjo híbrido de filtros	3	3,6	1,43	0,99	0.88
Caso 3 – Com FAP de quatro braços	2,9	4,2	2,04	0,99	1.0

Fonte: Dados da autora.

Como pode ser visto na tabela 32, o desempenho funcional do arranjo híbrido de filtros e do FAP de quatro braços é bastante semelhante, sendo que, em ambos os casos, os índices de distorções harmônicas e fator de potência resultam dentro dos limites recomendados por normas. O arranjo de filtragem do caso 2, composto pelo supressor eletromagnético e o FAP de três braços, é a alternativa de menor custo comparada à outra opção abordada (caso 3). Segundo o levantamento de preços, o arranjo híbrido de filtros tem um custo aproximadamente 12% inferior ao do FAP de quatro braços, apresentando-se, portanto, como opção mais econômica comercialmente. De um modo geral, esta redução de preço se dá, especialmente, devido à simplificação topológica do FAP de três braços, comparada ao FAP de quatro braços. Essa simplificação resulta no uso de duas chaves eletrônicas a menos e também na utilização de um número menor de sensores de corrente e tensão. Tratando-se de custos, vale lembrar que, na categoria de filtros ativos paralelos, é possível fazer FAPs a quatro fios em que o quarto fio é ligado ao ponto central do lado CC (*split capacitor*, apresentado na seção 3.6). Nesse caso a diferença de preço entre o FAP a três e a quatro fios seria ainda menor.

Além do menor custo apurado para o arranjo híbrido de filtros passivos e ativo proposto, deve-se considerar também que por envolver um sistema de controle mais simples, uma quantidade menor de chaves eletrônicas e por possuir na sua concepção dispositivos eletromagnéticos, o mesmo deve apresentar, de um modo geral, uma sensibilidade substancialmente menor a distúrbios na rede elétrica. Há de se observar também que, no caso deste arranjo híbrido, mesmo sob uma contingência operacional do FAP de três braços, os dispositivos eletromagnéticos podem continuar operando normalmente, reduzindo, ainda que de forma precária, os efeitos nocivos da circulação de componentes harmônicas homopolares.

Portanto, baseado nos resultados de ensaios obtidos, conclui-se que o arranjo híbrido de filtros se mostrou como uma solução viável do ponto de vista técnico-econômico, uma vez que além da redução de custos obtida, a operação combinada do supressor eletromagnético e do FAP de três braços, mostrou-se como uma boa opção para minimizar problemas de harmônicas, desequilíbrios de corrente de carga e fator de potência.

## 7.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As investigações e constatações apresentadas no decorrer deste capítulo foram especialmente direcionadas para as investigações experimentais da operação combinada dos dispositivos eletromagnéticos e do filtro ativo de três braços. Essa operação combinada foi

proposta neste trabalho com a finalidade de minimizar o fluxo de harmônicas em um sistema de distribuição a quatro fios.

Sob o ponto de vista experimental foram investigadas diversas situações, incluindo diferentes configurações do sistema de filtragem e da carga não linear e desequilíbrios nas tensões de alimentação. Como critérios de seleção foram escolhidos os casos que ilustram mais claramente as principais características operacionais do sistema de filtragem harmônica em questão.

A carga não linear e o arranjo híbrido de filtros foram conectados diretamente a rede elétrica. Apenas nos casos em que se estuda o desempenho do arranjo híbrido de filtros sob desequilíbrios na tensão de alimentação, utilizou-se variadores de tensão. Nestas condições, os ensaios mostraram o bom desempenho do sistema de filtragem, sendo que o arranjo proposto pelo FAP de três braços somado ao supressor eletromagnético desempenhou as mesmas funções de um FAP de quatro braços.

A alteração nos parâmetros de uma das fases da carga não linear gerou desequilíbrios na corrente de alimentação, fato que aumentou as distorções harmônicas totais de corrente e tensão. Com a inclusão do supressor eletromagnético e do FAP de três braços este dano foi reduzido, onde se constatou uma atuação satisfatória do arranjo híbrido de filtragem.

O uso combinado do FAP de três braços e dos dispositivos eletromagnéticos gerou bons resultados que, motivaram também estudos abrangendo a influência de desequilíbrios nas tensões do sistema alimentador. De um modo geral, foi possível concluir que para o sistema investigado nestes estudos experimentais, a sensibilidade dos dispositivos de filtragem frente aos desequilíbrios impostos nas tensões de alimentação, na ordem de 5%, é baixa, visto que, de um modo geral, a redução das distorções harmônicas e da corrente do condutor neutro foi satisfatória.

Sob o ponto de vista do teste de aderência, foram investigadas duas situações, com tensões e cargas equilibradas, onde a validação do arranjo híbrido de filtros proposto no ambiente de simulação digital foi realizada a partir da comparação entre as formas de onda de tensões e correntes de alimentação. A coerência entre os resultados experimentais e simulados demonstraram a validade do arranjo de filtros ativo e passivos construindo no simulador *PSIM*<sup>®</sup>.

Finalmente, outra importante questão abordada foi a comparação técnico-econômica entre o FAP de quatro braços e o arranjo híbrido de filtros. Esta comparação revelou que sob o ponto de vista técnico, a atuação das duas alternativas é similar. No entanto, o arranjo de

filtragem que contempla a operação combinada do supressor eletromagnético e de um FAP de três braços apresenta menor custo em relação à alternativa do FAP de quatro braços.

## 8 CONCLUSÕES

Frente ao crescente desenvolvimento da eletrônica de potência, o incremento expressivo de cargas não lineares nos sistemas de energia elétrica cresce também em proporções expressivas, sendo, portanto, este um dos fatores relacionados aos problemas ligados às distorções harmônicas de tensões e correntes. Embora os prejuízos econômicos decorrentes desse acelerado desenvolvimento sejam intensos, ainda persiste o crescimento do uso de equipamentos com alta concentração de cargas não lineares. Esta causa se justifica pelo fato de que os benefícios técnicos e econômicos ligados ao uso destas tecnologias são muito mais relevantes do que os efeitos nocivos causados pelas harmônicas geradas durante a operação das referidas cargas.

Com vistas à atenuação das distorções de tensão e corrente, é oportuna a adoção de medidas operacionais relacionadas à adequação das cargas geradoras de harmônicas a fim de torná-las menos poluentes. Por vezes, tais medidas são incapazes de garantir o funcionamento dos sistemas elétricos dentro dos limites operacionais estabelecidos pelas normas e recomendações técnicas. Neste contexto, torna-se imprescindível o uso de equipamentos auxiliares para a atenuação das distorções harmônicas ou para a preservação das condições de operação dos circuitos de alimentação, tais como: aliviar a sobrecarga em condutores neutros, reduzir o carregamento dos transformadores, diminuir as perdas por efeito joule, evitar a atuação intempestiva dos sistemas de proteção, entre outros.

O emprego de bloqueadores, filtros e dispositivos de compensação harmônica são as técnicas habitualmente aplicadas na mitigação das distorções de tensões e correntes. Normalmente, essas técnicas podem ser agrupadas em dois grandes grupos em função das suas principais características operacionais, sendo estes: filtros ativos e filtros passivos.

O princípio operacional dos filtros ativos é baseado no cancelamento de componentes harmônicas por meio da geração de sinais de magnitudes iguais e em oposição de fase àquelas geradas pela carga, sendo intrinsecamente adaptativos. Geralmente, os filtros ativos apresentam diversas vantagens operacionais quando comparados aos equivalentes passivos. Entretanto, o uso de filtros ativos em larga escala ainda enfrenta alguns obstáculos técnicos em decorrência da complexidade operacional para atender altas potências. Seu uso é restrito a casos específicos em aplicações direcionadas para redes de distribuição de energia elétrica, principalmente por razões de natureza econômica. Certamente, com o progresso tecnológico iminente, as limitações apontadas tendem a desaparecer.

Na categoria de filtros passivos, destacam-se os filtros e bloqueadores eletromagnéticos.

Os filtros eletromagnéticos baseiam-se exclusivamente no uso de arranjos eletromagnéticos, e dispensam o uso de capacitores. Seu uso, como filtro paralelo, está relacionado com o desvio das componentes harmônicas de sequência zero. Para esta aplicação, a base de funcionamento fundamenta-se na minimização da sua impedância equivalente de sequência zero por meio de um arranjo conveniente dos enrolamentos conectados às diferentes fases do sistema elétrico. As principais vantagens são: imunidade à criação de novas ressonâncias com o sistema alimentador, robustez, baixo custo relativo, e o amplo espectro de filtragem compreendendo todas as ordens harmônicas de sequência zero.

O uso do bloqueador eletromagnético de sequência zero propõe mais uma alternativa passiva no que se refere à atenuação de componentes harmônicas nas redes elétricas de suprimento. Este dispositivo eletromagnético é conectado em série entre a fonte e um conjunto de cargas, oferecendo uma alta impedância para componentes harmônicas de sequência zero. O bloqueador em questão realiza duas funções: a primeira é evitar que as correntes harmônicas de sequência zero geradas pela carga não linear fluam para a fonte, e a segunda é impedir o fluxo das correntes harmônicas advindas da fonte, quando as mesmas geram tensões de sequência zero. Este dispositivo pode operar sozinho ou em conjunto com outros arranjos auxiliares, visando adaptar a impedância do sistema para potencializar a atuação do filtro eletromagnético instalado.

Acredita-se que num futuro próximo, dispositivos de compensação harmônica ativos e passivos deverão coexistir nas redes elétricas, e que muitos sistemas de filtragem deverão progredir para arranjos híbridos que deverão reunir as vantagens técnicas e econômicas das duas tecnologias.

É nesta temática que se inseriu a presente tese, com uma contribuição inédita relacionada à proposição da operação conjunta de um filtro ativo paralelo de três braços e de filtros passivos.

Sob o ponto de vista técnico, as expectativas foram direcionadas para resultados que concretizassem todas as funcionalidades de um filtro ativo de quatro braços por meio do arranjo híbrido proposto. Neste sentido, foi proposto o uso de um filtro ativo de três braços, combinado com arranjos eletromagnéticos destinados ao confinamento de componentes homopolares, sejam estas originadas por desequilíbrios na frequência fundamental ou por concentração de componentes harmônicas.

Foram apresentadas no capítulo 2 as diretrizes metodológicas para a definição de modelos analíticos no domínio da frequência para filtros e bloqueadores eletromagnéticos de sequência zero.

Para o filtro eletromagnético, apresentou-se um modelo com núcleo de três colunas e foram introduzidas algumas hipóteses simplificadoras no sentido de promover o isolamento sequencial, e com isso facilitar a interpretação qualitativa dos resultados sem, todavia, arriscar a precisão numérica almejada. Baseado neste modelo teórico revelou-se que o principal parâmetro associado à atuação do dispositivo como filtro é o fator de acoplamento entre as bobinas de uma mesma coluna magnética, e que o desempenho operacional desejado está diretamente relacionado à maximização do mesmo.

Para o bloqueador de sequência zero, foi proposto um modelo baseado nas componentes sequenciais de tensões e correntes de alimentação desse dispositivo, sendo também apresentadas algumas considerações aceitáveis no processo de simplificação. Constatou-se que, à medida que o fator de acoplamento entre as bobinas do bloqueador eletromagnético se aproxima de um valor unitário, a eficácia no bloqueio das componentes de sequência zero cresce, e em contrapartida, para as demais sequências, positiva e negativa, obtém-se o equivalente a um curto-circuito.

O capítulo 3 apresentou uma síntese da classificação dos filtros ativos de potência, incluindo seus princípios básicos de operação e abordando a „Teoria Geral da Potência Reativa Instantânea em Sistemas Trifásicos“ como técnica de controle dos mesmos. Destacou-se o uso de filtros ativos paralelos por serem os mais utilizados na eliminação de correntes harmônicas, na compensação de potência reativa e no balanceamento de correntes desequilibradas, e por ser a topologia escolhida para compor o arranjo de filtragem híbrido estudado nesta tese.

A metodologia utilizada para avaliação do desempenho do sistema híbrido de filtragem, composto por um filtro ativo paralelo de três braços, um bloqueador eletromagnético e um filtro eletromagnético foi apresentada no capítulo 4. Inicialmente, foram percorridas as funcionalidades isoladas de cada um dos dispositivos que compõe o arranjo proposto, onde aspirou-se a ideia central de um novo sistema de compensação harmônica que incorpora simultaneamente filtragem ativa e passiva. Através da simplificação topológica do filtro ativo, proporcionada pela incorporação das estruturas eletromagnéticas, foi mostrado, à luz da teoria das potências complexas instantâneas, o novo fluxo de potências do sistema em questão.

No capítulo 5 foram discutidas as diretrizes para dimensionamento dos dispositivos eletromagnéticos em questão, bem como as análises das impedâncias sequenciais dos mesmos. Tanto o projeto quanto as análises experimentais dos dispositivos eletromagnéticos foram realizadas junto ao GEPE da UMinho, Guimarães, Portugal. Foi apresentado também o protótipo do filtro ativo paralelo utilizado nesta tese, onde destacaram-se suas principais características técnicas e os vários módulos de sua constituição. Este filtro ativo foi construído no âmbito de um projeto de pesquisa chamado *Projecto SINUS*.

O capítulo 6 tratou da validação por simulação, em regimes permanente e transitório, da operação combinada do filtro ativo paralelo de três braços e do supressor eletromagnético (filtro paralelo e bloqueador série), e confirmou que estes atendem perfeitamente às premissas estabelecidas.

Como desfecho, o capítulo 7 apresentou ensaios experimentais a partir de cenários comparativos, contemplando diferentes arranjos para o sistema de filtragem. Além disso, foram realizadas análises experimentais que ocorreram na forma de alterações no conjunto de cargas não lineares e desequilíbrios nas tensões de alimentação. Entre os casos analisados foram expostos apenas os mais esclarecedores no que diz respeito à compreensão dos principais fenômenos envolvidos no processo de filtragem e ao objetivo central desta tese. No que tange ao desempenho do filtro ativo paralelo de três braços operando de forma combinada com o supressor eletromagnético, os resultados indicaram a atuação almejada, uma vez que o arranjo híbrido de filtros apresentou as mesmas funcionalidades de um filtro ativo paralelo de quatro braços, reduzindo de forma eficaz as distorções harmônicas de correntes e tensões, e melhorando claramente o fator de potência do sistema. O desempenho dos modelos pode ser, portanto, considerado eficaz tendo em vista a confiabilidade dos resultados tangíveis dentro da classe de precisão dos equipamentos de medição, aquisição de dados e processamento de sinais. Com vistas à validação dos modelos do arranjo híbrido de filtros, alguns resultados experimentais e simulados no *PSIM*<sup>®</sup> foram também avaliados sob uma ótica comparativa, que revelou uma aderência satisfatória entre os ensaios e as modelagens no domínio do tempo. Por fim, capítulo 7 mostrou uma avaliação técnico-econômica entre a nova proposta de filtragem apresentada nesta tese e um filtro ativo paralelo de quatro braços. Esta avaliação mostrou que, no que diz respeito à filtragem harmônica e correção de fator de potência, ambas as alternativas apresentam resultados bastante satisfatórios. No entanto, sob a ótica de custos, feita através de uma estimativa, concluiu-se que o novo arranjo de filtros apresenta um preço aproximadamente 12% menor que o filtro ativo de quatro braços do *Projecto SINUS*.



Em suma, no contexto deste trabalho várias contribuições podem ser identificadas. Entre elas, destacam-se como as principais:

- A incorporação de novos conhecimentos relacionados à operação combinada de dispositivos de atenuação harmônica no âmbito da equipe de trabalho do LQEE da Unesp e do GEPE da UMinho;
- A análise, a implementação e o aperfeiçoamento dos modelos dos dispositivos eletromagnéticos;
- A proposição e o desenvolvimento de um sistema híbrido de filtros, composto por um filtro ativo paralelo de três braços trabalhando em conjunto com um supressor eletromagnético de sequência zero, que realiza todas as funcionalidades de um filtro ativo paralelo de quatro braços no que diz respeito à compensação de harmônicas e desequilíbrios de corrente e à correção de fator de potência. Entende-se que esta seja a principal contribuição original deste trabalho.

Como propostas de continuidade desta pesquisa citam-se:

- Otimização do projeto e desenvolvimento do supressor eletromagnético de sequência zero, visando redução dos custos de implementação, melhorias no desempenho de filtragem e redução das perdas.
- Avaliação da melhoria da filtragem do supressor eletromagnético (filtro e bloqueador) com a utilização de núcleos ferromagnéticos 3D.
- Avaliação de diferentes materiais ferromagnéticos para os núcleos do filtro e bloqueador, de forma a otimizar o desempenho e reduzir as perdas dos mesmos.
- Realização de novos estudos da solução proposta em diferentes condições de utilização, como por exemplo, com maior desequilíbrio de cargas (levando a uma maior componente de sequência zero na fundamental) e com maior desequilíbrio nas tensões da rede elétrica.
- Realização de ensaios em instalações elétricas reais, que permitam comparar o desempenho entre a filtragem por filtro ativo paralelo de quatro braços e a solução proposta do supressor eletromagnético de sequência zero em conjunto com filtro ativo paralelo de três braços. Para tal, novos protótipos do supressor eletromagnético de sequência zero deverão ser desenvolvidos.

- Realização de estudo econômico, de eficiência energética, de confiabilidade e robustez entre a filtragem por filtro ativo paralelo de quatro braços e a solução proposta do supressor eletromagnético de sequência zero em conjunto com filtro ativo paralelo de três braços.
- Comparação técnico-econômica entre o arranjo híbrido de filtros proposto nesta tese e o filtro ativo paralelo *split capacitor*.

## REFERÊNCIAS

- AFONSO, J. L.; AREDES, M.; WANATABE, E. H.; MARTINS, J. S. Shunt active filter for power quality improvement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE USER INTERFACE ENGINEERING, 2000, Lisboa. **Proceeding...** Lisboa: [s.n.], 2000a. p.683-691.
- AFONSO, J. L.; COUTO, C.; MARTINS, J. Active filters with control based on the p-a theory. **IEEE Industrial Electronics Society Newsletter**, New York, v. 47, n. 3, pp. 5-10, 2000b.
- AFONSO, J. L.; SILVA, H. J. R.; MARTINS, J. S. Active filters for power quality improvement. In: IEEE PORTO POWERTECH, 2001, Porto. **Proceeding...** Porto: [s.n.], 2001, p. 10-13.
- AFONSO, J. L.; MARTINS, J. S.; FREITAS, M. J. S.; PINTO, E.; MORGADO, R.; SOUSA, J. A.; PREGITZER, R. L.; CARLOS, J. C.; FERNANDES, N.; CUNHA, J.; BATISTA, J. Projecto SINUS: tecnologia para compensação dinâmica de harmônicos, factor de potência e desequilíbrios. In: ENGENHARIA ELETRÔNICA INDUSTRIAL E COMPUTADORES, 1., 2005, Guimarães. **Proceeding...** Guimarães, 2005. p. 33-34.
- AFONSO, J. L.; MARTINS, J. S.; FREITAS, M. J. S.; MORGADO, T. A.; PINTO, J. G.; PREGITZER, R. L.; CUNHA, J.; BATISTA, J.; PINTO, E. Projecto SINUS: tecnologias para melhoria da eficiência da qualidade de energia em sistemas elétricos. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE ENERGIAS RENOVÁVEIS, 6., 2006, Figueira da Foz. **Proceeding...** Figueira da Foz: ENER'06, 2006., p. 101-106.
- AFONSO, J. L.; PINTO, J. G.; GONÇALVES, H. **Active Power Conditioners to Mitigate Power Quality Problems in Industrial Facilities**. InTech: Ed. Dr. Ahmed Zobaa, [S. l.: s.n.], 2013. 34 p.
- AKAGI H.; KANAGAWA Y.; FUJITA, K.; NABAE, A. Generalized theory of the Instantaneous Reactive Power in the Three-Phase Circuits. **Wiley Periodicals**, Tokio, v. 103, n. 4, p. 58-66, 1983.
- BELCHIOR, F. N.; FERREIRA, J. F. V.; OLIVEIRA, J. C.; BERNARDES, V. A.; OLIVEIRA, L. C. O. Zero sequence electromagnetic filter performance with non ideal conditions. In: IEEE-PES INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 12., 2006, Cascais. **Proceeding...** Cascais: IEEE Xplore digital library, 2006. p.1-6.
- CZARNECKI, L. S. Harmonic blocking compensator: an alternative for improving power quality, In: INTERNATIONAL CONFERENCE HARMONICS POWER SYSTEM, 6., 1994, Bologna. **Proceedings...** Bologna: IEEE Xplore digital library, 1994. p. 283-288.
- CZARNECKI, L. S. Instantaneous reactive power p-q theory and power properties of three-phase systems, **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 21, n. 1, p. 362-367, 2006.
- DAHONO, P. A.; WIDJAYA, R. E.; MARSIS, S.; QAMARUZZAMAN. A practical approach to minimize the zero sequence current harmonics in power distribution systems. In: POWER

CONVERSION CONFERENCE, 1997, Nagaoka. **Proceeding...** Nagaoka: IEEE Xplore digital library, 2002. p. 683-686.

DUGAN, R. C.; McGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H.W. **Electrical power systems quality**. 2.ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 158 p.

EUROPEAN STANDARD. **EN 50160**: voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. Poland: Wroclaw University of Technology, 1994. 16p.

FIGUEREDO, D. G. **Análise de Fourier e equações diferenciais parciais**. Rio de Janeiro: IMPA/CNPq, 1986. 274 p.

FLUKE - Fluke instruction sheet i400s AC current clamp. Netherland: Fluke Corporation, 2004. 2p.

FLUKE. FLUKE 434/435. Three phase power quality analyzer users manual. Netherlands: Fluke Corporation, 2008. 140p.

FREITAS, J. S. M. **Implementação de um Filtro Ativo de Potência para Otimização da Interface entre a Rede e outros Sistemas Elétricos**. 2004. 120f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade do Minho, Braga, 2004.

FREITAS, S. C. L.; OLIVEIRA, L. C. O.; SOUZA, J. B.; OLIVEIRA, R. N. Experimental analysis and adherence test of the electromagnetic zero-sequence blocking model. In: IEEE-PES TRANSMISSION & DISTRIBUTION, 2010, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: [s.n.], 2010. p. 589-593.

FREITAS, S. C. L. **Supressor eletromagnético de componentes harmônicas de sequência zero**. 2011. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2011.

GYUGI, L.; STRYCUDA, E. C. Active AC power filter. In: IEEE-IAS Annual Meeting, 1976, Orlando. **Proceedings...** Orlando: IEEE-IAS Annual Meeting, 1976, p. 529-535.

IEEE SA 519-1992. **Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems**. [S. l.: s.n], 1992. 100 p. (Industrial Power Converters Committee).

IEEE TASK FORCE. Effect of harmonics on equipments. **IEEE Trans. on Power Delivery**, Piscataway, v.8, n.2, p.672-680, 1993.

JOU, H.; WU, K.; WU, CHIANG, W. A three-phase four-wire power filter comprising a three-phase three-wire active power filter and zig-zag transformer. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New-York, v. 23, n.1, p. 252-259, 2008.

LINDEKE, D. **Projeto de um filtro ativo paralelo de 1kVA usando técnicas de controle analógico e digital**. 2003. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2003.

McLYMAN, C. W. T. **Transformer and inductor design handbook**. 3. ed. New York: CRC Press, 2004.

OLIVEIRA, J. C.; BELCHIOR, F. N.; OLIVEIRA, L. C. O.; MEDEIROS, C. A. G.; BELCHIOR, F. N. **Uma nova abordagem à filtragem de harmônicas através de dispositivos eletromagnéticos**. 2006. 174f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

OLIVEIRA, L. C. O.; RAVAGNANI, L. L.; MILANES, D. L. Modeling for passive hybrid filter performance analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE – ELECTRICAL POWER QUALITY AND UTILISATION, 9., 2007, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: [s.n.], 2007a. p.1-6.

OLIVEIRA, L. C. O.; RAVAGNANI, L. L.; OLIVEIRA, J. C.; BELCHIOR, F.; OLIVEIRA, R. A. N. Análise experimental das impedâncias características dos filtros eletromagnéticos de sequência zero. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 7., 2007, Santos. **Anais...** Santos: [s.n.], 2007b. p. 1-6.

OLIVEIRA, L. C. O.; RAVAGNANI, L. L.; SOUZA, J. B.; OLIVEIRA, J. C.; BELCHIOR, F. N. Método das transmitâncias sequenciais na avaliação de sistemas de filtragem harmônica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 8., 2009, Blumenau. **Anais...** Blumenau: Labplan/UFSC, 2009. p. 1-8.

OLIVEIRA, L. C. O.; FREITAS, S. C. L.; SOUZA, J. B.; OLIVEIRA, J. C. Modeling for performance analysis of electromagnetic zero-sequence suppressor. In: IEEE-PES INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 14., 2010, Bergamo. **Proceedings...** Bergamo: IEEE Xplore digital library, 2010. p. 1-8.

OMORI, J. S. **Aplicação de filtro ativo trifásico em sistemas de distribuição de baixa tensão**. 2007. 227f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba, 2007.

PENG, F. Z.; ADAMS, D. J. Harmonics sources and filtering approaches – series/parallel, active/passive, and their combined power filters. **IEEE Industry Applications Magazine**, Maryland, v.7, n.4, p.18-25, 2001.

PREGITZER, R.; COSTA, J. C.; MARTINS, J. S.; AFONSO, J. L. Simulation and implementation of a 3-phase 4-wire shunt active power filter. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND POWER QUALITY, 6., 2006, Cascais. **Proceedings...** Cascais: [s.n.], 2006, p. 1-6.

PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL - PRODIST. **Módulo 8: qualidade de energia elétrica**. Brasil: ANEEL, 2008. 53p.

RAVAGNANI, L. L. **Sistemas híbridos para mitigação de harmônicos: modelagem e estudos experimentais**. 2008. 152f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2008.

RIBEIRO, E. **Filtros ativos série para compensação de harmônicas de tensão**. 2003. 224f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2003.

RODRIGUES, A. M. **Influência da distorção harmônica e de desequilíbrios em medidores de energia elétrica ativa**. 2009. 11f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, 2009.

SINGH, B.; AL-HADDAD, K., CHANDRA, A. A review of active filters for power quality improvement. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v. 46, n. 5, p. 960-971, 1999.

TEODORO, R. G. **Metodologia para compensação de desequilíbrio em redes elétricas**. 2005. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2005.

VENDRAMINI, J. F. **Uma nova abordagem à filtragem de harmônicos de sequência zero através de dispositivos eletromagnéticos**. 2006. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

WATANABE, E. H.; AREDES, M.; PING, W.W.; PILOTT, L. A. S. **O Estado da Arte em Eletrônica de Potência**. Rio de Janeiro: CIGRÉ; COPPE; CEPTEL, 1998.

## APÊNDICE A – PROJETOS DOS DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS

### 1. Etapas de Projeto do Filtro Eletromagnético

As etapas do projeto do filtro eletromagnético foram baseadas a partir da referência *Transformer and Inductor Design Handbook* (McLyman, 2004) e são similares às diretrizes para projetos de transformadores de potência trifásicos. A tabela 33 apresenta os dados pré-estabelecidos para o projeto do filtro eletromagnético.

Tabela 33 – Dados de projeto do filtro eletromagnético.

Dados pré-estabelecidos	Sigla	Valor
Tensão máxima sobre o enrolamento	$V_L$	230 V
Tensão resultante sobre o enrolamento	$V_R$	200 V
Corrente máxima no enrolamento	$I_L$	10 A
Frequência na linha	$f$	50 Hz
Eficiência global	$n$	90%
Densidade de fluxo	$B_{ac}$	1,37 T
Fator de utilização da janela	$K_u$	0,41
Fator de forma da senóide	$K_f$	4,44
Coefficiente que considera uma elevação máxima de 25°C na temperatura do transformador	$K_j$	304

Fonte: Dados da autora.

**1ª etapa:** Cálculo da potência total do filtro

$$S = 3V_R \cdot I_L = 6k VA$$

$$S_{total} = \frac{S}{n} = 6,7k VA$$

**2ª etapa:** Cálculo do produto das áreas

Esta etapa determina as dimensões mínimas do núcleo do filtro.

$$A_p = \left( \frac{S_{total} \cdot 10^4}{4,44 \cdot B_{ac} \cdot f \cdot K_u \cdot K_j} \right)^{1,14} = 5006,14 cm^4$$

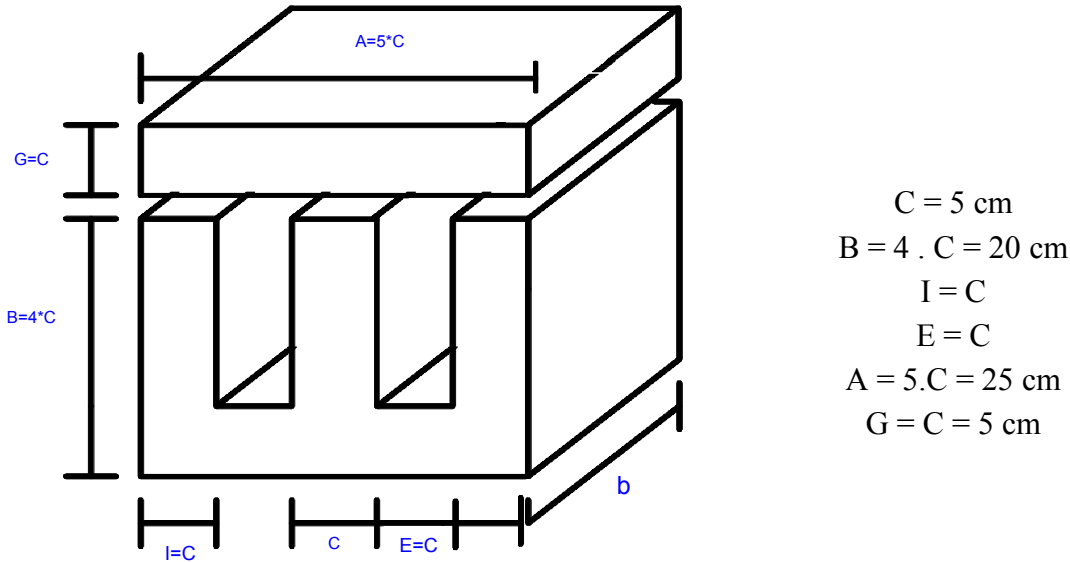
**3ª etapa:** Seleção da lâmina e determinação das dimensões do núcleo

Considerando as dimensões de lâminas E e I disponibilizadas pelo executor do projeto, deve-se obter um produto das áreas final maior ou igual ao calculado na etapa anterior.

Tendo sido escolhida a lâmina E-I de aço silício de grãos orientados, com as dimensões mostradas na figura a seguir, deve-se determinar o comprimento do empilhamento das

lâminas (b), baseando-se nas dimensões dos carretéis disponibilizados pelo executor do projeto.

Figura 127 – Dimensões das lâminas E-I do filtro eletromagnético



Fonte: Dados da autora.

Cálculo da área da janela:

$$W_a = (B - G)C = 75 \text{ cm}^2$$

Cálculo da área total de uma lâmina E e I, descontadas as duas janelas:

$$A_{total} = (B + G).A - 2.W_a = 475 \text{ cm}^2$$

Cálculo da área da perna central

$$A_c = \frac{2 A_p}{3 W_a} = 44,5 \text{ cm}^2$$

Logo, o comprimento do empilhamento deve ser maior ou igual no mínimo:

$$b = \frac{A_c}{C} = 8,9 \text{ cm}$$

Sabendo que o comprimento do empilhamento deve ser maior ou igual a 8,9 cm e tendo disponível para execução do projeto um carretel de 9 cm, deve ser realizado um novo cálculo de área da perna central:

$$A_{c\_novo} = C.b = 45 \text{ cm}^2$$

Finalmente, o novo produto das áreas é dado por:

$$A_{p\_novo} = \frac{3}{2}(A_{c\_novo}.W_a) = 5062,5 \text{ cm}^2$$



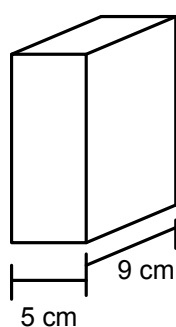
**4ª etapa:** Cálculo do número de espiras

$$N_L = \frac{V_L \cdot 10^4}{k_f \cdot B_{ac} \cdot f \cdot A_{c\_novo}} \cong 168 \text{ espiras}$$

**5ª etapa:** Cálculo da resistência linear aproximada do enrolamento

Tendo em conta a disponibilidade e uso de um fio condutor de cobre esmaltado, com diâmetro igual a 2,5mm e seção igual a 4,2mm<sup>2</sup>, a resistência linear aproximada é de 0,0041 Ω/m.

Logo, considerando as dimensões de cada perna do filtro, a resistência linear aproximada total de cada enrolamento pode ser calculada como segue:



$$\cong 28 \text{ cm/espira}$$

$$168 \text{ espiras} * 0,28\text{m} = 47,04 \text{ m}$$

Portanto,

$$\text{Resistência total aproximada} \cong 47,04 \text{ m} \cdot 0,0041 \frac{\Omega}{\text{m}}$$

$$\text{Resistência total aproximada} \cong 0,193 \Omega$$

## 2. Etapas de Projeto do Bloqueador Eletromagnético

As etapas do projeto do bloqueador foram baseadas a partir da referência *Transformer and Inductor Design Handbook* (McLyman, 2004) e são similares às diretrizes para projetos de transformadores de potência monofásicos. A tabela 34 apresenta os dados pré-estabelecidos para o projeto do filtro eletromagnético.

Tabela 34 – Dados de projeto do bloqueador eletromagnético.

Dados pré-estabelecidos	Sigla	Valor
Queda de tensão máxima sobre o enrolamento do bloqueador	$V_L$	15 V
Corrente de linha máxima no enrolamento	$I_L$	22 A
Frequência na linha	$f$	50 Hz
Eficiência global	$n$	90%
Densidade de fluxo	$B_{ac}$	1,2 T
Fator de utilização da janela	$K_u$	0,4
Fator de forma da senóide	$K_f$	4,44
Densidade de corrente	$J_i$	450

Fonte: Dados da autora.

**1ª etapa:** Cálculo da potência total do bloqueador

$$S = 3V_L \cdot I_L = 990 \text{ VA}$$

$$S_{total} = \frac{S}{\eta} = 1,1 \text{ kVA}$$

**2ª etapa:** Cálculo do produto das áreas

Esta etapa determina as dimensões mínimas do núcleo do filtro.

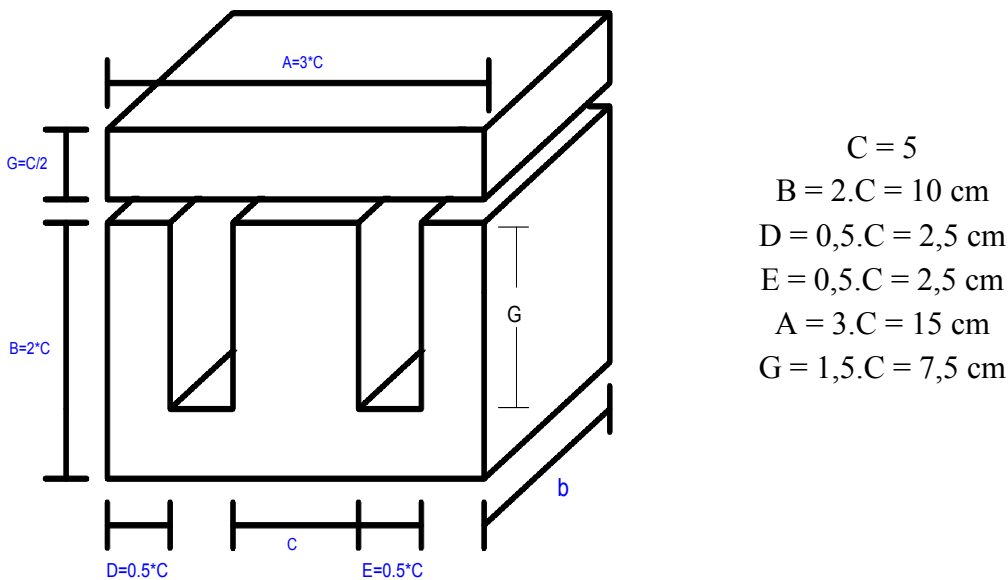
$$A_p = \frac{S_{total} \cdot 10^4}{B_{ac} \cdot f \cdot K_u \cdot K_f \cdot J_i} = 229,4 \text{ cm}^2$$

**3ª etapa:** Seleção da lâmina e determinação das dimensões do núcleo

Considerando as dimensões de lâminas E e I disponibilizadas pelo executor do projeto, deve-se obter um produto das áreas final maior ou igual ao calculado na etapa anterior.

Tendo sido escolhida a lâmina E-I de aço silício de grãos orientados, com as dimensões mostradas na figura seguinte, deve-se determinar o comprimento do empilhamento das lâminas (b), baseando-se nas dimensões dos carretéis disponibilizados pelo executor do projeto.

Figura 128 – Dimensões das lâminas E-I do bloqueador eletromagnético.



Fonte: Dados da autora.

Baseada na dimensão do menor carretel disponibilizado pelo fabricante, o comprimento do empilhamento b é igual à 5 cm.

Cálculo da área da perna central:

$$A_c = C \cdot b = 25 \text{ cm}^2$$

Cálculo da área da janela:

$$W_a = 0,75 \cdot C^2 = 18,75 \text{ cm}^2$$

Cálculo do novo produto das áreas:

$$A_{p\_novo} = A_c \cdot W_a = 468,75 \text{ cm}^2$$

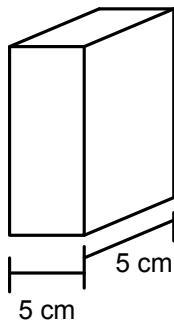
**4ª etapa:** Cálculo do número de espiras

$$N_L = \frac{V_L \cdot 10^4}{k_f \cdot B_{ac} \cdot f \cdot A_c} \cong 22 \text{ espiras}$$

**5ª etapa:** Cálculo da resistência linear aproximada do enrolamento

Tendo em conta a disponibilidade e uso de um fio condutor de cobre esmaltado, com diâmetro igual a 2mm e seção igual a 3,3mm<sup>2</sup>, a resistência linear aproximada é de 0,0052 Ω/m.

Logo, considerando as dimensões da perna central do bloqueador, a resistência linear aproximada total de cada enrolamento pode ser calculada como segue:



$$\cong 20 \text{ cm/espira}$$

$$22 \text{ espiras} * 0,2\text{m} = 4,4 \text{ m}$$

Portanto,

$$\text{Resistência total aproximada} \cong 4,4\text{m} \cdot 0,052 \frac{\Omega}{\text{m}}$$

$$\text{Resistência total aproximada} \cong 0,229 \Omega$$



## APÊNDICE B – TABELAS CORRESPONDENTES AOS CASOS ENSAIADOS NO CAPÍTULO 7

Este apêndice contém as tabelas correspondentes aos espectros harmônicos das tensões e correntes sequenciais apresentadas na seção 7.3.

### I. Caso 1 – Sem filtros com tensões de alimentação e cargas equilibradas

Figura 129 – Caso 1: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 85(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 85(c); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 86(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 86(c).

(a)

HARMONICS TABLE				
Volts	L1	L2	L3	N
THD%f	4.1	4.3	4.1	39.8
H3%f	3.0	3.3	3.2	15.6
H5%f	1.6	1.3	1.5	9.2
H7%f	2.1	2.3	2.0	9.7
H9%f	0.4	0.4	0.4	9.1
H11%f	0.4	0.2	0.4	9.2
H13%f	0.2	0.3	0.2	9.3
H15%f	0.3	0.2	0.2	9.6

18/11/13 16:43:01 230V 50Hz 3Ø WVE EN50160

(b)

h	F+	$\Phi^+$	F-	$\Phi^-$	F <sub>0</sub>	$\Phi^0$
1	325.66	-1.0	3.12	154.7	0.46	56.9
2	2.23	-0.2	2.27	179.8	0.04	-88.4
3	1.88	8.4	2.61	-176.2	10.35	-33.3
4	2.18	0.5	2.21	179.4	0.08	-97.2
5	1.71	5.6	7.00	163.0	0.18	43.5
6	2.24	-1.1	2.23	179.5	0.10	-91.2
7	8.83	-13.5	2.19	172.7	0.26	-116.8
8	2.25	0.3	2.21	-179.7	0.08	-80.1
9	2.19	2.0	2.23	-179.0	1.38	-35.3
10	2.25	-0.3	2.22	179.8	0.08	-88.4
11	2.11	4.6	2.68	157.2	0.20	-14.5
12	2.22	-0.2	2.25	180.0	0.08	-82.3
13	2.95	-4.8	2.33	-179.2	0.19	-120.1
14	2.22	0.1	2.24	-179.7	0.07	-98.8
15	2.22	-2.4	2.20	-176.8	0.80	-65.5

(c)

HARMONICS TABLE				
Amps	L1	L2	L3	N
THD%f	63.7	61.5	64.2	0L
H3%f	60.8	58.6	61.0	0L
H5%f	15.7	13.1	17.1	138.4
H7%f	7.9	9.8	7.1	60.2
H9%f	5.9	7.1	5.5	109.7
H11%f	3.1	3.6	3.3	48.3
H13%f	1.7	2.1	1.6	43.3
H15%f	1.0	1.4	0.9	147.6

18/11/13 16:42:48 230V 50Hz 3Ø WVE EN50160

(d)

h	F+	$\Phi^+$	F-	$\Phi^-$	F <sub>0</sub>	$\Phi^0$
1	18.09	-15.4	0.59	110.8	0.31	-147.7
2	0.11	-23.6	0.12	-158.2	0.10	87.3
3	0.37	-91.0	0.14	-165.0	10.88	128.2
4	0.12	-25.5	0.12	-158.8	0.10	87.0
5	0.36	-15.8	2.82	-106.0	0.13	122.8
6	0.12	-27.7	0.13	-158.1	0.11	89.4
7	1.55	-82.2	0.15	-38.1	0.29	115.7
8	0.13	-25.2	0.13	-156.6	0.11	88.3
9	0.10	69.9	0.19	-140.2	1.16	25.7
10	0.13	-25.1	0.13	-154.7	0.12	90.8
11	0.16	-30.5	0.55	99.5	0.10	120.3
12	0.13	-23.3	0.13	-154.3	0.11	91.0
13	0.20	-165.5	0.18	-145.6	0.14	70.4
14	0.13	-23.3	0.13	-154.8	0.11	91.1
15	0.20	-23.8	0.18	-173.0	0.20	154.6

Fonte: Dados da autora.

II. Caso 2 – SE e FAP de três braços em operação com tensões de alimentação e cargas equilibradas

Figura 130 – Caos 2: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 91(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 91(c); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 92(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 92(c).

(a)

HARMONICS TABLE				
0:00:03				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%f	2.9	3.0	3.2	32.0
H3%f	0.6	0.5	0.6	9.0
H5%f	2.0	1.9	2.2	10.3
H7%f	1.9	2.1	2.1	9.2
H9%f	0.2	0.1	0.1	9.6
H11%f	0.4	0.3	0.4	9.6
H13%f	0.1	0.3	0.3	9.1
H15%f	0.2	0.2	0.2	9.4
19/11/13 15:21:48 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH		TREND	

(c)

HARMONICS TABLE				
0:00:09				
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	3.4	3.7	3.6	106.5
H3%f	2.2	2.1	1.9	866.0
H5%f	1.5	2.1	1.8	115.5
H7%f	1.1	1.3	1.8	116.6
H9%f	0.6	0.5	0.5	73.6
H11%f	0.5	0.6	0.6	59.6
H13%f	0.6	0.5	0.5	47.8
H15%f	0.5	0.5	0.5	56.5
19/11/13 15:21:34 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH		TREND	

(b)

h	F+	$\Phi^{o+}$	F-	$\Phi^{o-}$	F <sub>0</sub>	$\Phi^{o0}$
1	322.15	-1.7	2.85	156.7	0.73	31.5
2	2.95	-12.2	1.33	167.2	0.21	-19.3
3	2.10	-6.6	2.21	-175.4	1.73	100.2
4	2.73	14.7	2.48	179.9	0.76	-8.7
5	2.29	0.9	8.25	-175.2	0.78	39.5
6	2.25	-7.5	1.63	172.8	0.33	58.0
7	8.47	-14.0	1.80	-172.9	0.45	100.8
8	2.58	9.5	2.22	-174.0	0.49	-2.5
9	2.81	-10.1	1.76	-160.8	0.33	175.5
10	2.05	-8.7	2.22	178.9	0.25	103.2
11	2.63	-11.9	2.91	168.9	0.33	68.7
12	2.42	-10.6	1.58	-167.8	0.16	-57.6
13	3.37	-15.5	2.23	163.6	0.37	168.3
14	2.54	-4.6	1.96	-173.6	0.16	-41.2
15	2.38	7.2	2.07	-173.2	0.70	-56.7

(d)

h	F+	$\Phi^{o+}$	F-	$\Phi^{o-}$	F <sub>0</sub>	$\Phi^{o0}$
1	20.23	-2.0	0.23	-141.8	0.03	-168.6
2	0.26	87.2	0.40	155.6	0.10	158.0
3	0.05	112.2	0.17	-153.6	0.42	52.9
4	0.36	85.1	0.56	-167.1	0.11	-146.2
5	0.12	-97.8	0.14	-90.0	0.08	130.2
6	0.14	-172.9	0.31	-145.9	0.05	142.5
7	0.22	-8.5	0.31	-167.7	0.06	-148.3
8	0.16	-61.3	0.24	156.9	0.05	149.2
9	0.12	-26.1	0.16	38.2	0.10	-4.9
10	0.25	23.3	0.39	-91.5	0.06	-36.7
11	0.23	-2.2	0.18	171.7	0.09	168.0
12	0.39	-88.5	0.11	71.4	0.04	178.8
13	0.21	50.9	0.23	-178.6	0.06	81.7
14	0.50	3.0	0.46	176.7	0.13	-111.4
15	0.06	-95.0	0.37	-170.5	0.05	-139.8

Fonte: Dados da autora.

III. Caso 3 – FAP de quatro braços em operação com tensões de alimentação e cargas equilibradas

Figura 131 – Caso 3: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 99(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 99(d); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 100(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 100(c).

(a)

HARMONICS TABLE				
	0:00:02			
Volt	L1	L2	L3	N
THD%f	2.8	2.9	2.9	31.4
H3%f	0.7	0.7	0.7	9.3
H5%f	1.9	1.8	2.1	9.8
H7%f	1.8	1.9	1.9	9.1
H9%f	0.1	0.2	0.2	9.0
H11%f	0.3	0.4	0.2	9.3
H13%f	0.4	0.6	0.5	8.9
H15%f	0.2	0.2	0.2	8.9
21/11/13 06:31:14 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W U&A		HARMONIC GRAPH		TREND

(b)

h	F+	$\Phi^+$	F-	$\Phi^-$	F <sub>0</sub>	$\Phi^0$
1	324.92	-2.6	2.76	147.9	0.57	62.5
2	3.45	-7.4	1.97	174.0	0.21	-166.4
3	2.04	7.3	2.51	-168.0	2.97	80.8
4	2.58	6.3	3.07	177.2	0.30	22.5
5	1.97	7.0	8.63	160.6	0.97	70.7
6	1.46	-6.0	1.63	-179.4	0.75	74.5
7	7.52	3.8	2.21	172.0	0.55	103.2
8	3.01	-1.9	2.62	175.0	0.16	-74.5
9	2.28	-15.6	2.06	-169.5	0.49	36.1
10	1.58	14.4	2.15	179.6	0.24	63.6
11	2.66	-10.2	1.88	-143.8	0.52	-9.2
12	2.36	-0.7	2.38	-175.1	0.37	138.3
13	3.12	-27.6	2.12	-179.4	0.27	-74.1
14	2.20	-13.1	1.97	-178.1	0.48	59.0
15	2.17	-4.5	1.96	178.7	0.38	-152.6

(c)

HARMONICS TABLE				
	0:00:09			
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	3.7	4.4	4.6	682.6
H3%f	1.0	2.3	2.5	523.7
H5%f	1.7	1.3	2.0	155.7
H7%f	2.0	2.4	2.3	85.3
H9%f	0.7	1.4	1.2	262.3
H11%f	0.6	0.8	0.9	69.4
H13%f	0.6	0.7	0.7	43.6
H15%f	0.7	0.9	0.8	165.8
21/11/13 06:31:02 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W U&A		HARMONIC GRAPH		TREND

(d)

h	F+	$\Phi^+$	F-	$\Phi^-$	F <sub>0</sub>	$\Phi^0$
1	24.08	-2.0	1.34	174.1	1.20	177.0
2	0.70	-100.6	0.50	1.4	0.12	-16.4
3	0.35	76.8	0.21	-143.9	0.58	-100.2
4	0.64	-9.1	0.24	67.6	0.16	-106.7
5	0.15	-73.5	0.61	-94.5	0.15	-167.7
6	0.44	2.1	0.60	155.1	0.18	-100.1
7	0.83	11.1	0.64	-142.5	0.15	-102.4
8	0.23	119.1	0.19	24.9	0.08	24.0
9	0.23	-137.1	0.32	-20.0	0.15	-150.3
10	0.54	4.5	0.05	17.1	0.07	7.3
11	0.40	-31.5	0.34	-138.5	0.05	-177.9
12	0.24	17.2	0.19	-71.7	0.11	-48.0
13	0.27	163.6	0.32	-123.9	0.03	-177.1
14	0.44	-23.8	0.22	-159.4	0.04	-124.8
15	0.19	-40.5	0.20	-112.0	0.13	-151.9

Fonte: Dados da autora.

IV. Caso 4 – Sem filtros com tensões de alimentação equilibradas e cargas desequilibradas

Figura 132 – Caso 4: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 102(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 102(c); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 103(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 103(c).

(a)

HARMONICS TABLE				
0:00:03				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%f	3.7	4.3	4.2	36.4
H3%f	2.3	3.1	2.9	14.9
H5%f	1.8	2.0	1.8	10.0
H7%f	2.2	2.1	2.3	10.6
H9%f	0.2	0.2	0.1	8.9
H11%f	0.5	0.7	0.8	9.4
H13%f	0.3	0.5	0.4	8.9
H15%f	0.1	0.1	0.1	9.8
21/11/13 10:49:54 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH		TREND	

(b)

h	F+	Φ <sup>+</sup>	F-	Φ <sup>-</sup>	F <sub>0</sub>	Φ <sub>0</sub>
1	322.92	-1.5	1.95	142.4	3.25	-3.9
2	2.21	-2.7	2.25	-179.7	0.08	-85.7
3	1.71	20.5	2.75	178.6	8.83	-34.8
4	2.21	0.8	2.16	-179.9	0.09	-110.0
5	2.07	-11.2	8.10	170.2	1.01	-87.0
6	2.28	-0.8	2.21	-178.7	0.10	-96.7
7	9.18	2.6	2.21	-179.8	0.38	64.6
8	2.24	-1.4	2.28	-178.0	0.09	-75.0
9	2.26	-4.2	2.35	-173.5	0.65	-64.0
10	2.22	-1.3	2.23	-178.2	0.08	-83.4
11	2.20	-7.9	3.97	-166.0	0.60	12.1
12	2.19	-1.3	2.20	-178.8	0.08	-85.0
13	2.97	-25.4	2.11	176.2	0.12	166.4
14	2.25	-1.7	2.23	-179.0	0.08	-119.3
15	2.26	-0.2	2.24	-179.4	0.37	-66.0

(c)

HARMONICS TABLE				
0:00:02				
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	69.9	64.2	64.8	433.4
H3%f	63.4	60.6	61.0	429.9
H5%f	23.7	17.8	18.4	22.0
H7%f	13.0	8.3	8.7	10.5
H9%f	9.2	5.8	5.9	49.1
H11%f	3.8	3.9	4.1	6.9
H13%f	3.0	2.2	2.6	1.8
H15%f	1.9	0.2	0.2	3.4
21/11/13 10:49:42 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH		TREND	

(d)

h	F+	Φ <sup>+</sup>	F-	Φ <sup>-</sup>	F <sub>0</sub>	Φ <sub>0</sub>
1	15.14	-16.5	2.41	165.1	2.11	161.5
2	0.11	-32.2	0.13	-155.5	0.09	87.4
3	1.63	-52.6	0.96	-62.5	9.30	124.1
4	0.13	-24.7	0.12	-156.9	0.11	86.6
5	0.14	-1.1	3.00	-115.6	0.46	80.6
6	0.13	-25.7	0.13	-154.4	0.12	91.3
7	1.51	-62.0	0.11	91.0	0.26	43.9
8	0.13	-25.4	0.13	-154.8	0.12	91.2
9	0.09	135.1	0.23	148.0	1.01	37.9
10	0.14	-26.2	0.13	-152.5	0.12	90.8
11	0.12	-81.4	0.52	111.2	0.11	-140.9
12	0.13	-23.6	0.13	-152.8	0.12	90.6
13	0.29	-143.5	0.06	-154.7	0.09	100.8
14	0.13	-24.3	0.13	-153.6	0.12	92.0
15	0.18	-45.2	0.16	-128.8	0.05	114.5

Fonte: Dados da autora.



V. Caso 5 – SE e FAP de três braços em operação com tensões de alimentação equilibradas e cargas desequilibradas

Figura 133 – Caso 5: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 105(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 105(c); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 106(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 106(c).

(a)

HARMONICS TABLE				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%f	2.9	2.9	3.0	34.0
H3%f	0.6	0.6	0.7	9.0
H5%f	2.2	2.1	2.2	9.3
H7%f	1.7	1.9	1.9	8.3
H9%f	0.2	0.1	0.2	8.6
H11%f	0.4	0.2	0.2	9.1
H13%f	0.2	0.3	0.1	8.5
H15%f	0.3	0.2	0.3	8.9

18/11/13 14:18:24 230V 50Hz 3Ø WVE EN50160

(b)

h	F+	$\Phi^{o+}$	F-	$\Phi^{o-}$	F <sub>0</sub>	$\Phi^{o0}$
1	321.89	-1.2	3.15	150.0	0.37	154.6
2	2.65	-14.5	2.39	-178.2	0.62	-130.2
3	1.91	22.6	2.72	-164.4	2.04	102.3
4	1.69	-5.7	2.28	-170.5	0.23	-106.1
5	2.13	-5.6	9.47	177.3	0.61	164.0
6	2.35	-11.0	2.11	-178.1	0.24	-156.8
7	7.73	-6.3	2.60	-166.0	0.40	-43.0
8	1.90	-0.8	1.95	-172.8	0.22	129.0
9	2.22	-20.1	2.10	-160.5	0.30	-15.4
10	2.62	-4.0	2.13	172.7	0.08	-76.5
11	2.55	-11.7	2.75	160.2	0.24	88.3
12	2.28	0.8	2.11	169.3	0.34	54.9
13	2.72	-2.6	2.16	172.5	0.18	-170.4
14	2.31	14.9	2.23	-178.9	0.52	41.2
15	2.55	11.4	2.47	172.5	0.78	-147.1

(c)

HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	3.3	4.2	3.7	201.0
H3%f	1.9	2.2	1.7	189.4
H5%f	1.6	2.2	1.9	21.5
H7%f	0.9	1.4	2.0	33.7
H9%f	1.0	0.9	0.6	32.2
H11%f	0.6	0.7	0.8	19.2
H13%f	0.7	0.8	0.7	15.9
H15%f	0.6	0.6	0.6	19.9

18/11/13 14:18:12 230V 50Hz 3Ø WVE EN50160

(d)

h	F+	$\Phi^{o+}$	F-	$\Phi^{o-}$	F <sub>0</sub>	$\Phi^{o0}$
1	16.95	-0.4	0.25	179.1	0.06	113.5
2	0.29	53.3	0.30	163.2	0.07	-42.2
3	0.29	-73.6	0.26	-7.4	0.28	61.7
4	0.20	26.2	0.33	95.0	0.15	112.6
5	0.22	3.2	0.34	-43.5	0.03	-29.8
6	0.25	49.6	0.15	-137.5	0.07	-30.2
7	0.39	3.9	0.22	147.4	0.05	159.4
8	0.16	-29.5	0.12	-68.7	0.05	16.1
9	0.35	104.4	0.09	111.1	0.08	-24.3
10	0.36	-16.0	0.12	156.8	0.05	-54.9
11	0.24	178.9	0.38	-146.1	0.12	-141.9
12	0.29	46.9	0.29	-149.9	0.06	165.4
13	0.35	-173.0	0.21	-74.1	0.02	-0.3
14	0.29	-25.8	0.32	131.7	0.07	-143.9
15	0.48	-58.1	0.39	-16.9	0.09	-71.0

Fonte: Dados da autora.

VI. Caso 6 – FAP de quatro braços em operação com tensões de alimentação equilibradas e cargas desequilibradas

Figura 134 – Caso 6: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 110(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 110(c); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 111(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 111(c).

(a)

HARMONICS TABLE				
0:00:02				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%f	2.9	3.0	3.2	31.8
H3%f	0.7	0.6	0.7	8.8
H5%f	1.8	1.7	1.9	9.1
H7%f	2.1	2.3	2.3	9.5
H9%f	0.2	0.1	0.2	8.7
H11%f	0.2	0.2	0.1	9.7
H13%f	0.3	0.7	0.5	9.4
H15%f	0.3	0.3	0.2	9.3

18/11/13 11:42:50 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160

(b)

h	F+	$\Phi^{\circ+}$	F-	$\Phi^{\circ-}$	F <sub>0</sub>	$\Phi^{\circ}_0$
1	327.75	-1.5	3.70	148.4	1.81	71.4
2	1.60	3.8	2.30	-169.9	0.23	131.5
3	1.99	30.7	2.67	178.6	2.92	91.2
4	1.94	-15.4	2.17	-170.2	0.21	101.6
5	2.74	10.4	7.97	158.6	1.01	55.0
6	2.46	-14.4	1.87	-177.0	0.46	-124.1
7	9.85	5.4	2.88	175.2	0.28	90.3
8	2.30	7.3	2.39	179.4	0.39	78.6
9	1.58	3.1	2.37	-169.3	0.73	70.6
10	2.27	3.6	2.62	173.0	0.20	123.1
11	2.59	-7.3	2.30	178.0	0.27	115.1
12	2.05	1.7	2.13	175.0	0.15	109.2
13	3.65	-11.1	2.30	-173.9	0.18	-163.4
14	2.36	5.7	2.37	175.9	0.35	-1.5
15	2.81	-17.2	1.92	-176.5	0.73	-105.3

(c)

HARMONICS TABLE				
0:00:02				
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	3.8	6.0	6.5	799.3
H3%f	1.6	3.1	3.0	629.3
H5%f	1.4	1.7	3.2	253.8
H7%f	1.9	3.2	3.0	150.1
H9%f	0.7	2.1	2.0	298.8
H11%f	0.7	1.2	1.4	154.8
H13%f	0.7	0.8	1.0	90.0
H15%f	0.6	1.1	1.2	171.2

18/11/13 11:42:37 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160

(d)

h	F+	$\Phi^{\circ+}$	F-	$\Phi^{\circ-}$	F <sub>0</sub>	$\Phi^{\circ}_0$
1	20.73	-1.9	0.95	-179.9	1.10	179.5
2	0.41	-49.7	0.36	-178.0	0.03	-147.3
3	0.32	-13.1	0.40	165.6	0.59	-124.4
4	0.31	-34.4	0.14	-81.9	0.09	-56.3
5	0.40	-176.7	0.51	-64.3	0.17	-158.7
6	0.68	-17.8	0.53	100.3	0.05	-94.0
7	0.80	29.0	0.41	-168.8	0.25	-109.6
8	0.31	20.5	0.57	152.2	0.08	-121.1
9	0.29	23.1	0.41	77.6	0.32	-146.8
10	0.21	109.9	0.46	-153.0	0.05	-21.7
11	0.62	82.8	0.18	-45.3	0.08	107.5
12	0.29	-161.2	0.23	-174.1	0.09	158.0
13	0.42	-10.6	0.34	119.9	0.13	-32.0
14	0.28	53.0	0.48	151.6	0.12	170.6
15	0.37	65.0	0.14	-52.7	0.21	-97.7

Fonte: Dados da autora.

VII. Caso 7 – Sem filtros com tensões de alimentação desequilibradas e cargas equilibradas

Figura 135 – Caso 7: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 114(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 114(c); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 114(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 114(c).

(a)

HARMONICS TABLE				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%f	6.7	6.5	7.0	40.5
H3%f	6.0	6.1	6.1	20.9
H5%f	2.4	1.5	2.6	6.2
H7%f	1.4	1.5	1.9	3.4
H9%f	0.4	0.4	0.4	3.9
H11%f	0.5	0.4	0.6	7.8
H13%f	0.2	0.4	0.2	4.2
H15%f	0.1	0.1	0.0	6.9

19/11/13 17:54:17 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160

(b)

h	F+	$\Phi^{\circ+}$	F-	$\Phi^{\circ-}$	F <sub>0</sub>	$\Phi^{\circ 0}$
1	311.03	-1.7	8.70	36.7	7.91	-24.3
2	0.09	-57.9	0.16	-173.8	0.12	91.2
3	1.04	-30.8	0.54	-136.7	18.84	-37.6
4	0.11	-17.5	0.12	164.4	0.15	106.3
5	0.26	-81.6	6.97	162.9	1.96	110.7
6	0.16	-3.6	0.13	-137.0	0.11	83.8
7	5.34	-10.7	0.35	-156.1	0.63	85.7
8	0.14	-42.4	0.15	-155.9	0.14	92.5
9	0.19	-36.3	0.31	-112.8	1.08	-43.9
10	0.14	-19.4	0.11	-151.1	0.11	86.9
11	0.19	-14.9	1.50	-146.6	0.35	130.8
12	0.16	-25.7	0.14	-145.6	0.13	83.9
13	0.90	-71.5	0.11	-159.2	0.36	146.6
14	0.13	-34.9	0.14	-155.9	0.10	77.7
15	0.22	-14.5	0.26	-142.7	0.08	-31.6

(c)

HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	67.9	71.0	66.2	4194
H3%f	63.4	64.9	62.5	4180
H5%f	23.1	26.5	20.8	251.2
H7%f	7.2	10.3	5.7	84.5
H9%f	2.0	3.8	2.3	173.9
H11%f	2.1	1.6	2.2	67.7
H13%f	1.3	1.3	1.6	25.7
H15%f	1.1	1.1	0.9	63.1

19/11/13 17:54:26 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160

(d)

h	F+	$\Phi^{\circ+}$	F-	$\Phi^{\circ-}$	F <sub>0</sub>	$\Phi^{\circ 0}$
1	19.62	-17.2	0.80	-5.2	0.21	-86.2
2	0.13	-29.4	0.15	-153.5	0.11	91.2
3	1.00	139.4	0.50	-28.0	12.44	125.7
4	0.15	-27.4	0.12	-153.9	0.13	85.9
5	0.46	109.8	4.60	-106.5	0.60	-68.5
6	0.13	-29.9	0.14	-152.9	0.13	90.4
7	1.65	-22.5	0.23	108.5	0.14	-107.1
8	0.14	-25.8	0.14	-153.2	0.13	89.3
9	0.21	-85.3	0.05	166.3	0.65	93.5
10	0.14	-27.5	0.14	-152.3	0.12	90.5
11	0.09	-74.0	0.18	16.9	0.25	39.0
12	0.14	-26.9	0.14	-151.8	0.13	89.9
13	0.11	115.9	0.19	169.2	0.09	47.7
14	0.13	-26.5	0.14	-153.4	0.12	90.5
15	0.07	-46.4	0.10	-152.8	0.26	134.4

Fonte: Dados da autora.

VIII. Caso 8 – SE e FAP de três braços em operação com tensões de alimentação desequilibradas e cargas equilibradas

Figura 136 – Caso 8: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 118(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 118(b); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 119(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 119(c).

(a)

HARMONICS TABLE				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%f	2.5	2.6	2.8	33.3
H3%f	0.6	0.7	0.6	9.9
H5%f	1.2	1.3	1.4	9.2
H7%f	2.0	2.1	2.2	10.4
H9%f	0.4	0.3	0.3	10.1
H11%f	0.3	0.3	0.3	9.9
H13%f	0.1	0.2	0.1	9.4
H15%f	0.3	0.3	0.3	9.2

(b)

h	F+	$\Phi^{\circ+}$	F-	$\Phi^{\circ-}$	F <sub>0</sub>	$\Phi^{\circ}_0$
1	315.26	-1.5	8.77	48.3	8.80	-30.3
2	3.21	-10.2	1.42	-172.1	0.89	-44.2
3	2.56	4.5	2.99	-160.7	1.48	61.1
4	3.01	-2.7	2.40	175.0	0.34	85.2
5	1.56	-1.1	4.90	-173.9	0.03	-124.5
6	1.46	10.5	2.16	-168.1	0.81	-78.1
7	9.64	-0.5	2.99	175.1	0.29	70.1
8	2.09	-10.8	2.34	-166.0	0.61	-102.1
9	1.95	-4.6	2.43	-164.0	0.81	-112.4
10	1.90	-15.7	2.26	-173.2	0.27	-78.0
11	1.93	-1.6	2.73	-166.4	0.47	-1.7
12	1.72	-9.5	2.03	-166.4	0.46	-134.5
13	2.15	7.8	2.74	156.8	0.64	125.8
14	2.42	-17.4	2.77	-179.8	0.52	-123.5
15	1.73	-7.4	2.58	-177.5	1.15	-156.9

(c)

HARMONICS TABLE				
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	4.1	4.2	4.3	84.1
H3%f	2.6	2.6	2.6	71.3
H5%f	2.0	2.0	1.6	14.2
H7%f	1.2	1.3	2.0	12.9
H9%f	0.6	0.6	0.7	7.6
H11%f	0.6	0.6	0.6	3.7
H13%f	0.6	0.6	0.4	3.5
H15%f	0.5	0.6	0.5	3.8

(d)

h	F+	$\Phi^{\circ+}$	F-	$\Phi^{\circ-}$	F <sub>0</sub>	$\Phi^{\circ}_0$
1	20.90	-1.4	1.47	-116.6	0.90	160.9
2	0.18	166.0	0.16	60.5	0.14	37.6
3	0.30	-78.4	0.16	-29.1	0.55	54.3
4	0.23	22.0	0.34	-120.5	0.22	-163.6
5	0.21	-49.3	0.38	-34.0	0.11	-26.9
6	0.27	-85.0	0.20	-1.4	0.09	75.7
7	0.27	6.8	0.25	-175.9	0.13	168.7
8	0.18	28.5	0.09	-33.5	0.07	-32.5
9	0.13	-87.9	0.33	144.3	0.08	149.9
10	0.52	-47.9	0.34	112.4	0.04	48.0
11	0.24	48.4	0.36	164.8	0.10	155.5
12	0.28	20.1	0.07	-130.9	0.04	-5.1
13	0.13	157.6	0.31	-22.3	0.05	141.4
14	0.09	-44.2	0.35	130.3	0.08	91.9
15	0.23	-55.4	0.24	-173.8	0.03	-140.9

Fonte: Dados da autora.

IX. Caso 9 – FAP de quatro braços em operação com tensões de alimentação desequilibradas e cargas equilibradas

Figura 137 – Caso 9: (a) Tabela correspondente ao espectro das tensões de fase da figura 124(b); (b) Tabela correspondente ao espectro das tensões sequenciais da figura 124(c); (c) Tabela correspondente ao espectro das correntes de fase da figura 125(b); (d) Tabela correspondente ao espectro das correntes sequenciais da figura 125(c).

(a)

HARMONICS TABLE				
0:00:02				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%f	2.8	2.9	3.1	34.7
H3%f	1.0	1.0	1.0	10.3
H5%f	2.0	2.0	2.2	10.5
H7%f	1.6	1.7	1.9	10.6
H9%f	0.2	0.1	0.2	9.9
H11%f	0.2	0.2	0.3	10.6
H13%f	0.1	0.3	0.3	9.7
H15%f	0.2	0.2	0.2	10.5
20/11/13 05:10:31 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W U&A	HARMONIC GRAPH		TREND	

(b)

h	F+	$\Phi^{\circ+}$	F-	$\Phi^{\circ-}$	F <sub>0</sub>	$\Phi^{\circ 0}$
1	310.30	-0.8	7.06	39.5	8.43	-18.8
2	1.16	39.2	1.75	-116.9	0.19	176.8
3	3.71	2.4	2.82	164.5	3.29	86.2
4	2.91	-29.0	2.50	158.2	0.59	169.8
5	1.00	13.9	8.57	-173.6	0.89	26.3
6	2.23	22.6	2.00	-158.0	0.77	-65.3
7	7.81	-7.0	2.42	-177.1	0.30	45.1
8	1.83	-14.9	2.10	-143.5	0.08	102.3
9	1.94	-2.4	1.53	149.9	0.54	134.9
10	2.85	-28.9	1.94	-167.5	0.38	-160.0
11	3.10	22.9	3.24	175.3	0.52	77.9
12	2.09	-17.7	1.33	-159.7	0.70	-78.5
13	2.70	-1.3	2.26	168.2	0.42	-0.9
14	2.42	-13.1	1.21	-169.9	0.26	120.8
15	1.70	17.0	1.66	-128.9	0.61	-118.0

(c)

HARMONICS TABLE				
0:00:02				
Amp	L1	L2	L3	N
THD%f	3.5	4.3	4.5	487.6
H3%f	0.9	2.3	2.6	388.1
H5%f	1.8	1.6	1.9	104.8
H7%f	1.8	2.2	2.1	42.5
H9%f	0.8	1.4	1.0	180.9
H11%f	0.6	0.8	0.7	57.3
H13%f	0.6	0.7	0.6	26.4
H15%f	0.8	1.0	0.8	127.5
20/11/13 05:10:18 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W U&A	HARMONIC GRAPH		TREND	

(d)

h	F+	$\Phi^{\circ+}$	F-	$\Phi^{\circ-}$	F <sub>0</sub>	$\Phi^{\circ 0}$
1	23.23	-1.4	1.24	164.0	1.18	174.7
2	0.33	-0.2	0.26	-46.1	0.03	-126.1
3	0.18	73.9	0.20	-120.1	0.43	-107.7
4	0.60	4.6	0.35	-146.6	0.09	-8.8
5	0.61	-79.3	0.32	-66.5	0.25	167.4
6	0.30	-72.4	0.16	-24.1	0.08	-24.9
7	0.75	24.0	0.19	-175.0	0.15	-103.0
8	0.51	-33.5	0.21	68.3	0.01	171.5
9	0.71	-16.8	0.52	135.9	0.34	-141.0
10	0.38	6.7	0.49	153.9	0.13	-7.7
11	0.34	141.1	0.31	-89.2	0.04	66.6
12	0.11	153.7	0.32	79.2	0.02	-77.3
13	0.22	-25.1	0.31	171.6	0.05	93.9
14	0.54	34.2	0.30	-166.6	0.07	-171.9
15	0.11	-20.6	0.11	22.8	0.18	-119.7

Fonte: Dados da autora.